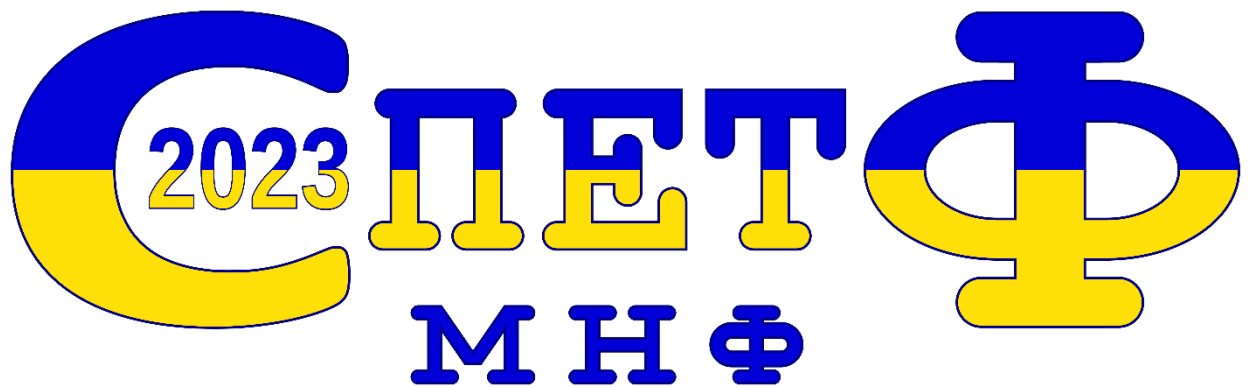


ISSN 2521-6996

Національна академія наук України
Інститут прикладної фізики
Сумський державний педагогічний університет імені А. С. Макаренка
Національний технічний університет України «Київський політехнічний
інститут імені Ігоря Сікорського»



***СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ,
ТЕОРЕТИЧНОЇ ФІЗИКИ
ТА МЕТОДИКИ НАВЧАННЯ ФІЗИКИ***

**МАТЕРІАЛИ
ІХ Всеукраїнської науково-практичної конференції
з міжнародною участю**

**10–12 квітня 2023 року
м. Суми**

**Національна академія наук України
Інститут прикладної фізики
Сумський державний педагогічний університет імені А. С. Макаренка
Національний технічний університет України «Київський політехнічний
інститут імені Ігоря Сікорського»**

**СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ,
ТЕОРЕТИЧНОЇ ФІЗИКИ
ТА МЕТОДИКИ НАВЧАННЯ ФІЗИКИ**

**Матеріали
IX Всеукраїнської науково-практичної конференції
з міжнародною участю**

(Суми, 10-12 квітня 2023 року)

За редакцією кандидата фізико-математичних наук, наукового співробітника
Інституту прикладної фізики НАН України С. О. Лебединського

Суми

2023

Рекомендовано вченою радою Інституту прикладної фізики НАН України
(протокол №4 від 01.05.2023 р.)

Упорядник: Лебединський С. О., кандидат фізико-математичних наук, науковий співробітник Інституту прикладної фізики НАН України

Рецензенти:

Холодов Р. І. – доктор фізико-математичних наук, член-кореспондент НАН України, в.о. директора Інституту прикладної фізики НАН України.

Салтикова А. І. – кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри математики, фізики та методик їх навчання СумДПУ імені А. С. Макаренка.

М 34 Сучасні проблеми експериментальної, теоретичної фізики та методики навчання фізики: матеріали VIII Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю, м. Суми, 10-12 квітня 2023 року / за ред. С. О. Лебединського – Суми: ІПФ НАН України, 2023. – 91 с.

У збірнику подані матеріали IX Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю «Сучасні проблеми експериментальної, теоретичної фізики та методики навчання фізики». У тезах представлені результати теоретичних і експериментальних досліджень.

Для наукових співробітників, викладачів навчальних закладів освіти, аспірантів та студентів.

Матеріали подаються в авторській редакції.

Відповідальність за достовірність інформації, автентичність цитат, правильність фактів, посилань несуть автори.

NON-DESTRUCTIVE ANALYSIS OF PRODUCTS AND RESIDUES OF PRODUCTION OF CAST COPIES OF ROMAN DENARII IN THE CHERNYAKHIV CULTURE <i>Buhay O.</i>	8
INVERSE PROBLEM OF KINEMATICS OF CRANK-SLIDER MECHANISM USING VECTOR ALGEBRA METHODS <i>Duchenko K. O., Khoroshev K. G., Kykot S. V.</i>	9
INFLUENCE OF INTERFACIAL SPIN-ORBIT EFFECTS ON MAGNETO-OPTIC-KERR-EFFECT IN MAGNETIC/NONMAGNETIC HETEROSTRUCTURES <i>Kononenko I. M.</i>	11
RADIUS-INDEPENDENT PLATEAU FORMATION ON ACCELERATING WAKEFIELD FOR ELECTRON-WITNESS-BUNCHES AND ON DECELERATING WAKEFIELD FOR DRIVER-BUNCHES IN A PLASMA <i>Demydenko I. V., Maslov V. I., Miriuk O. V., Ovsiannikov R. T., Shendryk D. O.</i>	12
HIGH DEMAGNIFICATION PROBE-FORMING SYSTEMS WITH SPHERICAL ABERRATION CORRECTION FOR NUCLEAR MICROPROBE <i>Ponomarev A. G., Kolinko S. V., Polozhii H. E., Rebrov V. A.</i>	13
A PULSED DC CRYOGENIC SYSTEM AS A PART OF FREIA LABORATORY <i>Profatilova Ia., Jacewicz M., Coman M.</i>Помилка! Закладку не визначено.	
МОДЕЛЮВАННЯ ДИФУЗІЇ ПРЕЦИПІТАТІВ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ РІВНЯННЯ ЛАНЖЕВЕНА ТА ТЕХНОЛОГІЇ ПАРАЛЕЛЬНИХ ОБЧИСЛЕНЬ <i>Алексенко О. В.</i> .	17
ЧИСЕЛЬНИЙ МЕТОД РОЗРАХУНКУ МЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ ПІД ДІЄЮ ВІБРАЦІЙНИХ НАВАНТАЖЕНЬ <i>Бабенко А. Є., Боронко О. О., Трубацев С. І., Лавренко Я. І.</i>	18
ДОСЛІДЖЕННЯ СТАТИСТИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ НАДПОВІЛЬНИХ ПОЛЬОТІВ ЛЕВІ В РЕЖИМІ РІДКІСНИХ ФЛУКТУАЦІЙ <i>Бистрик Ю. С., Денисов С. І.</i>	20
ВПЛИВ ОПРОМІНЕННЯ І НАСИЧЕННЯ ВАКАНСІЯМИ НА ФАЗОВУ СТАБІЛЬНІСТЬ НАНОЧАСТИНОК ЗАЛІЗА <i>Білогородський Ю. С., Шірінян А. С., Кріт О. М.</i>	21
ВИКОРИСТАННЯ СМАРТФОНА У НАВЧАЛЬНОМУ ЕКСПЕРИМЕНТІ З ФІЗИКИ <i>Бондар М. Ю., Салтикова А. І.</i>	22

ІНФРАЧЕРВОНА СПЕКТРОМЕТРІЯ ВОЛОГОЇ ДЕРЕВИНИ АРХЕОЛОГІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ <i>Бугай О., Пихова О.</i>	23
ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ІОННОГО ДЖЕРЕЛА З ЕЛЕКТРОННИМ УДАРОМ <i>Возний В. І., Пономарьов О. Г., Москаленко В. Б.</i>	25
ВИКОРИСТАННЯ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У ВИКЛАДАННІ ФІЗИКИ В УМОВАХ ФАХОВОГО КОЛЕДЖУ <i>Волосенко А. В.</i>	26
ВПЛИВ ТУНЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОНІВ НА ШВИДКІСТЬ АНІГІЛЯЦІЇ ПОЗИТРОНА В СФЕРИЧНІЙ ПОТЕНЦІАЛЬНІЙ ЯМІ <i>Ворона М. І, Лебедь О. А.</i>	28
НОВИЙ СПОСІБ РОЗРАХУНКУ ЙМОВІРНОСТІ ПРОЦЕСУ НАРОДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОН-ПОЗИТРОННОЇ ПАРИ ПРИ РОЗСПЮВАННІ ЕЛЕКТРОНА НА ПОЛІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ХВИЛІ <i>Ворошило О. І., Недорешта В. М.</i>	30
ОРГАНІЗАЦІЯ ДОСЛІДНО – ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ СТУДЕНТІВ НА ЗАНЯТТЯХ З ФІЗИКИ В УМОВАХ ЗМІШАНОГО НАВЧАННЯ <i>Голубкова І. М.</i>	32
МОТОРИ, ЯКІ ВИКОРИСТОВУЮТЬ У БІОНІЧНИХ ПРОТЕЗАХ РУКИ, ТА ЇХНІ ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ <i>Гусак А. В., Мусієнко О. С.</i>	35
НЕЛІНІЙНІ ЕФЕКТИ ПРИ ПРОХОДЖЕННІ ЗАРЯДЖЕНОЇ ЧАСТИНКИ КРІЗЬ ЕЛЕКТРОННУ ПЛАЗМУ <i>Дяченко М. М., Холодов Р. І., д.ф.-м.н.</i>	36
МЕТАПОВЕРХНІ ДЛЯ ПЛАНАРНИХ ОПТИЧНИХ ПОЛЯРИЗАЦІЙНИХ ПРИСТРОЇВ ТА ЗАХВАТУ СВІТЛА В ОПТОВОЛОКНО <i>Єрмаков О. Є.</i>	37
ДОСЛІДНИЦЬКО-ПРОЄКТНИЙ ПІДХІД ДО НАВЧАННЯ ФІЗИКИ ТА ФОРМУВАННЯ МОЛОДИХ НАУКОВЦІВ <i>Єрмаков О. Є.</i>	39
ДІЛЬНИК НАПРУГИ ПРИСКОРЮВАЛЬНОЇ ТРУБКИ ДЛЯ ПРОТОННО - ПРОМЕНЕВОЇ ЛІТОГРАФІЇ <i>Ігнат'єв І. Г.</i>	40
НДС КОРТИКАЛЬНОЇ КІСТКИ ЛЮДИНИ НА ПРИКЛАДІ ФАЛАНГ ПАЛЬЦІВ РУКИ <i>Іщенко О. А., Старостін А. Є.</i>	42
ФОРМУВАННЯ ІНІЦІАТИВНОСТІ І ПІДПРИЄМЛИВОСТІ НА УРОКАХ ФІЗИКИ ЧЕРЕЗ ВИКОРИСТАННЯ ІНТЕРАКТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ <i>Калініченко Д. І.</i>	44
ВПЛИВ РАДІАЦІЙНО-ІНДУКОВАНИХ ДЕФЕКТІВ НА СТІЙКІСТЬ ДО ВАКУУМНИХ ПРОБОЇВ ПОВЕРХНІ МІДНИХ ЗРАЗКІВ <i>Карпенко О. Ю., Батурін В. А., Єрьомін С. О., Росенко О. Ю., Нагорний А. Г.</i>	46

ОТРИМАННЯ СТІЙКИХ ДО АБРАЗИВНОГО ЗНОСУ ПОКРИТТІВ В4С МЕТОДОМ МАГНЕТРОННОГО РОЗПИЛЕННЯ <i>Коломієць В. М., Кравченко С. М., Гончаренко О. І.</i>	48
ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ І СУЧАСНІ АКТУАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ ЯДЕРНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ <i>Kul'ment'ev A. I., Flat A. Ya.</i>	49
ПОЛЬОВА ЕЛЕКТРОННА ЕМІСІЯ ПРИ НАЯВНОСТІ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ ВКРАПЛЕНЬ В МЕТАЛІ <i>Лебединська Ю. С., Лебединський С. О., Холодов Р. І.</i>	51
ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПОР У ПРИ ПОВЕРХНЕВОМУ ШАРІ МЕТАЛУ НА ГУСТИНУ СТРУМУ ПОЛЬОВОЇ ЕМІСІЇ <i>Лебединський С. О., Лебединська Ю. С., Холодов Р. І., Сторіжко В. Ю.</i>	53
АКТУАЛЬНІ ПИТАННЯ РЕАЛІЗАЦІЇ ФАЗОВОГО КОНТРАСТУ НА КОМПАКТНИХ ДЖЕРЕЛАХ РЕНТГЕНІВСЬКОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ <i>Лебедь О. А., Овчаренко А. Ю., Стародуб С. С., Крамченков А. Б.</i>	55
МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРКОЛЯЦІЙНОЇ ПОВЕДІНКИ ЕЛЕКТРОПРОВІДНОСТІ ПОЛІМЕРНИХ НАНОКОМПОЗИТІВ, ЯКІ МІСТЯТЬ ВУГЛЕЦЕВІ НАНОТРУБКИ <i>Лисенков Е. А., Гилко М. В., Біла В. О.</i>	56
ВИВЧЕННЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНИХ ФІЗИЧНИХ ТЕОРІЙ В ШКІЛЬНОМУ КУРСІ ФІЗИКИ <i>Лобас Д. І.</i>	58
ОСОБЛИВОСТІ ВИКЛАДАННЯ МЕДИЧНОЇ І БІОЛОГІЧНОЇ ФІЗИКИ В МЕДИЧНОМУ УНІВЕРСИТЕТІ <i>Микитюк О. Ю.</i>	60
ВПЛИВ СИЛИ ДЗЕРКАЛЬНОГО ЗОБРАЖЕННЯ НА ФОРМУ ПОТЕНЦІАЛЬНОГО БАР'ЄРА ДЛЯ ПОЛЬОВОЇ ЕМІСІЇ З МЕТАЛІВ <i>Мусієнко І. І.</i>	61
ПОЛЯРИЗАЦІЙНІ ЕФЕКТИ ПРИ СПОНТАННОМУ ВИПРОМІНЕННЮ ФОТОНА ЕЛЕКТРОНОМ У ПОЛІ ЛАЗЕРНОЇ ХВИЛІ <i>Недорешта В. М.</i>	63
ОСОБЛИВОСТІ ПЕРЕРОЗПОДІЛУ ІНТЕНСИВНОСТІ НА ГРАНИЦІ ПОДІЛУ СЕРЕДОВИЩ В МЕТОДІ ЛІНІЙНОГО ФАЗОВОГО КОНТРАСТУ <i>Овчаренко А. Ю., Лебедь О. А., Крамченков А. Б.</i>	64
ВИЗНАЧЕННЯ ПРУЖНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПАКЕТУ МОНОШАРІВ КОМПОЗИТНИХ ТОНКОСТІННИХ ПЛАСТИН <i>Овчаренко Є. І., Кришук М. Г., Ярусевич Д. А.</i>	66

РОЗКРИТТЯ ТРІЩИНИ НА МЕЖІ ТОНКОГО ЖОРСТКОГО ВКЛЮЧЕННЯ У ПРУЖНОМУ МАТЕРІАЛІ <i>Острик В. І.</i>	68
ІНСТРУМЕНТ КОРЕКЦІЇ МЕЖ ФАЗОВИХ СТАНІВ ФЕРОМАГНІТНОЇ НАНОЧАСТИНКИ У В'ЯЗКІЙ РІДИНІ ЗІ СКІНЧЕНОЮ МАГНІТНОЮ АНІЗОТРОПІЄЮ <i>Павлюк М. О., Петренко М. С.</i>	69
ЧИСЕЛЬНО-ВІЗУАЛЬНИЙ ПОШУК КОНТРАСТНИХ ЗОБРАЖЕНЬ В МЕТОДІ РЕНТГЕНІВСЬКОГО ФАЗОВОГО КОНТРАСТУ НА ОСНОВІ ВІЛЬНОГО ПОШИРЕННЯ <i>Поліщук А. В., Павлюк М. О.</i>	71
ПРОТОННА ЛІТОГРАФІЯ В СВІТІ ТА В УКРАЇНІ <i>Положій Г. Є., Пономарьов О. Г., Ребров В. А., Колінько С. В., Салівон В. Ф., Калінкевич О. М., Калінкевич О. В., Шуліна Р. О.</i>	72
ПЕРЕВАГИ VS НЕДОЛІКИ ІНТЕРАКТИВНИХ ВПРАВ ФІЗИЧНОГО ЗМІСТУ, РОЗРОБЛЕНИХ ЗАСОБАМИ LEARNING APPS <i>Пустовий М. С.</i>	73
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ІОННОГО ПУЧКА КОМПАКТНОГО ДЖЕРЕЛА ІОНІВ МЕТАЛІВ ДЛЯ ІМПЛАНТЕРНОЇ ТЕХНІКИ <i>Роєнко О. Ю., Литвинов П. О., Батурін В. А.</i>	74
ЦІННІСНИЙ КОМПОНЕНТ ПРЕДМЕТНОЇ КОМПЕТЕНТНОСТІ УЧНІВ З ФІЗИКИ <i>Саєнко О. В., Салтиков Д. І.</i>	76
БЛОК ВИСОКОВОЛЬТНОГО ЖИВЛЕННЯ УСТАНОВКИ ВАКУУМНОГО МАГНЕТРОННОГО НАПИЛЕННЯ <i>Сайко М. О., Ігнатенко С. М.</i>	77
ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ШВИДКОСТІ ПРОДУКУВАННЯ ТОЧКОВИХ ДЕФЕКТІВ ТА ТЕМПЕРАТУРИ НА РАДІАЦІЙНО-ІНДУКОВАНУ СЕГРЕГАЦІЮ В СПЛАВАХ Fe-Cr-Ni МЕТОДОМ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ <i>Скороход Р. В., Коропов О. В.</i>	78
ВИКОРИСТАННЯ ДИНАМІЧНОГО ГРАФІЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ І ЯВИЩ ПІД ЧАС ВИВЧЕННЯ ПРИРОДНИЧИХ ДИСЦИПЛІН У ЗАКЛАДАХ ФАХОВОЇ ПЕРЕДВИЩОЇ ОСВІТИ <i>Стома В. М.</i>	80
НАОЧНІ МЕТОДИ НАВЧАННЯ ПРИ ВИВЧЕННІ БІОФІЗИКИ <i>Федів В. І., Олар О. І., Бірюкова Т. В.</i>	82
ЕЛЕМЕНТИ ПРОБЛЕМНОГО НАВЧАННЯ В ЗМІСТОВИХ БЛОКАХ ЗАГАЛЬНОЇ ТА ПРИКЛАДНОЇ БІОФІЗИКИ ПРАКТИЧНИХ ЗАНЯТЬ ДЛЯ СТУДЕНТІВ МЕДИЧНИХ ЗВО <i>Федів В. І., Олар О. І., Бірюкова Т. В.</i>	82

РАДІАЦІЙНЕ СЕРЕДОВИЩЕ І ЗАРЯДЖЕНІ ЧАСТИНКИ МАГНІТОСФЕРНОЇ ПЛАЗМИ ЮПІТЕРА <i>Фоміна А. П., Новак О. П., Маслов В. І., Хелемеля О. В., Холодов Р. І.</i>	83
РЕАЛІЗАЦІЯ КОМПЕТЕНТІСНОГО ПІДХОДУ В ОСВІТНЬОМУ ПРОЦЕСІ ЗАСОБАМИ ПРОЕКТНИХ ТЕХНОЛОГІЙ <i>Черв'яцов В. О., Черв'яцова Ю. О.</i>	85
«ВИКОРИСТАННЯ MIND MAPPING ДЛЯ ВИВЧЕННЯ КЛЮЧОВИХ ПОНЯТЬ ТЕРМОДИНАМІКИ» <i>Шатова О. Д., Каленик М. В.</i>	86
ЧЕТВЕРТИЙ ПОСТУЛАТ МОЛЕКУЛЯРНО-КІНЕТИЧНОЇ ТЕОРІЇ ДЛЯ НАНОРОЗМІРНИХ КРИСТАЛІВ <i>Шірінян А. С.</i>	88
ІННОВАЦІЙНІ ПІДХОДИ ДО НАВЧАННЯ ФІЗИКИ У ЗАКЛАДАХ ЗАГАЛЬНОЇ СЕРЕДНЬОЇ ОСВІТИ <i>Щербак М. О.</i>	89
3D ACOUSTIC METAMATERIALS WITH CONTROLLABLE BANDGAP GATES BASED ON MAGNETORHEOLOGICAL ELASTOMERS <i>Kolupaiev V. O., Gorshkov V. N.</i>	90
ПЕРЕВАГИ І НЕДОЛІКИ «ЗМІШАНОГО НАВЧАННЯ» В ЗАКЛАДАХ ФАХОВОЇ ПЕРЕДВИЩОЇ ОСВІТИ ПРИ ВИКЛАДАННІ ФІЗИКИ. <i>Комар Наталія Дем'янівна.</i>	91
ЗБУДЖЕННЯ ВАЖКОГО ВОДНЕПОДІБНОГО ІОНУ ІНТЕНСИВНИМ РЕНТГЕНІВСЬКИМ ІМПУЛЬСОМ <i>Новак О. П., Холодов Р.І.</i>	93

NON-DESTRUCTIVE ANALYSIS OF PRODUCTS AND RESIDUES OF PRODUCTION OF CAST COPIES OF ROMAN DENARII IN THE CHERNYAKHIV CULTURE

Buhay O., PhD

Institute of Applied Physics, NAS of Ukraine, Sumy, Ukraine.

The analyzed coins belong to one of the most exciting categories of numismatic finds on the territory of Eastern Europe – they are copies of the Roman Empire denarii. The barbarian copies of Roman coins usually include the products of ancient counterfeiters, aimed at making an exact copy of the original issues by various methods (unlike the barbarian imitations, which only imitated the official issues). The most common methods include plating a core made of metal alloys and making coins of metal alloys using casting techniques [1]. All the specimens investigated belonged to the so-called cast copies of Roman denarii. At least six possible centres of their production on the territory of the Chernyakhiv culture are known, where semi-finished products of such coins, production wastes, and even casting moulds have been found [2]. Among the analyzed coins were samples (cast copies, semi-finished cast copies, and production wastes) from such production centres as Abrikosivka and Korzhivtsi in Khmelnytskyi Region. However, more often in the Chernyakhiv culture, such products are recorded among single finds and in different, even the most distant from the centre of culture. These finds could be the products of already known workshops and those not yet discovered. Among the specimens studied, there are single finds from the Khmelnytskyi and Vinnytsia regions.

In the project “Barbarian Fakers. Manufacturing and use of counterfeit Roman Imperial denarii in East-Central Europe in antiquity”, funded by the Poland National Centre of Science (2018/31/B/HS3/00137) and implemented at the Faculty of Archaeology, University of Warsaw (Principal Investigator - dr hab. A. Dymowski), as part of which the present research is conducted, we have been tasked to perform the proton induced X-ray emission analysis (PIXE) of samples associated with the production in the Chernyakhiv culture of cast copies of Roman denarii, in order to determine their chemical composition as precisely as possible. It is known that in the Roman Empire, first of all in Gaul, such coins were made of copper-based metal alloys, although there are some silver-rich alloys [3]. To date, information also on the results of chemical analysis of such coins from the Chernyakhiv culture using X-ray fluorescence (XRF) technique has been accumulated [2], [4], based on which particular ideas about the nature of alloys used to make such coins has already formed among researchers. Therefore our next task was to verify the earlier observations. In addition, we had some of the specimens previously examined by XRF, so another task was to determine the effectiveness and comparison of the two methods for investigating the chemical composition of the copies of Roman coins.

The results analysis showed that most of the samples are Cu-Sn-Pb three-component alloys. The zinc content does not exceed 5%, which means the absence of brass samples according to the classification of Roman copper alloys [5]. Two samples from Klishchiv, Vinnytsia region and Chankiv, Khmelnytsky region are silver

References

- [1] Dymowski A. 2021: Barbarian Copies of Roman Imperial denarii. In: R. Ciołek, R. Chowaniec (ed.), Aleksanderia. Studies on Items, Ideas and History Dedicated to Professor Aleksander Bursche on the Occasion of his 65th Birthday. Wiesbaden, 111–116.
- [2] Nadvirniak O., Pohorilets O. 2019: «Falshyvomonetnytstvo», «neofitsiini imitatsii» chy «neofitsiine monetne vyrobnytstvo»? Do pytannia prysutnosti «lytykh» denariiv I–III stolittia n.e na «varvaskykh» terytoriiakh Pivdenno-Skhidnoi Yevropy (za materialamy mezhyrichia Seredn'oho Dnistra i Pivdennoho Buhu). Ukrainskyi numizmatychnyi schorichnyk 3, 28–41.
- [3] Raub C., Zwicker U. 2012: Cast Forgeries of Roman Denarii and Antoniniani, Silver-tin-copper and Copper-tin alloys. Numismatic Chronicle 172, 219–222.

[4] Myzgin K., Kodatskii S. 2020: Na inshomu bosti Dnipra: pro znakhidky litykh kopii rymskykh denariiv u skhidnomu areali cherniakhivs'koï kul'tury. In: V.M. Orlyk (ed.), Problemy i perspektyvy numizmatyky Antychnoi i Ryms'koï doby na terenakh Pivdenno-Skhidnoi Evropy: tezy dopovidei I Mizhnarodnogo fakhovogo seminaru, prysviachenogo V.O. Anokhinu, 26 veresnia 2019 roku. Medzhybizh–Kropyvnytskyi–Pereiaslav, 52–59.

[5] Dungworth D. B. 1995: Iron Age and Roman copper alloys from northern Britain. PhD thesis, 1995.

INVERSE PROBLEM OF KINEMATICS OF CRANK-SLIDER MECHANISM USING VECTOR ALGEBRA METHODS

Duchenko K.O.; Khoroshev K.G., Ph.D.(Phys.-Math.), Assoc. Prof.; Kykot S.V., Ph.D.(Phys.-Math.), Assoc. Prof.;

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine;

In the study of the kinematics of planar motion of rigid bodies and mechanisms, the methods of vector algebra are used only to develop the theory [1] and to construct contour equations [2-4], which are solved graphically using position, velocity, and acceleration diagrams or analytically by projecting onto coordinate axes using trigonometric relations. Other analytical methods for studying the kinematics of planar mechanisms are the transfer function method, coordinate transformation method [2-3], and coordinate plan method [4]. All analytical methods contain procedures for determining the characteristic angles of rotation of links using geometric drawings and trigonometric transformations. The algorithmization of such approaches requires detailed analysis of the angles, which complicates their computer implementation. The approach [5], based on the use of vector algebra methods for solving the direct problem (given crank movement) of the kinematics of the crank-slider mechanism is extended to the inverse problem, when the movement of the slider is given.

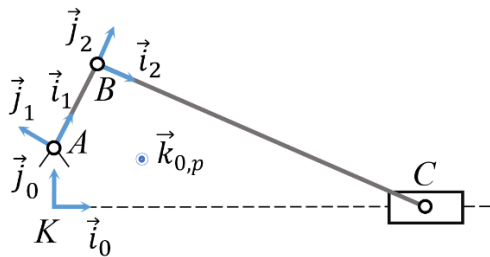


Fig. 1. To formulation of the problem

Consider the movement of the crank-slider mechanism (Fig. 1) with link's lengths: the crank $AB - l_1$, connecting rod $BC - l_2$. Distance KA equals l_0 . The right-hand fixed Cartesian coordinate system $Kx_0y_0z_0$ is associated with the slider's direction of movement (axe Kx_0 lies along the slideline), and is indicated with orts $\vec{i}_0, \vec{j}_0$ and $\vec{k}_0$ in the fig.1. The same is for moving Cartesian coordinate systems $Ax_1y_1z_1$ (axe Ax_1 lies along

crank) with orts $\vec{i}_1, \vec{j}_1, \vec{k}_1$ and $Bx_2y_2z_2$ (axe Bx_2 lies along connecting rod) with orts $\vec{i}_2, \vec{j}_2, \vec{k}_2$. All coordinate systems have such a direction, that orts $\vec{k}_0, \vec{k}_1$ and $\vec{k}_2$ are always parallel to each other. Other orts of moving systems can be determined from following relations:

$$\vec{i}_p = a_p \vec{i}_0 + b_p \vec{j}_0, \quad \vec{j}_p = [\vec{k}_p, \vec{i}_p] = -b_p \vec{i}_0 + a_p \vec{j}_0 \quad (p = 1, 2), \quad (1)$$

where: $a_p = a_p(t) = (\vec{i}_p, \vec{i}_0)$, $b_p = b_p(t) = (\vec{i}_p, \vec{j}_0)$; t – time; expressions in round and square brackets mean scalar and cross product of vectors respectively. Orths have unit length, therefore:

$$a_p^2 + b_p^2 = 1. \quad (2)$$

For radius-vectors of $p.B$ and $p.C$ apply following relations

$$\vec{r}_B = l_0 \vec{j}_0 + l_1 \vec{i}_1 = l_1 a_1 \vec{i}_0 + (l_1 b_1 + l_0) \vec{j}_0; \quad (3)$$

$$\vec{r}_C = \vec{r}_B + l_2 \vec{i}_2 = (l_1 a_1 + l_2 a_2) \vec{i}_0 + (l_1 b_1 + l_2 b_2 + l_0) \vec{j}_0. \quad (4)$$

The x_0 -coordinate of slider's $p.C$ is indicated as $s_0 = s_0(t)$ in the fixed system $Kx_0y_0z_0$. We'll define radius-vector of $p.C$ as $\vec{r}_C = s_0 \vec{i}_0$. In the inverse problem radius-vector $\vec{r}_C$ is given, and it is necessary to find the radius vector $\vec{r}_B$ and other kinematic characteristics of crank and

connecting rod, which is equal to determination of the following functions: $a_p = a_p(t)$, $b_p = b_p(t)$ ($p = 1,2$). Multiplying expression (4) for $\vec{r}_C$ scalar on $\vec{i}_0$ and $\vec{j}_0$ we get

$$\begin{cases} l_1 a_1 + l_2 a_2 = s_0; \\ l_1 b_1 + l_2 b_2 + l_0 = 0. \end{cases}$$

Adding equations (2), where $p = 1,2$, to this system of algebraic equations and accepting the following notation

$$c = \frac{s_0^2 + l_1^2 + l_0^2 - l_2^2}{2l_1},$$

we get solutions for functions: $a_p = a_p(t)$, $b_p = b_p(t)$ ($p = 1,2$)

$$\begin{aligned} a_1 &= cs_0 \pm l_0 \sqrt{s_0^2 + l_0^2 - c^2}, \\ b_1 &= \frac{-l_0 c \pm s_0 \sqrt{s_0^2 + l_0^2 - c^2}}{l_0^2 + s_0^2}, \\ a_2 &= \frac{s_0 - l_1 (cs_0 \pm l_0 \sqrt{s_0^2 + l_0^2 - c^2})}{l_2}, \\ b_2 &= \frac{-l_0 - l_1 \left(\frac{-l_0 c \pm s_0 \sqrt{s_0^2 + l_0^2 - c^2}}{l_0^2 + s_0^2} \right)}{l_2}, \end{aligned} \quad (5)$$

Sign « $\pm$ » in equations (5) shows two equivalent mirror positions of the crank relative to the line AC for every exact position of slider.

After substituting the obtained functions (5) into expressions (3) and (1), we finally find the orts $\vec{i}_p$, $\vec{j}_p$ of the moving coordinate systems and radius-vector of $p.B$ $\vec{r}_B$ as functions of time. Direct time differentiation of the radius vector $\vec{r}_B$ enables to find the absolute speed and acceleration of $p.B$. Obviously, knowing the relations (5) and (1), it is possible to determine the radius-vector of any point of the mechanism, its absolute speed and acceleration.

In addition, expressions for the vectors of angular velocity $\vec{\omega}_p$ and angular acceleration $\vec{\varepsilon}_p$ of the links of the mechanism can be obtained in the form [1]

$$\vec{\omega}_p = (\dot{\vec{i}}_p, \dot{\vec{j}}_p) \vec{k}_p, \quad \vec{\varepsilon}_p = ((\ddot{\vec{i}}_p, \ddot{\vec{j}}_p) + (\dot{\vec{i}}_p, \dot{\vec{j}}_p)) \vec{k}_p \quad (p = 1,2),$$

where values with a dot, as usual, mean the time derivative. Differentiating equation (1) by time and substituting them into the last ratios, we find

$$\vec{\omega}_p = (a_p \dot{b}_p - \dot{a}_p b_p) \vec{k}_p, \quad \vec{\varepsilon}_p = (a_p \ddot{b}_p - \ddot{a}_p b_p) \vec{k}_2.$$

Conclusion. A kinematic study of the crank-slider mechanism was carried out using vector algebra methods for a given movement of the slider. It is shown how to obtain analytical expressions for radius-vectors, velocities and accelerations of points of the mechanism, vectors of angular velocity and angular acceleration of the crank and connecting rod.

References

- [1] M. A. Pavlovskyi, Theoretical Mechanics, Kyiv: Technika, 2002. [in Ukrainian]
- [2] O. P. Zakhovaiko, Theory of mechanisms and machines, Kyiv: NTUU "KPI", 2010. [in Ukrainian]
- [3] Ya. T. Kinytskyi, Theory of mechanisms and machines, Kyiv: Naukova dumka, 2002. [in Ukrainian]
- [4] M. O. Honchar, Theory of Mechanisms and Machines, Kyiv: Vinnychenko Publishing House, 2011. [in Ukrainian]
- [5] K. O. Duchenko and K. G. Khoroshev, "Kinematic study of a crank-slider mechanism using vector algebra methods," Youth Innovations in Mechanical Engineering, No. 3, p. 455-460, 2021. [in Ukrainian]

INFLUENCE OF INTERFACIAL SPIN-ORBIT EFFECTS ON MAGNETO-OPTIC-KERR-EFFECT IN MAGNETIC/NONMAGNETIC HETEROSTRUCTURES

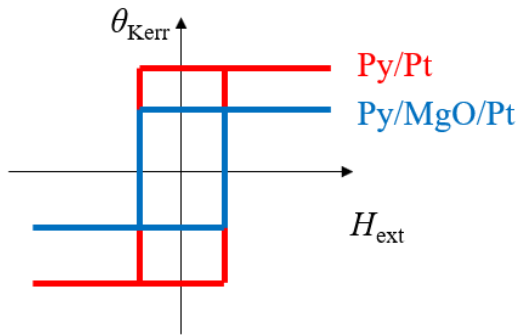
Kononenko I.M. researcher

*Institute of Applied Physics National Academy of Sciences of Ukraine, Sumy, Ukraine
JGU Institut für Physik, Mainz, Germany*

MOKE is often considered as a unique property of only magnetic materials. But MOKE is a result of ferromagnetism and spin-orbit coupling. Nonmagnetic materials can produce spin-orbit coupling.

While magnetism stems from magnetic materials, spin-orbit coupling can be induced from a nonmagnetic material through interface.

It's been known that interface spin-orbit coupling can lead to new types of magnetic transport phenomena, such as spin Hall magnetoresistance. MOKE is an optic analogue of the anomalous Hall effect. Therefore, we expect the MOKE response can also be tuned through interface spin-orbit coupling [1].



Can Nonmagnetic material influence the MOKE response of a neighbouring magnetic material through interface spin-orbit interaction?

The MOKE signal varies depending on if the ferromagnet is in direct contact with a ferromagnet.

Addition of MgO changes optical path (may not be a concern since MgO is transparent and the thickness is much shorter than wavelength).

Fig. 1. Schematic representation of hysteresis with an additional MgO layer

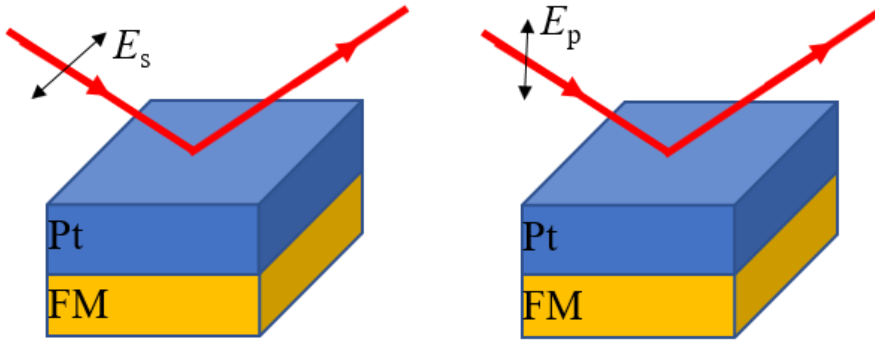


Fig. 2. Experimental geometry for s-polarized and p polarized light

Platinum (Pt) metal, being nonmagnetic and with a strong spin-orbit coupling interaction, has been central in detecting the pure spin current and establishing most of the recent spin-based phenomena [2]. Propagation matrix method is needed to model the bilayer. The interface shall have its own Kerr coefficient different from the bulk. Such variation may depend on the incident light polarization. MOKE responses from s- and p- polarized lights are different anyway.

Sample Characterization: The investigated material are IK292_Ti(2)NiFe(2)MgO(3)Pt(3), IK293_Ti(2)NiFe(2)Pt(3), IK294_Ti(2)NiFe(2)Pt(3)MgO(3), IK_295_Ti(2)NiFe(2)Al(3)MgO(3), IK296_Ti(2)NiFe(2)MgO(3)Al(3)MgO(3), IK297_Ti(2)NiFe(2)Al(3)Pt(3), IK298_Ti(2)NiFe(2)Al(3)MgO(3)Pt(3)

multilayer stack with layer thicknesses given in nanometers in the parentheses. The piece of $10 \times 10 \text{ mm}^2$ size is deposited with a Singulus Rotaris magnetron sputtering tool at a base pressure of 3×10^{-8} mbar. Thereby, the layer thicknesses are reproducible with an accuracy of better than

0.01 nm. Deposition and measurements samples were made on the equipment at the JGU Institut für Physik, Mainz, Germany [3].

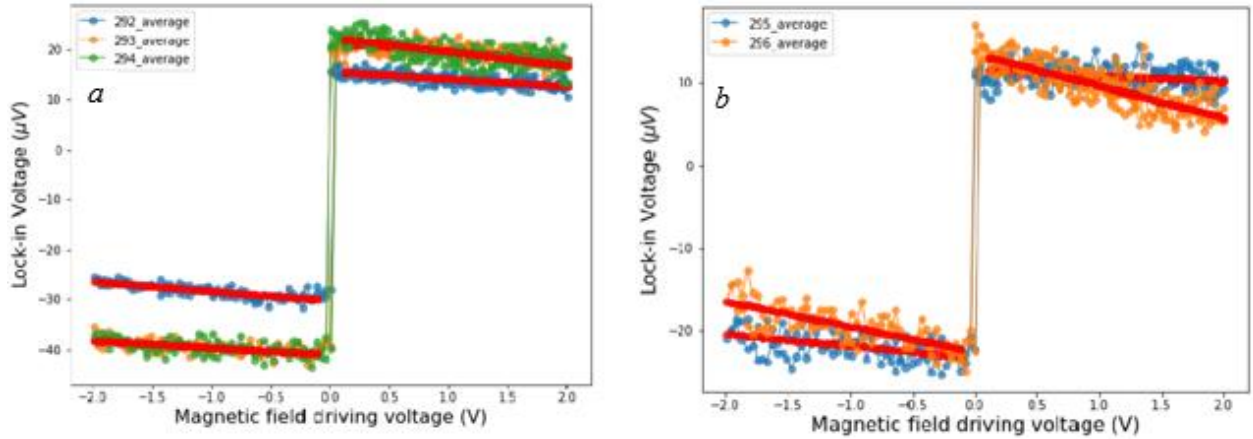


Fig. 3. *a*) Influence of interface on MOKE from heavy metal; *b*) Influence of interface on MOKE from light metal

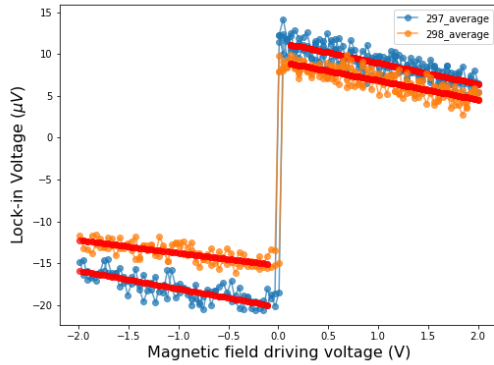


Fig. 4. Nonlocal spin-orbit coupling

In this comparison, IK297 and IK298 have exactly the same interfaces for NiFe. Therefore, we do not expect any difference from the proximity effect or dead layers. Yet we still observe a difference in MOKE signal. It suggests that the interface *Spin-orbit* interaction may influence the MOKE in a non-local way.

In this experiment not only we see interfacial influence on MOKE from Pt, but also we see a possible nonlocal influence.

References

- [1] X Fan, J Wu, Y Chen, MJ Jerry, H Zhang, JQ Xiao (2013). Observation of the nonlocal spin-orbital effective field - Nature communications.
- [2] S. Y. Huang, X. Fan, D. Qu, Y. P. Chen, W. G. Wang, J. Wu, T. Y. Chen, J. Q. Xiao, and C. L. Chien (2012). Transport Magnetic Proximity Effects in Platinum Phys. Rev. Lett. 109, 107204 – Published 7 September 2012.
- [3] I Kononenko, O Farago, P Virnau, M Kläui, R Gruber, MA Brems, J Rothörl, T Sparmann, M Schmitt (2023). 300 Times Increased Diffusive Skyrmion Dynamics and Enhanced Stability by Periodic Field Excitation - Advanced Materials, 2023.

RADIUS-INDEPENDENT PLATEAU FORMATION ON ACCELERATING WAKEFIELD FOR ELECTRON-WITNESS-BUNCHES AND ON DECELERATING WAKEFIELD FOR DRIVER-BUNCHES IN A PLASMA

Demydenko I.V.², student; Maslov V.I.^{1,2}, DrSc, professor; Miriuk O.V.¹, student; Ovsianikov R.T.², student; Shendryk D.O.^{1,2}, student

¹Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY, Notkestraße 85, 22607 Hamburg, Germany

²V.N.Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine

The most impressive experimental results (see [1, 2]) until now in electron accelerating by a wakefield, excited in a plasma, have been achieved using capillary-generated plasma. Plasma-wakefield acceleration provides high accelerating gradients (see [1, 3, 4]), promises compact

accelerators of high-brightness and high-energy electron beams. Applications of plasma-wakefield accelerators, in particular, particle colliders (see [5]) and free-electron lasers demand low energy spread beams, their small emittance, high current of accelerated bunches, large transformer ratio and high-efficiency operation. Achievement of these requires plateau formation on both the accelerating field for witness-bunch and the decelerating fields for driver-bunches. As it is known plateau formation is possible by controlled beam loading with careful shaping current profile and beam charge selection. We will demonstrate by numerical simulation by PIC code such optimal beam loading in a linear and blowout electron-driven plasma accelerators. Beams for plasma accelerator are prepared with RF linear accelerator with high beam quality.

Problems of acceleration of positron bunches in plasma (see [6]), focusing and stable transport of electron and positron bunches in plasma (see [7]) are important.

We will demonstrate by numerical simulation ideal wakefield plasma lens (due to loading effect) for identical focusing of train of homogeneous bunches or Gaussian bunches depending on their lengths, gaps, charges for stable electron or positron beam propagation in a plasma column.

References

- [1] W. P. Leemans, A. J. Gonsalves, H. - S. Mao et al, “Multi-GeV Electron Beams from Capillary-Discharge-Guided Subpetawatt Laser Pulses in the Self-Trapping Regime” Phys. Rev. Lett., v. 113, p. 245002, 2014.
- [2] A. J. Gonsalves, K. Nakamura, J. Daniels et al, “Petawatt Laser Guiding and Electron Beam Acceleration to 8 GeV in a Laser-Heated Capillary Discharge Waveguide” Phys. Rev. Lett., v. 122, p. 084801, 2019.
- [3] I. Blumenfeld, C.E. Clayton, F. - J. Decker et al. “Energy doubling of 42 GeV electrons in a metre-scale plasma wakefield accelerator” Nature, Letters, v. 445, p. 741-744, 2007.
- [4] R. Assmann, E. Gschwendtner, K. Cassou et al, “High-gradient plasma and laser accelerators” CERN Yellow Reports: Monographs, v. 1, p. 91, 2022.
- [5] C. Benedetti, S. S. Bulanov, E. Esarey et al, “Linear collider based on laser-plasma accelerators” arXiv preprint arXiv:2203.08366. 2022.
- [6] S. Diederichs, C. Benedetti, M. Thévenet, E. Esarey, J. Osterhoff et al, “Self-stabilizing positron acceleration in a plasma column” arXiv preprint arXiv:2206. 2022. 11967.
- [7] S. Diederichs, C. Benedetti, E. Esarey, M. Thévenet, J. Osterhoff et al, “Stable electron beam propagation in a plasma column” Physics of Plasmas, v. 29 (4), p. 043101, 2022.

HIGH DEMAGNIFICATION PROBE-FORMING SYSTEMS WITH SPHERICAL ABERRATION CORRECTION FOR NUCLEAR MICROPROBE

**Ponomarev A.G., Dr.Sci, Head of department, Kolinko S.V., PhD, Researcher ,
Polozhii H.E., PhD student, Rebrov V.A., PhD, Senior Researcher**

Institute of Applied Physics National Academy of Sciences of Ukraine, Sumy, Ukraine

Improving the spatial resolution of nuclear microprobes has been a challenge for a long time. For high current mode (~ 100 pA), the resolution has remained at the level of $1\ \mu\text{m}$, and for low current mode (~ 1 fA), it has been sub-100 nm. This is due to the low demagnifications (about 100) of most microprobe setups, where the improvement of resolution is associated with a reduction of the object collimator size. This leads to a reduction of the beam current due to the low brightness of the ion sources used in electrostatic accelerators and, consequently, to the impossibility of implementing microanalysis methods.

In this context, it is worth considering a separated orthomorphic quadruplet of magnetic quadrupole lenses, which has the same demagnification in both directions. Previously, it was shown that the largest demagnification for such a quadruplet is achieved at a working distance of about 4 cm, but in this case, the chromatic and spherical aberrations increase significantly, which does not allow these systems to be implemented in experimental setups. The effect of chromatic

aberrations can be reduced by using an accelerator with a small energy spread (10^{-5}). A correlation between the energy spread and the angle of ion divergence in the beam, as a result of numerical simulation, has been shown in [1]. The influence of such a correlation on the resolution of a microprobe has been studied in [2]. In this study, an effective reduction in the momentum spread in terms of chromatic aberration $x'\delta$ and $y'\delta$ has been demonstrated. Here we consider the use of octupole correctors with full and partial compensation of spherical aberrations in probe-forming systems with high demagnifications based on a separated orthomorphic quadruplet of magnetic quadrupole lenses.

Fig. 1 shows the layout of magnetic quadrupole and octupole lenses in the probe-forming systems.

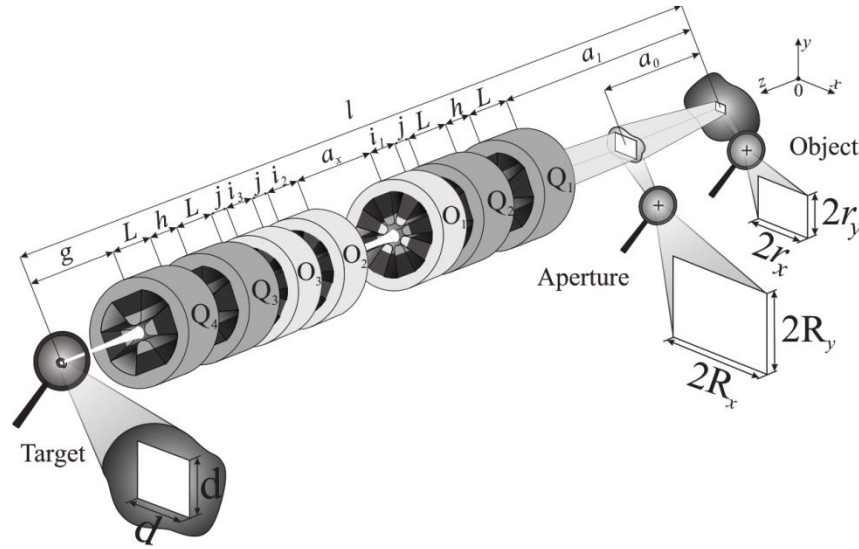


Fig. 1. Layout of magnetic quadrupole and octupole lenses in a probe-forming system with spherical aberration correction

The following realistic parameters were chosen for calculations: system length $l=964\dots973$ cm depending on the length of octupoles, $g=4$ cm, $a_0=a_1$, $a_x+a_0=800$ cm, $a_x=100\dots400$ cm, $h=4$ cm, $j=3$ cm, length of the effective field of magnetic quadrupoles $L=10$ cm, $i_1=i_2=1\dots3$ cm, $i_3=1\dots6$ cm depending on a_x to provide a realistic value of the magnetic induction at the poles of the octupoles, for all quadrupoles the aperture radius $r_{aQ}=0.65$ cm, for octupoles $r_{aO}=0.85$ cm.

For a probe-forming system with high demagnifications, a three-lens octupole corrector is shown in Fig. 1. An increase in a_x leads to an increase in aberrations, so it is necessary to increase the magnetic induction at the poles of the octupoles. To keep the induction within acceptable limits, it was necessary to increase the length of the octupole lenses. Thus, for $a_x=300$ cm, the effective lens lengths were equal to $i_1=i_2=i_3=3$ cm, while the magnetic induction at the poles with full correction of spherical aberrations was $B_{O1}=0.295121$ T, $B_{O2}=0.1614626$ T, $B_{O3}=-0.1489715$ T.

The process of microbeam formation on the target was optimized by the method of maximum reduced collimated acceptance of the probe-forming system, which is described in [3] and schematically is shown at Fig. 1. The reduced acceptance α is determined by the value of the phase volume formed by rectangular object and aperture collimators, which can be focused to a spot on a target with fixed dimensions.

The dependence of the object collimator dimension on the spot size of the focused beam on the target for some values of a_x is shown in Fig. 2, which shows that the sizes are within acceptable limits. The value of the reduced collimated acceptance as a function of the spot size is shown in Fig. 3. The beam current can be determined from the expression $I=b\alpha$, where b is the absolute brightness. This figure shows that for $b>10$ pA/ $\mu\text{m}^2\text{mrad}^2$ the beam current is acceptable for microanalysis and proton beam writing applications in the $10\dots100$ nm resolution range.

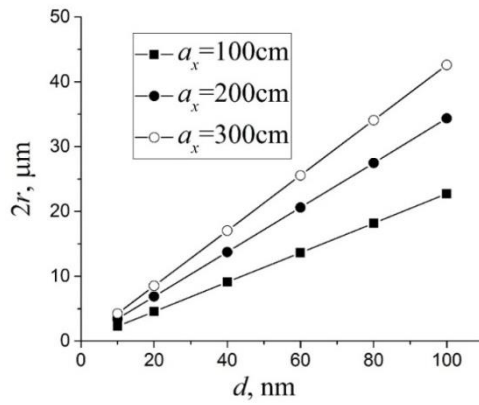


Fig. 5. Dependence of the object collimator dimension on the size of the focused beam on the target

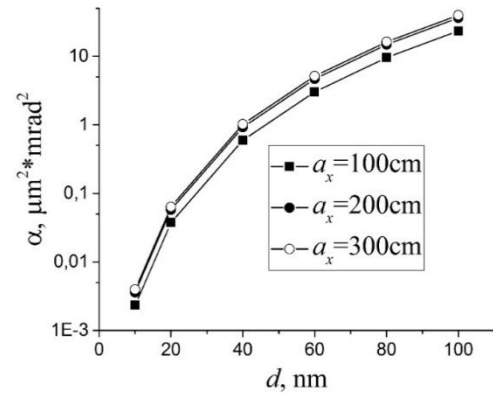


Fig. 6. Dependence of the reduced collimated acceptance on the beam size on the target

The largest aberrations in a separated orthomorphic quadruplet are $\langle x/x'^3 \rangle$ and $\langle x/x'y'^2 \rangle = \langle y/y'x'^2 \rangle$, so a variant of a two-lens octupole corrector is considered. In Fig. 1, the corrector consists of O_2 and O_3 octupoles. In this case, the dimensions of the object collimator for the size of the spot on the target in the range of 10...100 nm practically do not change compared to the option with full compensation of spherical aberrations. However, the dimensions of the aperture collimator are reduced, which leads to a decrease in the reduced collimated acceptance by an order of magnitude.

References

- [1] D.N. Jamieson, "New generation nuclear microprobe systems" Nucl. Instr. Meth. Phys. Res., Sect. B Vol. 181, p. 31–36, 2001.
- [2] A.G. Ponomarev, V.I. Miroshnichenko, V.E. Storizhko, "The Beam control in quadrupole probe-forming systems with allowance of correlation between angular distribution and energy spread of charged particles" Physics Procedia, Vol. 1, p. 99-104, 2008.
- [3] A.G. Ponomarev, A.A. Ponomarov, "Beam optics in nuclear microprobe: A review", Nucl. Instr. Meth. Phys. Res., Sect. B Vol. 497, p. 15–23, 2021.

A PULSED DC CRYOGENIC SYSTEM AS A PART OF FREIA LABORATORY

**Profatilova Iaroslava, Research Engineer; Jacewicz Marek, Researcher;
Coman Mircea-George, PhD student**

*FREIA laboratory, Department of Physics and Astronomy, Uppsala University,
Uppsala, Sweden*

An electrical breakdown phenomenon, its initiation and the methods of increasing the material strength for the electrical field is a subject of study in various research groups for the fundamental studies and industrial applications. The powerful motivation and impetus in studying field emission, breakdown probability and methods of improving material properties have been due to electrical breakdown limitation in a future accelerator CLIC (Compact Linear Collider) [1].

The cryogenic pulsed dc system was built extend the breakdown studies of the group at CERN, and help develop the theory for vacuum arcs under room temperature and cryogenic conditions. The results from cryogenic experiments [2] showed for example the reduction of BDR (breakdown rate) in a high gradient test. This was one of the motivations for the development of the Cool Copper Collider (C³) project in USA [3].

A pulsed dc cryogenic system is located in FREIA (Facility for REsearch Instrumentation and Accelerator development) laboratory in Uppsala [4,5]. FREIA was established in order to

support the development of instrumentation and accelerator technology in 2013. For the construction of cryo dc system FREIA was chosen because of an experience to design cryogenic facilities.

The electrodes configuration is the same as in pulsed dc system at CERN: parallel plate system with tens of microns gap set by spacer and 10 kV high-voltage generator based on Marx technology allowing for up to 150 MV/m field. A generator uses the same algorithm for conditioning tests as at CERN's pulsed dc system [6, 7]. The electrodes system is placed in cryostat connected to cryocooler. The configuration of the cryostat (vacuum chamber) can be found in [8].



Fig. 1. Pulsed dc cryo system in a FREIA lab in Uppsala, Sweden

The first results with copper electrodes shown up to 50% increasing of the saturated electrical field at 30 K compared to the test in room temperature [8]. Nowadays the system can reach 4 K temperature after improvement of cooling procedure. Additionally, to high-

voltage tests, the post-mortem analysis of the electrode surfaces was done and the topological difference between breakdown features at warm and cold on copper surface were found [9] and linked to the temperature and energy available for the arc during breakdown.

Nowadays the next activities ongoing at pulsed dc cryo system:

- Modification of software to implement another conditioning algorithm uses at CERN.
- Field emission measurement and analysis.
- Preparation for testing another material (niobium and titanium alloy).
- Development the method for resistivity measurement of metal surface to track down dislocations caused by surface conditioning.

References

- [1] <http://clic-study.org/>
- [2] A. D. Cahill, J. B. Rosenzweig, V. A. Dolgashev, S. G. Tantawi, and S. Weathersby, High gradient experiments with X-band cryogenic copper accelerating cavities, *Phys.Rev. Accel. Beams* 21, 102002 (2018).
- [3] S. Dasu et al, Strategy for Understanding the Higgs Physics: The Cool copper Collider (<https://doi.org/10.48550/arXiv.2203.07646>).
- [4] R. Ruber et al, Accelerator development at the FREIA Laboratory, *JINST*, 16, P07039 (2021) (<https://doi.org/10.1088/1748-0221/16/07/P07039>).
- [5] <https://www.physics.uu.se/research/freia-lab/>
- [6] I. Profatilova, X. Stragier, S. Calatroni, E. Rodriguez Castro, A. Kandrasyeu, W. Wuensch, Breakdown localisation in a pulsed DC electrode system, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Volume 953, 163079 – 2020. (<https://doi.org/10.1016/j.nima.2019.163079>)
- [7] A. Saressalo, I. Profatilova, W. L. Millar, A. Kyritsakis, S. Calatroni, W. Wuensch, F. Djurabekova, Effect of dc voltage pulsing on high-vacuum electrical breakdowns near Cu

surfaces, Physical Review Accelerators and Beams 23, 113101, – 2020.
(<https://doi.org/10.1103/PhysRevAccelBeams.23.113101>)

[8] M. Jacewicz, J. Eriksson, R. Ruber, S. Calatroni, I. Profatilova, W. Wuensch, Temperature-dependent field emission and breakdown measurements using a pulsed high-voltage cryo system, Phys. Rev. Applied 14, 061002 – 2020.
(<http://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.14.061002>)

[9] I. Profatilova, M. Jacewicz, Piotr Szaniawski, Inna Popov, Yinon Ashkenazy, Performance of electrical vacuum breakdown under cryogenic temperatures // 10th International Workshop on Mechanisms of Vacuum Arcs, September 18-22, 2022, Chania, Crete, Greece.
(<https://indico.cern.ch/event/1099613/contributions/4969654/>).

МОДЕЛЮВАННЯ ДИФУЗІЇ ПРЕЦИПІТАТІВ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ РІВНЯННЯ ЛАНЖЕВЕНА ТА ТЕХНОЛОГІЇ ПАРАЛЕЛЬНИХ ОБЧИСЛЕНЬ

Алексенко О. В., к.ф.-м.н.

Інститут прикладної фізики НАН України, Суми, Україна

Робота різних конструкцій ядерних енергетичних установок здійснюється в умовах опромінення та супроводжується зміною теплофізичних, пружних та міцнісних характеристик конструкційних матеріалів. У зв'язку з цим виникає необхідність вивчати взаємодію радіаційного випромінювання з металами та сплавами, яка призводить до утворення вакансійних та міжвузельних дефектів і може спричинити руйнування конструкційних матеріалів.

Зауважимо, що сенс моделювання полягає у заміні вихідного об'єкта його математичною моделлю. Ця математична модель має бути побудована на основі фізичних законів, яким підпорядковується необхідний нам процес або явище. При цьому математичне моделювання сьогодні важко уявити без сучасних комп'ютерних технологій, зокрема, паралельних обчислень.

У даній роботі проведено комп'ютерне моделювання руху точкових дефектів з метою визначення їх коефіцієнта дифузії. Для опису відповідного стохастичного процесу розглянуто рівняння Ланжевена, яке моделює рух дефекту в зовнішньому потенціалі під дією броунівського шуму. У випадку з адитивним шумом найпростіше рівняння Ланжевена має вигляд [1]:

$$m \cdot \frac{d\vec{v}}{dt} = -\gamma \vec{v}(t) + \vec{f}(t) \quad (1)$$

де m – ефективна маса дефекту, $\vec{v}(t)$ – швидкість міграції дефекту, γ – коефіцієнт дисипативного тертя, $\vec{f}(t)$ – випадкова теплова сила (шум), яка діє на дефект.

У найпростішому одновимірному випадку схема скінчених різниць для виразу (1) набуває вигляду:

$$v_k = v_{k-1} - \frac{\gamma}{m} v_{k-1} \Delta t + \sqrt{\Delta t} z_{k-1}, \quad r_k = v_k \Delta t. \quad (2)$$

У формулі (2) величина z_{k-1} – це випадкове число, яке розподілено за нормальним законом із нульовим середнім значенням, а r_k – переміщення дефекту за один крок моделювання Δt . Числовий розв'язок рівняння Ланжевена (2) здійснено із використанням технології паралельних обчислень CUDA.

Тоді для розрахунку коефіцієнта дифузії використано відому формулу Ейнштейна:

$$D(t) = \frac{\langle R^2(t) \rangle}{2t}, \quad (3)$$

де t – загальний час руху, $\langle R^2(t) \rangle = \frac{1}{n} \sum_i R_i^2(t)$ – дисперсія для масиву дефектів і $R_i^2(t) = (\sum_j r_j)^2$ – квадрат переміщення j -го дефекту.

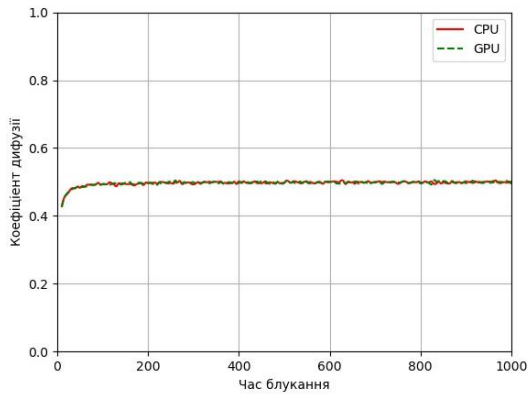


Рисунок 1. Коефіцієнт дифузії в залежності від часу руху дефектів для $\gamma=1.0$. Кількість реалізацій 100000.

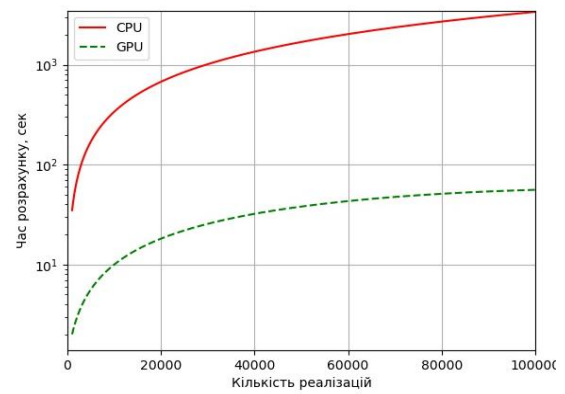


Рисунок 2. Порівняння швидкості розрахунку.

Отримано наступні результати. На рис. 1 представлено залежність коефіцієнту дифузії від часу руху дефектів, динаміка яких описується рівнянням Ланжевена (1) з броунівським шумом. Графік побудовано для параметрів $\gamma = 1.0$, $m = 1$ і середньоквадратичному відхиленню рівному 1. Графік коефіцієнту дифузії прямує до константи. Тут червоним кольором зображена залежність, що обчислена за допомогою алгоритму, для якого розрахунок відбувається на центральному процесорі (CPU) (розрахунковий час – 11 годин). Зеленим кольором показано залежність, що обчислена за допомогою графічного процесора (GPU) (розрахунковий час – 10 хвилин). Таким чином, маємо достатньо високу швидкість розрахунку на GPU. На рис. 2 представлено порівняння результатів моделювання для CPU і GPU. Як можна побачити, використання GPU дає значний вигравш у швидкості розрахунків, який є все більшим при збільшенні кількості врахованих точкових дефектів [тобто реалізацій процесу (1)].

Як результат, із використанням технології паралельних обчислень CUDA розроблено програмний код для розв'язку широкого класу стохастичних диференціальних рівнянь. Розв'язано окремий випадок такого рівняння. Проведено дослідження поведінки коефіцієнту дифузії від часу руху дефектів та параметрів моделі. Здійснено порівняння продуктивності розрахунків на GPU (з використанням паралельних обчислень) та CPU (без паралельних обчислень) та показано ефективність застосованого методу паралельних обчислень. Напрацьований матеріал буде застосовано для вирішення задач радіаційного матеріалознавства.

Список використаних джерел

[1] Dudarev S. L. The non-Arrhenius migration of interstitial defects in bcc transition metals. *C. R. Physique*. 2008. No. 9. P 409 – 417.

ЧИСЕЛЬНИЙ МЕТОД РОЗРАХУНКУ МЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ ПІД ДІЄЮ ВІБРАЦІЙНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

**Бабенко А.Є., д.т.н., проф., Боронко О. О. д.т.н., проф., Трубацев С. І. к.т.н., доц.,
Лавренко Я.І. к.т.н., доц.**

*НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
м. Київ, Україна*

Механічні системи машинобудування моделюються стержнями і стержневими системами, масивними тілами, пластинами та просторовими пластинчато-оболонковими

конструкціями в різноманітних комбінаціях. У процесі експлуатації такі конструкції, як правило, зазнають інтенсивних вібраційних навантажень, тому розрахунок механічних систем під дією вібраційних навантажень є актуальна задача. Як відомо, що аналітичні методи розрахунку коливань складних машинобудівних конструкцій, не завжди є ефективними, тому необхідно розвивати універсальні чисельні методи для розрахунку прикладних задач, які б дозволили визначити оптимальні параметри елементів конструкцій які знаходяться під дією інтенсивних вібраційних навантажень.

В роботі пропонується метод визначення власних частот та власних форм коливань елементів машинобудівних конструкцій, який базується на мінімізації побудованих функціоналів методом покоординатного спуску [1,2]. Використання методу покоординатного спуску дозволяє уникнути проблем, що пов'язані з формуванням, зберіганням та оперуванням з глобальними матрицями жорсткості та мас. Це дає можливість розв'язувати задачі великої розмірності використовуючи тільки оперативну пам'ять ПСОМ. Ефективне використання методу покоординатного спуску залежить від швидкості сходимості ітераційного процесу. Для прискорення сходимості ітераційного процесу можливо використання методу неповної релаксації.

Нехай $\vec{v}^k = (v_1^k, \dots, v_N^k)$ вектор вузлових переміщень в 'поточному' наближенні, тоді наступні наближення будуть у вигляді:

$$\vec{v}^{k+1} = \vec{v}^k + \beta \lambda_i^{k+1} \vec{e}_i, \quad i=1, \dots, N, \quad (1)$$

де $\vec{e}_i$ - одиничний вектор в напрямленні v_i^k , λ_i^{k+1} - крок, β - параметр релаксації. При чисельних розрахунках ітераційний процес продовжується до тих пір, поки відношення $\|\vec{\lambda}^k\| / \|\vec{v}^k\|$ не стане менше деякого, наперед заданого числа $\epsilon > 0$. Вибір якого виконується так, щоб похибка ітераційного процесу була приблизно рівна похибці апроксимації переміщень $O(h^s)$. Таким чином прийнятий критерій зупинки ітераційного процесу записується наступним чином:

$$\frac{\|\vec{\lambda}^k\|}{\|\vec{v}^k\|} < \epsilon \quad (2)$$

де $\|\vec{\lambda}^k\|, \|\vec{v}^k\|$ - норми векторів прирістів та переміщень на k-й ітерації.

Так як власні форми коливань повинні задовільняти граничним умовам, то приходимо до задачі мінімізації відношення типу Релея-Ритца з обмеженнями. В багатьох випадках переміщення задаються у вигляді фіксованих величин на частини границі. Підставляючи їх у функціонал, получимо задачу мінімізації без обмежень на просторі меншої розмірності. Метод є стійким відносно обчислювальних помилок, які обумовлені точністю обчислювання ЕОМ, та має наступні переваги: не потребує формування матриць інерції та жорсткості та оперування з ними, потребує мінімальної кількості ітерацій. Для врахування частотно-залежного (в'язкого) тертя використовувалась відповідна гіпотеза Кельвіна – Фойхта.

Отримані власні частоти та власні форми коливань використовувались при розгляді вимушених коливань. На основі запропонованого методу було розроблено алгоритми та пакети прикладних програм (ППП).

З огляду на те, що PPP побудовано за модульним принципом, це дозволяє вдосконалювати його структуру за допомогою сервісних програм, а також видозмінювати та додатково розробляти програми для нових задач. Для роботи PPP необхідні вхідні дані щодо задачі, що розв'язується. Ці дані можна об'єднати у такі основні групи, як : інформація про топологію області; інформація про тип задачі; інформація про фізичні параметри конструкції; інформація про кінематичні граничні умови та навантаження.

PPP було налагоджено та удосконалено на великій кількості тестових та прикладних задач різної складності. Чисельні результати порівняно з результатами,

отриманими аналітичними або іншими чисельними методами, а також із відповідними експериментальними даними. Похибка у визначенні власних частот не перевищувала 5%.

Отримані в роботі результати стали теоретичною основою інженерного методу розрахунку вимушених коливань машинобудівних конструкцій, а також оптимізації вибору їх конструктивних параметрів під дією вібраційних навантажень. Запропонований метод та його реалізація у вигляді автоматизованій системі розрахунку отримали впровадження в інженерну практику.

Список використаних джерел

- [1]. Бабенко А. Е. Определение частотного спектра и собственных форм колебаний упругих систем методом повышения жесткостей // А. Е. Бабенко, О. А. Боронко, О.Н. Василенко, С. И. Трубочев / Проблемы прочности. – 1990. – № 2 – с. 122-124.
- [2]. Бабенко А. Е. Применение и развитие метода покоординатного спуска в задачах определения напряженно-деформированного состояния при статических и вибрационных нагрузках // А. Е. Бабенко, Н. И. Бобырь, С. Л. Бойко, О. А. Боронко / – К.: Инрес, 2005. – 264 с.

ДОСЛІДЖЕННЯ СТАТИСТИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ НАДПОВІЛЬНИХ ПОЛЬОТІВ ЛЕВІ В РЕЖИМІ РІДКІСНИХ ФЛУКТУАЦІЙ

***Бистрик Ю.С., к.ф.-м.н., зав. лаб.; Денисов С.І., д.ф.-м.н., пров. н.с.
Інститут прикладної фізики НАН України, Суми, Україна***

Одним з найбільш дієвих методів вивчення процесів з аномальною поведінкою є теорія неперервних у часі випадкових блукань, фундамент якої було закладено у 1965 році Е. Монтроллом і Дж. Вейссом [1]. Ця теорія відкрила шлях для опису та аналізу процесів, у яких інтервали часу між послідовними подіями та величини переходів системи між її станами є флуктуючими. Зокрема, неперервні у часі випадкові блукання успішно використовуються для дослідження аномальної дифузії та переносу речовини в неупорядкованих середовищах, вивчення процесів міграції біологічних організмів та руху робототехніки, аналізу фінансових та сейсмічних даних тощо.

У статтях [2, 3] досліджено асимптотичну у часі поведінку польотів Леві з надповільною еволюцією у режимі типових флуктуацій. Зазначений процес моделювався, виходячи із концепції неперервних у часі випадкових блукань, що характеризуються важкими густинами ймовірності величин стрибків процесу та надважкими густинами ймовірності часів очікування між ними. Основною особливістю таких систем є той факт, що вони можуть здійснювати довгі стрибки, а їх еволюція характеризується функціями часу, що є набагато повільнішими, ніж степеневі. З-поміж іншого в цих роботах показано, що граничні густини ймовірності (залежно від параметрів розподілів довжин стрибків випадкових блукань) будуть мати хоча б одну гілку з важким хвостом або задаватися одно/двосторонніми експоненціальними функціями.

Однак відомо, що при великих значеннях часу для аномальних процесів характерним є існування декількох скейлінгових функцій для густини ймовірності положення процесу [4]. Як результат, на різних просторових масштабах поведінка густини ймовірності буде описуватися відмінним чином. Зокрема, виділяють центральну область типових флуктуацій процесу та хвостову область рідкісних флуктуацій. У деяких випадках в першому наближенні властивості процесу у цих двох областях будуть співпадати, але інколи вони суттєво відрізняються.

У даній роботі процес надповільних польотів Леві, який досліджено у статтях [2, 3], проаналізовано на просторових масштабах, що відповідають режиму рідкісних флуктуацій. Показано, що у такому режимі розподіли оригінальних (немасштабованих) польотів Леві

завжди матимуть важкі гілки з хвостовим індексом, який рівний мінімальному хвостовому індексу відповідної густини ймовірності довжин стрибків випадкових блукань. Таким чином, зазначений процес при будь-яких значеннях часу буде характеризуватися нескінченною дисперсією, яка є наслідком ненульової ймовірності випадкових блукань здійснювати довгі стрибки. Отримані результати доповнюють та розширюють знання про надповільні польоти Леві, представлені в роботах [2, 3], та можуть бути корисними для моделювання та прогнозування поведінки широкого кола систем із аномально повільною еволюцією.

Список використаних джерел

- [1] E.W. Montroll, G.H. Weiss. Random Walks on Lattices. II, J. Math. Phys., Vol. 6, no. 2, P. 167–181 (1965).
- [2] S.I. Denisov, S.B. Yuste, Yu.S. Bystrik, H. Kantz, K. Lindenberg. Asymptotic solutions of decoupled continuous-time random walks with superheavy-tailed waiting time and heavy-tailed jump length distributions, Phys. Rev. E, Vol. 84, no. 6, P. 061143 (2011).
- [3] S.I. Denisov, Yu.S. Bystrik, H. Kantz. Limiting distributions of continuous-time random walks with superheavy-tailed waiting times, Phys. Rev. E, Vol. 87, no. 2, P. 022117 (2013).
- [4] I. Fouxon, S. Denisov, V. Zaburdaev, E. Barkai. Limit theorems for Lévy walks in d dimensions: rare and bulk fluctuations, J. Phys. A, Vol. 50, no. 15, P. 154002 (2017).

ВПЛИВ ОПРОМІНЕННЯ І НАСИЧЕННЯ ВАКАНСІЯМИ НА ФАЗОВУ СТАБІЛЬНІСТЬ НАНОЧАСТИНОК ЗАЛІЗА

***Білогородський Ю. С., м.н.с.; Шірінян А. С., д.ф.-м.н, доц., зав.лаб.; Кріт О. М., к.ф.-
м.н, н.с.***

Інститут прикладної фізики НАН України, Суми, Україна

Металеві наночастинки з діаметром в діапазоні 1–100 нм в інертному середовищі можна вважати високо дисперсними композитними матеріалами (ВДКМ). ВДКМ можуть використовуватися в умовах високих температур та опромінення і є перспективними матеріалами для ядерних реакторів нового покоління, захисту військових, населення та об'єктів критичної інфраструктури в умовах як механічного, так і радіаційного ураження. В умовах експлуатації такі ВДКМ піддаються ризикам накопичення вакансійних дефектів, розбухання, аморфізації та іншим фазовим перетворенням. Незважаючи на прикладний інтерес, поведінка наночастинок при опроміненні та їх особливості далеко не вивчені. Експериментальні результати щодо впливу опромінення на фазову стабільність ВДКМ є неоднозначними. Бракує теоретичних описів і особливо термодинамічних розрахунків, які б могли пояснити поведінку в умовах опромінення.

Аналіз свідчить про те, що існує конкуренція між енергетичними факторами, що впливають на стабільність фази та фазові перетворення в ВДКМ під час опромінення: (і) об'ємний термодинамічний стимул для зміни фаз, (ii) внесок поверхневої енергії, (iii) границя фаз є як сток радіаційних дефектів, (iv) накопичення дефектів (насичення вакансій) у матеріалі як рушійна сила змін фази, (v) бар'єр зародкоутворення нової фази.

Метою дослідження є розробка нового фундаментального підходу на основі термодинаміки Гіббса та визначення впливу дисперсності порошку, поверхневих енергій, насичення вакансіями на радіаційну стійкість і фазові зміни сферичних наночастинок на прикладі наномасштабного Fe при високих та низьких температурах експлуатації. Залізо з

наявністю декількох поліморфних змін (при яких можливе як зменшення так і збільшення поверхневого натягу після перетворення), є зручною системою для аналізу термодинаміки, для якої ми знаємо всі параметри розрахунків. Саме сферична нанорозмірна частинка Fe в інертному середовищі була нами обрана як модельна система ВДКМ.

Наше дослідження виявляє можливість поліморфного переходу при опроміненні та існування зон радіаційної стабільності наночастинок Fe [1, с. 125].

Для переходу $\alpha\text{-Fe} \rightarrow \gamma\text{-Fe}$ при невисоких температурах нижче 800-1200K виявлено три області фазової стабільності. Так для температури 800K отримано: область з розмірами менше 2нм, де перехід до нового фазового стану можливий навіть без опромінення через відносно великий вклад поверхневої енергії частинки; область з розмірами від 2 нм до 6 нм, де $\alpha\text{-Fe}$ частинка є фазово стабільною і опромінення не дає фазового перетворення; область з розмірами більше 6 нм, де фазове перетворення $\alpha\text{-Fe} \rightarrow \gamma\text{-Fe}$ може відбуватися лише за рахунок опромінення.

Для переходу $\gamma\text{-Fe} \rightarrow \alpha\text{-Fe}$ при високих температурах вище 1200K ми отримуємо на діаграмі енергія – розмір лише дві зони фазової стабільності: у зоні стабільності фази з розмірами наночастинок до 5 нм $\gamma\text{-Fe}$ частинки фазового переходу не можуть зазнавати, у наночастинках $\gamma\text{-Fe}$ більше 5 нм перетворення до фази $\alpha\text{-Fe}$ може відбуватися лише через опромінення.

Показано, що збільшення дози опромінення призводить до зменшення ширини зони стабільності та збільшення ширини зони нестабільності для обох випадків.

Врахування зародкоутворення і енергетичного бар'єру нуклеації показує можливість метастабільних двофазних конфігурацій, фазовий перехід під опроміненням може бути заборонений навіть за умов енергетичної вигоди через дуже високе значення енергетичного бар'єру нуклеації. У рамках відповідного узагальнення, на діаграмі фазової стабільності розмір-температура отримуються дві області та 4 підобласті: (i) зона стабільної початкової фази, коли заборонена фазова трансформація та (ii) зона нестабільної фазової частинки, коли відповідно до високого бар'єру зародкоутворення такий перехід може бути заборонений або, навпаки, коли через невеликий бар'єр зародження, це найпростіший спосіб для фазової трансформації.

Роботу виконано в рамках НДР і напряму досліджень лабораторії композитних матеріалів атомно-водневої енергетики ІПФ НАНУ.

Список використаних джерел

[1] А. С. Шірінян, Ю. С. Білогородський, О. М. Кріт, «Фазова стабільність сферичних наночастинок заліза під радіаційним насиченням вакансіями» Ядерна фізика та енергетика, т. 23, № 4, с. 255–262, 2022

ВИКОРИСТАННЯ СМАРТФОНА У НАВЧАЛЬНОМУ ЕКСПЕРИМЕНТІ З ФІЗИКИ

Бондар М.Ю., магістрант; Салтикова А.І., к.ф.-м.н., доцент

Сумський державний педагогічний університет імені А. С. Макаренка, Суми, Україна

На сьогодні не можна уявити своє життя без мобільного телефону. Сучасні підлітки використовують смартфони як засіб спілкування у соціальних мережах, для пошуку інформації в мережі інтернету, перегляду фільмів та прослуховування музики тощо. З кожним роком можливості смартфонів розширюються. Тому актуальним є їх використання в освітньому процесі, а отже, розробка відповідних методик щодо застосування

можливостей цих пристроїв. У навчанні фізики особливе місце займає експеримент, що є відображенням фізики як науки, яка базується на експериментальних дослідженнях. На сьогодні можна виділити два шляхи застосування смартфонів у навчальному експерименті з фізики. Перший полягає у використанні вбудованих сенсорів для фізичних вимірювань, другий - у використанні спеціальних додатків для перегляду та створення власних експериментів. Більшість сучасних гаджетів оснащені датчиками освітленості, наближення, магнітного поля, температури, акселерометром тощо. Дані з них опрацьовуються мікросхемою або мікроконтролером та забезпечують нормальне функціонування пристрою. Наявність датчиків у смартфоні не робить його засобом вимірювання фізичних величин, оскільки вони налаштовані на інше цільове призначення, яке визначене виробником. Для їх використання у якості фізичного приладу на смартфон треба установити спеціальне програмне забезпечення. Такі можливості надає, наприклад, застосунок Науковий журнал (Google Science Journal). Він робить можливим використання сенсорів смартфона для проведення фізичних вимірювань. Методичні аспекти застосування цього мобільного додатку на уроках фізики детально розглянуті в роботі [1]. Автори пропонують два підходи до виконання фронтальної лабораторної роботи «Визначення періоду коливань математичного маятника». Перший – традиційний з застосуванням лабораторного обладнання, а другий — із застосуванням мобільного додатку Google Science Journal. У цьому випадку смартфон стає засобом вимірювання фізичних величин. Слід зауважити, що використання датчиків пов'язують із робототехнікою, що є одним із засобів STEM-освіти.

Цікавою, на наш погляд, є програма Physical Phone Experiments (Phyphox) – це дуже зручний додаток, який містить у собі вимірювання за допомогою усіх датчиків смартфона (акселерометр, магнітометр, гіроскоп, люксметр, безконтактний датчик GPS) та легкий у передачі файлів. Його розробили в Німеччині, в Рейнсько-Вестфальському технічному університеті Ахена. Додаток відрізняється гарним інтерфейсом та якісно знятими відео експериментів. Сильною стороною проекту є методичні посібники і навіть друковані роздаткові матеріали. Автори готові співпрацювати з вчителями фізики з усього світу, і кожен бажаючий може зробити свій внесок у переклад матеріалів.

Отже, використання смартфона, як вимірювального приладу для постановки експерименту, розширює можливості шкільної фізичної лабораторії та активізує пізнавальну діяльність учнів, особливо в умовах дистанційної освіти.

Список використаних джерел

[1] Терещук С.І. Колмакова В.О. Використання давачів мобільних пристроїв для проведення фізичного експерименту. Електронне наукове фахове видання “Відкрите освітнє е-середовище сучасного університету”, 2019.Сторінки 345-354

ІНФРАЧЕРВОНА СПЕКТРОМЕТРІЯ ВОЛОГОЇ ДЕРЕВИНИ АРХЕОЛОГІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ

Бугай О.¹, к.ф.-м.н., Пихова О.², асп.

¹ *Інститут прикладної фізики НАН України, Суми, Україна*

² *Ніжинський державний університет імені Миколи Гоголя, Ніжин, Україна*

Для збереження археологічних дерев'яних об'єктів, що знаходились у зволоженому гумусованому середовищі, необхідне проведення консерваційних заходів, протоколи яких підбираються з огляду на стан збереженості деревини. Будь-яка зміна фізико-хімічних умов призводить до пришвидшення деградації деревини внаслідок різних факторів, що може завершитись повною втратою об'єкту. При археологічних розкопках на Поштовій площі (м. Київ) були знайдені дерев'яні об'єкти, частина яких представляють собою історичну

цінність і можуть бути музеєфіковані Метою роботи є дослідження методом інфрачервоної (ІЧ) спектроскопії з перетворенням Фур'є вологої деревини археологічних об'єктів з Поштової площі для планування схеми її консервації.

Методом інфрачервоної спектроскопії з перетворенням Фур'є оцінювалися ступінь деградації деревини (показник, критично важливий для підбору методики консервації), а також її порода. Для опису структури целюлози та ступеню деформації використовують низку специфічних індексів: HBI, TCI, LOI.

HBI – інтенсивність водневих зв'язків. Цей індекс обчислюється як співвідношення інтенсивностей піків 3400-3000 та 1320-1310 cm^{-1} . Цей індекс пов'язаний із кристалічною системою молекул целюлози. Показник збільшується при збільшенні вологості целюлози. Тобто свідчить про утворення водневих зв'язків у системі целюлоза-вода. Крім того, збільшення значення цього індексу може свідчити про розрив структури целюлози.

TCI – загальний кристалічний індекс. Визначається як співвідношення між піками 1370 та 2900-2890 cm^{-1} . Цей індекс виражає ступінь кристалічності целюлози, тобто її цілісності. При збільшенні вологості целюлози, значення цього індексу зменшується, відбувається розрив структури.

LOI – індекс бічного порядку. Співвідношення між 1430-1420 та 897 cm^{-1} . При збільшенні вологості деревини, значення цього індексу зазнає невеликого збільшення.

Визначення приналежності деревини до листяної чи хвойної породи ґрунтується на відмінностях у хімічному складі. При аналізі спектрів деревини виділяють основні піки компонентів деревини – целюлоза, геміцелюлоза та лігнін, хімічний склад яких залежить від породи та виду рослини. Кількісно для деревини листяних порід характерний вміст лігніну на рівні 18-24%, для хвойних порід – 23-50%. Крім різниці концентрацій лігніну, для листяних та хвойних порід характерна різна хімічна будова лігніну, що слугує одним із маркерів для спектроскопічного визначення приналежності деревини до листяної чи хвойної породи.

Наприклад, лігнін листяних дерев за структурою є гваяцилсирінгил-лігніном. Складається із ланок, похідних від коніферилового спирту та синапілового спирту. У лігніні хвойних порід виділяють гваяциллігнін, 95% такої структури складаються із хвойного спирту коніферилу, 5 % із залишків н-кумарилового спирту, різниця якого відображається на отриманих FTIR спектрах. Так, для ідентифікації породи деревини використовують дані у п'яти характеристичних областях спектра: 1665–1593 cm^{-1} , 1515–1505 cm^{-1} , 1270–1220 cm^{-1} , та 815–805 cm^{-1} .

Аналіз ІЧ спектрів вологої деревини показали, що найвищий ступінь структурної цілісності деревини та найнижчий вміст вологи має деревина з об'єктів візуально схожих на палі укріплення берегу струмка. Деревина з об'єкту візуально схожого на паркан за результатами обчислень індексів кристалічності, та впорядкованості, має найвищий ступінь деградації целюлозних волокон. Визначено, що зразки «Короб», «Паркан» та «Струмок» виготовлені із деревини листяних порід, а зразок «Зруб» – із хвойних.

Ще одним показником, важливим перш за все для визначення підходів щодо збереження вологої деревини перед її консервацією, є вологість. Вологість деревини визначалася сушильно-ваговим методом.

Виходячи з результатів, може бути запропонована схему консервації вологої деревини з Поштової площі шляхом просочування поліетиленгліколем.

ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ІОННОГО ДЖЕРЕЛА З ЕЛЕКТРОННИМ УДАРОМ

Возний В. І., к.ф.-м.н., с.н.с.; Пономарьов О. Г., д.ф.-м.н., професор;

Москаленко В. Б., гол. інж. КУ

Інститут прикладної фізики НАН України, Суми, Україна

Іонні джерела з електронним ударом характеризуються малим енергетичним розкидом порядку одиниць еВ [1-3]. Це робить розробку таких джерел перспективним для застосування в компактному іонному мікрозонді [4], проектування якого ведеться в Інституті прикладної фізики НАН України.

Характерні параметри джерела [5]: струм пучка іонів водню – до 1 нА, енергія пучка – 4 кеВ, струм електронної емісії – 240 мкА, робочий тиск газу – $1 \cdot 10^{-3}$ Па. Струм катода-1,9 А, енергія електронного пучка – 100 еВ.

У доповіді наведено результати вимірювання параметрів іонного джерела за різних режимів роботи.

Для вимірювання енергетичного розкиду іонного пучка застосовувався сітковий енергоаналізатор. Вимірювання проводилися методом затримуючого потенціалу [6, 7]. Принцип дії сіткового енергоаналізатора показано на рис. 1. Енергоаналізатор складається з трьох плоских паралельних сіток із прозорістю 80%. Відстань між сітками 2 мм. Перша та третя сітки знаходяться під нульовим потенціалом. На середню сітку подається позитивний затримуючий потенціал відносно напруги, що прискорює пучок. Енергоаналіз іонів пучка проводиться шляхом зміни напруги, що затримує, в діапазоні 0-20 В з кроком 0,5 В при одночасному вимірюванні іонного струму на колектор (циліндр Фарадея). Струм колектора вимірюється за допомогою пікоамперметра «Keithley-6485» і реєструється на комп'ютері.

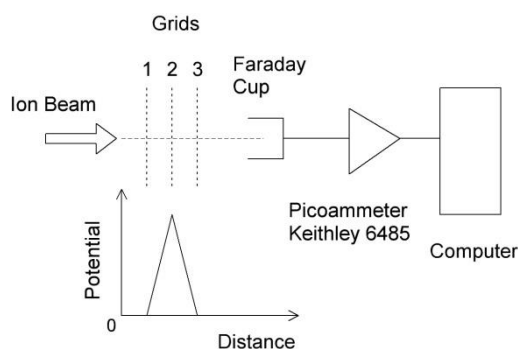


Рис. 1. Схематичне зображення сіткового енергоаналізатора.

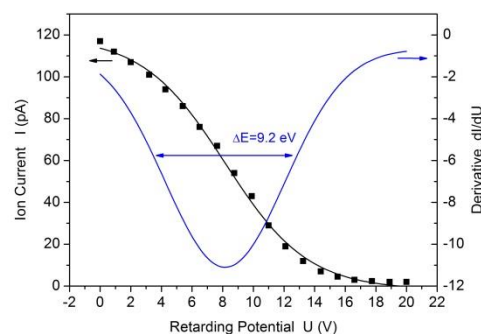


Рис. 2. Колекторний струм енергоаналізатора (крапки) та функція розподілу іонів з енергії

Колекторний струм $I(U)$ енергоаналізатора є функцією затримуючого потенціалу U другої сітки. Функція розподілу іонів за енергією (ФРІЕ) $f(E)$ пропорційна першій похідній колекторного струму $I(U)$ [6]:

$$f(E) = -\frac{1}{A} \frac{dI}{dU}$$

де: A - константа, що характеризує конструкцію енергоаналізатора та параметри іонного пучка, E - енергія пучка.

Енергетичний розкид ΔE іонів пучка визначається як напівширина ФРІЕ, тобто ширина функції розподілу іонів за енергією на її піввисоті.

На рис. 2 наводиться типова залежність струму колектора $I(U)$ сіткового енергоаналізатора від затримуючого потенціалу U . Показана ФРІЕ, пропорційна dI/dU .

Вимірювання показали, що енергетичний розкид дорівнює величині $\Delta E = 8-10$ еВ при прискорюючій напрузі 4 кВ та іонному струмі пучка ~ 1 нА.

Список використаних джерел

- [1] В.Т. Черепин, *Ионный микрозондовый анализ*, (Наукова думка, 1992), с. 116.
- [2] A.O. Nier, A Mass Spectrometer for Isotope and Gas Analysis, *Rev. Sci. Instrum.* **18**, 398 (1947). <http://dx.doi.org/10.1063/1.1740961>
- [3] H. Barthels, J. Grosser and H-P. Neitzke, Electron bombardment ion source with small energy spread and high brightness, *J. Phys. E: Sci. Instrum.* **19**, 819 (1986). <http://iopscience.iop.org/0022-3735/19/10/012>
- [4] D. Magilin, A. Ponomarev, V. Rebrov, A. Ponomarov, High-voltage scanning ion microscope: Beam optics and design. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B.* 350 (2015), pp. 32-35. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2015.03.032>
- [5] Возний В.І., Пономарьов О.Г., Москаленко В.Б., Садовий С.О. Іонне джерело з електронним ударом для компактного мікрозонда, *Сучасні проблеми експериментальної, теоретичної фізики та методики навчання фізики: матеріали VIII Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю*, Суми, ІФ НАН України, 24-26 жовтня 2022, с.15.
- [6] Kortshagen U. and Zethoff M., Ion energy distribution functions in a planar inductively coupled RF discharge, *Plasma Sources Sci. Technol.* **4**, 541 (1995). <https://doi.org/10.1088/0963-0252/4/4/005>
- [7] V.I. Voznyi, V.I. Miroshnichenko, S.N. Mordyk, V.E. Storizhko, D.P. Shulha, Axial energy spread measurements of a 27.12 MHz multicusp ion source, *Problems of atomic science and technology*, 1, Series: Plasma Physics (15), 142 (2009). <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/88321>

ВИКОРИСТАННЯ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У ВИКЛАДАННІ ФІЗИКИ В УМОВАХ ФАХОВОГО КОЛЕДЖУ

Волосенко А. В., магістрант

Сумський державний педагогічний університет імені А. С. Макаренка, Суми, Україна

У Стратегії розвитку вищої освіти в Україні на 2022-2032 рр.. зазначено про актуальність сприяння використанню в освітньому процесі інноваційних технологій та новітніх засобів навчання [1]. Виклики сьогодення та стрімкий розвиток інформаційних технологій формують необхідність у оптимізації навчально-виховного процесу та створенні нового інформаційно-освітнього середовища, яке б забезпечувало результативне навчання в умовах війни та карантинних обмежень.

Важливість інформаційних освітніх технологій полягає в тому, що вони вдосконалюють систему освіти і роблять процес навчання більш ефективним, особливо, коли заняття вимагають засвоєння студентами практичних навичок і вмінь. З огляду на вищесказане, можна стверджувати про актуальність і перспективність застосування ІКТ у навчальному процесі з фізики в умовах фахового коледжу.

На жаль, не кожен навчальний заклад може забезпечити вивчення фізики у кабінеті, обладнаному усіма необхідними приладами для проведення практичних чи лабораторних занять. Багато явищ також неможливо продемонструвати в кабінеті фізики. До них, наприклад, відносяться явища в мікросвіті, швидкоплинні процеси або експерименти з приладами, які не можуть бути доступними в аудиторії. Як наслідок, студентам важко їх засвоїти. І саме розвиток інформаційних технологій дозволяє згладити ці труднощі. Кожен сучасний викладач нині має доступ до мультимедійних презентацій, відеоматеріалів та

інших програмних продуктів, що допомагають пояснити процедури та явища, які студенти не можуть собі уявити.

Процес викладання фізики у фаховому коледжі вимагає від студентів розвитку здатності досліджувати, інтегрувати знання, розрізняти і розуміти практичне застосування набутих знань, а також шукати можливості для набуття нових знань, навичок і компетенцій. Це, в свою чергу, спонукає до вдосконалення всіх аспектів освітнього процесу та використання більш ефективних сучасних методів наукового пізнання. Тому, на нашу думку, застосування інформаційно-комунікативних технологій під час занять з фізики відкриває можливості для вирішення таких проблем.

Про актуальність використання інформаційно-комунікаційних технологій в освітньому процесі свідчить значна кількість проведених та опублікованих досліджень. Зокрема, використання сучасних інформаційних технологій у процесі підготовки здобувачів фахової передвищої освіти в умовах дистанційного навчання розглядали С.Постова, А. Федорчук, М. Шмалюк. [2], проблемі впровадження сучасних інформаційних технологій в освітній процес присвячені праці В. Бикова [3], Т. Вакалюк [4] та ін.

На думку вчених, до сучасних інформаційних технологій, які можуть бути використані в навчальних заняттях можна віднести:

- електронні конспекти лекцій (текстові документи чи мультимедійні презентації);
- електронні підручники та посібники;
- комп'ютерні енциклопедії;
- навчально-демонстраційні матеріали;
- контролюючі програми;
- навчально-ігрові програми;
- довідкові комп'ютерні бази даних тощо [4].

Варто зазначити, що використання інформаційно-комунікаційних технологій не обмежується простою заміною друкованих носіїв інформації на електронні. ІКТ дають можливість поєднати процеси вивчення, засвоєння та контролю навчального матеріалу, а також дозволяють більшою мірою персоналізувати процес навчання. Інформаційні технології безумовно сприяють підвищенню мотивації до навчання, розвитку творчого мислення та економії навчального часу. Інтерактивні та мультимедійні візуалізації сприяють розвитку просторової уяви, кращому розумінню і, відповідно, кращому засвоєнню інформації, що сприяє розвитку ключових компетентностей студентів.

Використання інформаційних технологій дозволяє спілкуватися з учнями на сучасному технологічному рівні, зробити процес навчання більш привабливим, емоційним, ефективним і об'єктивним, особливо інтеграція реальних і віртуальних експериментів в один комплекс створює ситуацію, в якій найбільш ефективно поєднуються доступність, зручність у виконанні роботи, ілюстративність і простота сприйняття змісту.

Слід наголосити, що інформаційно-комунікаційні технології відіграють важливу роль у зміні системи оцінювання знань учнів з фізики. Нові системи контролю знань на основі ІКТ характеризуються регулярністю, ефективністю та створюють широкі можливості для диференціації (створення індивідуальних завдань, що відрізняються за рівнем складності, темпом виконання), узагальнення результатів та накопичення матеріалу для оцінки особистісної динаміки студента. Крім того, вони дозволяють поєднувати процедури тестування та навчання. Ще одним важливим моментом, про який варто зазначити, є можливість переходу від зовнішнього оцінювання з боку викладача до самооцінювання та самоконтролю студентами власної діяльності.

Отже, аналіз наукових джерел дає змогу визначити переваги використання ІКТ у процесі викладання фізики, а саме: індивідуалізація навчання, інтенсифікація самостійної роботи студентів, збільшення засвоєння навчального матеріалу протягом заняття, розширення потоку інформації при використанні мережі Інтернет, підвищення мотивації та пізнавальної активності завдяки різноманітним формам роботи, можливість включення ігрового моменту, наочність та формування практичних навичок тощо.

Зважаючи на необхідність запровадження дистанційного навчання, викладання в синхронному та асинхронному режимах, перспективним та актуальним, на нашу думку, залишається дослідження застосування різноманітних інтернет-ресурсів у процесі викладання фізики в системі фахової передвищої освіти.

Список використаної літератури

- [1] Стратегія розвитку вищої освіти в Україні на 2022-2032 роки // Електронний ресурс. Режим доступу: <https://mon.gov.ua/storage/app/media/news/2022/04/15/VO.plan.2022-2032/Stratehiya.rozv.VO-23.02.22.pdf>
- [2] С. Постова, А. Федорчук та М. Шмалюк, "Використання сучасних інформаційних технологій у процесі підготовки здобувачів фахової передвищої освіти в умовах дистанційного навчання", *Нові технології навчання*, № 95, с. 186–193, 2021.
- [3] В. Ю. Биков, "Відкрите навчальне середовище та сучасні мережні інструменти систем відкритої освіти", *Науковий часопис Національного педагогічного університету імені М. П. Драгоманова. Серія 2 : Комп'ютерно-орієнтовані системи навчання : збірник. До 25-річчя інформатики в школі та педагогічному університеті*, № 9, с. 9–16.
- [4] Т. А. Вакалюк, "Види та призначення електронних засобів навчання.", у *Автоматизація та комп'ютер.-інтегр. технології у вир-ві та освіті: стан, досягнення, перспективи розвитку*, Черкаси. 2014, с.

ВПЛИВ ТУНЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОНІВ НА ШВИДКІСТЬ АНІГІЛЯЦІЇ ПОЗИТРОНА В СФЕРИЧНІЙ ПОТЕНЦІАЛЬНІЙ ЯМІ

*Ворона М.І, аспірант ; Лебедь О.А., д.ф.-м.н., старший дослідник
Інститут прикладної фізики НАН України, Суми, Україна*

Анігіляція позитронів у різних речовинах є об'єктом наукового інтересу протягом досить тривалого часу [1-3]. Потрапляючи всередину речовини позитрон втрачає більшу частину своєї енергії за час, який є малим порівняно з середнім часом його життя. Під час процесу уповільнення позитрон може захопити електрон із речовини середовища у вузькому діапазоні кінетичних енергій утворюючи зв'язану воднеподібну систему – позитроній. Така система досить нестабільна і з певним часом анігілює в гамма-кванти. Закони збереження дозволяють анігіляцію позитронію в парну кількість квантів для системи із загальним спіном 0 (парапозитроній (p-Ps), синглетний стан) і в непарну кількість квантів для системи із спіном 1 (ортопозитроній (o-Ps), триплетний стан).

Вимірювання та аналіз спектрів часу життя позитронів у речовині розвинулося в експериментальний метод дослідження внутрішньої будови речовини. Визначення швидкості анігіляції позитрона потребує обчислення електронної густини та її локальних змін поблизу дефектів [3]. Завдяки здатності позитрона анігілювати із різних специфічних станів у твердих речовинах, починаючи від стану в бездефектній решітці до сильно локалізованих станів у дефектах решітки, спектроскопія часу життя позитронів може дати унікальну інформацію щодо різних властивостей матеріалів. Отже, визначення швидкості анігіляції позитронів в області локальних змін електронної густини матеріалів є актуальним питанням розвитку методів спектроскопії часу життя для дослідження внутрішньої будови речовини, зокрема дефектної структури конструкційних матеріалів реакторів.

Позитрон в системі o-Ps має можливість відчувати електрони з протилежним спіном в середовищі та анігілювати з ним в режимі випромінювання двох гамма-квантів, відповідно середній час життя зменшується. Цей механізм характерний для всіх типів речовин і називається анігіляцією вилучення. У конденсованих речовинах компоненту з

найбільш тривалим середнім часом порядку кількох наносекунд інтерпретують анігіляцією o-Ps станів головним чином по механізму анігіляції вилучення.

Модель Тао-Елдрупа забезпечує простий та наглядний зв'язок між розміром сферично симетричних потенціальних ям та часом життя в них ортопозитронієвих станів по механізму анігіляції вилучення електрона [1-2]. В моделі Тао - Елдрупа взаємодія стану o-Ps із середовищем була апроксимована нескінченно глибокою сферично-симетричною потенціальною ямою певної ширини. Дана Тао - Елдрупа припускає проникнення електронів з основного об'єму матеріалу всередину сфери для можливості реалізації механізму анігіляції вилучення. Так, феноменологічно було включено рівномірний прошарок електронної густини всередині ями, який зайнятий молекулярними електронами. Особливістю моделі Тао-Елдрупа є припущення, що електронна густина в приграничному шарі така ж, як і в основному об'ємі матеріалу. Таким чином, швидкість анігіляції λ_p всередині шару також буде пропорційна швидкості анігіляції позитронів у незбуреному середовищі.

В представленому дослідженні пропонується розвиток моделі Тао-Елдрупа на випадок, коли висота потенціальної ями має скінченну висоту, а спричинена тунелюванням електронна густина всередині ями має нерівномірний розподіл. Випадок рівномірного розподілу електронів в тонкому прошарку при кінцевій висоті потенціальної ями був розглянутий попередніх дослідженнях.

Швидкість анігіляції позитронів в сферично-симетричну потенціальній ямі шириною r_p і висотою u_p буде пропорційна швидкості анігіляції в основному об'ємі матеріалу і може бути представлена в наступному вигляді

$$\lambda_{p2} = 4\pi a_0 \lambda_0 \cdot \left[\int_0^{r_p} |\chi_e(r')|^2 |\chi_1(r')|^2 dr' + \int_{r_p}^{\infty} |\chi_2(r')|^2 dr' \right], \quad (1)$$

Радіальна хвильова функція позитронієвого стану має різний вигляд всередині та зовні ями [4]:

$$\begin{aligned} \chi_1(r') &= B_1 \sin(r' \kappa_p), \quad 0 < r' \leq r_p, \\ \chi_2(r') &= B_2 \exp(-r' \kappa), \quad r' > r_p. \end{aligned} \quad (2)$$

Умова на значення енергії основного стану :

$$\sin^2(r_p \sqrt{2\varepsilon}) = \frac{\varepsilon}{u_p}, \quad \kappa_p = \sqrt{2(u_p - \varepsilon)}, \quad \kappa = \sqrt{2\varepsilon}. \quad (3)$$

Для зручності постійна Рідберга та радіус Бора a_0 були вибрані в якості масштабних величин для енергії та відстані, відповідно.

Коефіцієнти B_1 і B_2 визначаються з умов нормування та неперервності хвильової функції, а також неперервності її похідної, при зшиванні на границі потенціальної ями:

$$\begin{aligned} |B_1|^2 &= \frac{1}{2\pi a_0} \cdot \frac{u_p}{\varepsilon} \cdot \frac{\kappa_p}{\tau_u}, \quad |B_2|^2 = \frac{1}{2\pi a_0} \cdot \exp(-2r_p \kappa_p) \cdot \frac{\kappa_p}{\tau_u}, \\ \tau_u &= 1 + \frac{r_p u_p \kappa_p}{\varepsilon} \left(1 - \frac{\sin(2r_p \kappa)}{2r_p \kappa} \right). \end{aligned}$$

У загальному виразі (1) в перший інтеграл включено додаткову функцію від радіальної координати, щоб врахувати нерівномірний розподіл електронної густини в середині потенціальної ями. Оскільки електрони проникають в середину ями за рахунок тунелювання, то вважатимемо, що ця радіальна функція має експоненціальний характер і може бути представлена в наступному вигляді:

$$\chi_e(r') = B_3 \cdot \exp(-\kappa_F(r_p - r')). \quad (4)$$

Шукана поправка до швидкості анігіляції позитрона визначається першим доданком у загальному виразі (1) та має наступний вигляд

$$\begin{aligned} \lambda_{p3} &= 4\pi a_0 \lambda_0 \cdot \int_0^{r_p} |n(r')|^2 |\chi_1(r')|^2 dr' = \\ &= 4\pi a_0 \lambda_0 |B_3|^2 |B_1|^2 \int_0^{r_p} dr' \exp(-2\kappa_F(r_p - r')) \cdot \sin^2(\kappa r') = \end{aligned}$$

$$= \pi a_0 \lambda_0 \frac{|B_3|^2 |B_1|^2 \kappa}{\kappa^2 + \kappa_F^2} \left[\frac{\kappa}{\kappa_F^2} (1 - \exp(2\kappa_F r_p)) + 2 \sin^2(\kappa r_p) - \frac{\kappa}{\kappa_F} \cdot \sin(2\kappa r_p) \right]. \quad (5)$$

Таким чином, отримано поправку до швидкості анігіляції електронів спричинену тунелюванням електронів всередині сферично-симетричній потенціальній ямі з нерівномірним розподілом електронної густини. Отриманий результат дозволяє розширити межі застосування модифікованої моделі, оскільки більш точно описує фізичну картину процесу анігіляції позитрона в потенціалі дефекту.

Список використаних джерел

- [1] S.J. Tao, « Positronium annihilation in molecular substances» J. Chem, Phys., 56 (1972) 5499.
- [2] M. Eldrup, D. Lightbody, J. N. Sherwood, «The temperature dependence of positron lifetimes in solid pivalic acid» J. Chem., Phys., 63 ,1981.
- [3] M.J. Puska, R.M. Nieminen, «Theory of positrons in solids and on solid surfaces» Rev. Mod. Phys. 66, 1994.
- [4] Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц, Квантовая механика (нерелятивистская теория), т. III , М.: Наука, 1989.

НОВИЙ СПОСІБ РОЗРАХУНКУ ЙМОВІРНОСТІ ПРОЦЕСУ НАРОДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОН-ПОЗИТРОННОЇ ПАРИ ПРИ РОЗСІЮВАННІ ЕЛЕКТРОНА НА ПОЛІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ХВИЛІ

Ворошило О.І., к.ф.-м.н., с.н.с., Недорешта В.М., к.ф.-м.н.

Інститут прикладної фізики Національної академії наук України, м. Суми, Україна

У зв'язку з очікуваними експериментами на установці LUXE (м. Гамбург, Німеччина) із дослідження процесу народження електрон-позитронної пари при розсіюванні електрона на полі електромагнітної хвилі важливим є розвинення теорії цього процесу.

Амплітуда процесу народження електрон-позитронної пари при розсіюванні електрона на полі електромагнітної хвилі, після інтегрування за 4-координатами вершин, можна представити у вигляді суми парціальних компонент:

$$S_{fi} = \sum_{l, l_1=-\infty}^{\infty} S_{l l_1}, \quad (1)$$

де парціальні амплітуди мають вигляд:

$$S_{l l'} = C \left(\frac{T_{l l'}^{(a)}}{\kappa_1^2} + \frac{T_{l l'}^{(b)}}{\kappa_2^2} \right) (2\pi)^4 \delta^{(4)}(\tilde{p}_i + l k - \tilde{p}_f^{(1)} - \tilde{p}_f^{(2)} - \tilde{p}_f), \quad (2)$$

$$T_{l, l'}^{(a)} = A_\mu(p_f^{(2)}, -\bar{p}_f) A^\mu(p_f^{(1)}, p_i), \quad T_{l, l'}^{(b)} = A_\nu(p_f^{(1)}, -\bar{p}_f) A^\nu(p_f^{(2)}, p_i), \quad A^\mu = \bar{u}_{p_f, \sigma_f} M_{l'}^\mu(p_f, p_i), \quad (3)$$

$$M_{l'}^\mu(p_f, p_i) = L_l \gamma^\mu + \left(\frac{m^2}{8(k p_f)(k p_i)} B_l k^\mu + \frac{m}{2(k p_i)} D \right) \hat{k} - \frac{m}{2(k p_i)} \hat{D}_l k^\mu - \frac{m}{4} \left(\frac{1}{(k p_f)} - \frac{1}{(k p_i)} \right) \hat{D}_l \hat{k} \gamma^\mu, \quad (4)$$

У виразі (2) C – нормувальна константа, вирази для L_l , D_l , B_l через їх громізdkість ми тут не приводимо, їх явний вигляд можна знайти, наприклад, в монографії [2], γ – матриці Дірака, шляшкою над 4-вектором позначені їх згортки з γ – матрицями, u_p – біспіно́р Дірака вільного електрона, k – хвильовий 4-вектор; p_i , σ_i – 4-імпульс і поляризація початкового електрона; $p_f^{(1,2)}$, $\sigma_f^{(1,2)}$ – 4-імпульси і поляризації кінцевих електронів; $\bar{p}_f$,

$\bar{\sigma}_f$ – 4-імпульс і поляризація утвореного позитрона; тильда над імпульсами позначає відповідні квазіімпульси (див. [3]); $\kappa_{1,2}$ – 4-імпульс проміжного фотона (індекс 1 відноситься до 1-ої діаграми, 2 – другої):

$$\kappa_1 = \tilde{p}_i + l_1 k - \tilde{p}_f^{(1)} = \tilde{p}_f^{(2)} + \tilde{p}_f - (l - l_1)k, \quad (5)$$

$$\kappa_2 = \tilde{p}_i + l_1 k - \tilde{p}_f^{(2)} = \tilde{p}_f^{(1)} + \tilde{p}_f - (l - l_1)k. \quad (6)$$

Аргумент δ -функції у виразі (2) визначає закон збереження 4-імпульсу для парціального процесу. Т.я. як числа l_1 в нього не входять, то парціальні амплітуди з однаковими числами l але різними l_1 будуть інтерферувати між собою.

Диференційна ймовірність досліджуваного процесу в одиницю часу визначається виразом:

$$d\mathbf{w}^{(l)} = |C|^2 H (2\pi)^4 \delta^{(4)}(\tilde{p}_i + l k - \tilde{p}_f^{(1)} - \tilde{p}_f^{(2)} - \tilde{p}_f) \frac{V^2 d^3 p_f^{(1)} d^3 p_f^{(2)} d^3 \bar{p}_f}{(2\pi)^9}, \quad (7)$$

$$H = \sum_{l_1, l_1' = -\infty}^{\infty} \left(\frac{1}{\kappa_1^4} T_{l, l_1}(2, 1) T_{l, l_1}^*(2, 1) + \frac{1}{\kappa_1^4} T_{l, l_1}(2', 1') T_{l, l_1}^*(2', 1') - \frac{2}{\kappa_2^2 \kappa_1^2} \text{Re}(T_{l, l_1}(2, 1) T_{l, l_1}^*(2', 1')) \right), \quad (8)$$

де для скорочення запису позначено: $1 \equiv (p_f^{(1)}, p_i)$, $2 \equiv (p_f^{(2)}, -\bar{p}_f)$, $1' \equiv (p_f^{(2)}, p_i)$, $2' \equiv (p_f^{(1)}, -\bar{p}_f)$.

Розрахунок виразу (8) стандартним чином приводить до надзвичайно великої кількості доданків, що неможливе як запис ймовірності в компактній формі так і аналіз отриманих результатів. Нами запропонований новий метод розрахунку ймовірності для процесів 2-го порядку за сталою тонкої структури із фотонним проміжним станом, що відбуваються в полі плоскої електромагнітної хвилі. Щоб скористатись цим методом запишемо скалярний добуток у виразі для $T_{l, l_1}^{(a)}$ (3) у ортогональному базисі:

$$e_0 = \frac{\kappa_1}{\sqrt{|\kappa_1^2|}}, \quad e_1 = e_x - \frac{(\kappa_1 e_x)}{(k \kappa_1)} k, \quad e_2 = e_y - \frac{(\kappa_1 e_y)}{(k \kappa_1)} k, \quad e_3 = -\lambda \frac{k}{(k e_0)} + e_0, \quad (9)$$

де $\lambda = e_0^2 = \pm 1$, $e_3^2 = -\lambda$, $e_{1,2}^2 = -1$; $(e_i e_j) = 0$ для $i \neq j$. В базисі (9) для $T_{l, l_1}^{(a)}$ отримаємо:

$$T_{l, l_1}^{(a)} = -(A(2)e_1)(A(1)e_1) - (A(2)e_2)(A(1)e_2) - (A(2)e_3)(A(1)e_3), \quad (10)$$

де врахована ортогональність фотонного і електронного струмів внаслідок чого $(Ae_0) = 0$.

У виразі (10) маємо три доданки, що відповідає кількості поляризацій проміжного фотона, який на відміну від реального їх має три. Аналогічний вираз можна записати для $T_{l, l_1}^{(a)}$ утворивши базис аналогічний до (9) з заміною $\kappa_1 \rightarrow \kappa_2$.

Врахуємо наступні вирази:

$$(A(1)e_j) = \bar{u}_{p_f^{(1)}, \sigma_f^{(1)}} (e_j M_{l_1}(1)) u_{p_i, \sigma_i} = \frac{\bar{u}_{p_f^{(1)}, \sigma_f^{(1)}} (e_j M_{l_1}(1)) u_{p_i, \sigma_i} (\bar{u}_{p_f^{(1)}, \sigma_f^{(1)}} u_{p_i, \sigma_i})^*}{(\bar{u}_{p_f^{(1)}, \sigma_f^{(1)}} u_{p_i, \sigma_i})^*} = \left(\frac{\Lambda_j^{(1)}(1)}{\bar{u}_{p_f^{(1)}, \sigma_f^{(1)}} u_{p_i, \sigma_i}} \right)^*, \quad (11)$$

$$\Lambda_j^{(1)}(1) = \text{Sp} \left\{ u_{p_f^{(1)}, \sigma_f^{(1)}} \otimes \bar{u}_{p_f^{(1)}, \sigma_f^{(1)}} \left[e_j M_{l_1}(1) \right] u_{p_i, \sigma_i} \otimes \bar{u}_{p_i, \sigma_i} \right\}, \quad \Lambda_j^{(1')}(1) = \left| \Lambda_j^{(1)}(1) \right| \exp(i\varphi_j^{(1)}(1)), \quad (12)$$

$$\left| \Lambda_j^{(1)}(1) \right| = W_j^{(1)}(1) w(1), \quad \varphi_j^{(1)}(1) = \arctg \left(\frac{\text{Re}(\Lambda_j^{(1)}(1))}{\text{Im}(\Lambda_j^{(1)}(1))} \right), \quad w(1) = \text{Sp} \left\{ u_{p_f^{(1)}, \sigma_f^{(1)}} \otimes \bar{u}_{p_f^{(1)}, \sigma_f^{(1)}} \left[u_{p_i, \sigma_i} \otimes \bar{u}_{p_i, \sigma_i} \right] \right\}, \quad (13)$$

$$W_j^{(1)}(1) = \text{Sp} \left\{ u_{p_f^{(1)}, \sigma_f^{(1)}} \otimes \bar{u}_{p_f^{(1)}, \sigma_f^{(1)}} \left[e_j M_{l_1}(1) \right] u_{p_i, \sigma_i} \otimes \bar{u}_{p_i, \sigma_i} \left[e_j \bar{M}_{l_1}(1) \right] \right\}. \quad (14)$$

При розрахунку цих виразів необхідно врахувати прямий добуток біспінорів

$$u_p \otimes \bar{u}_p = \frac{1}{2} (\hat{p} + m)(1 - \sigma \gamma^5 \hat{a}), \quad a_1^\mu \equiv a_1^\mu(p) = \frac{1}{2} \text{Sp} \left\{ u_p \otimes \bar{u}_p \gamma^5 \gamma^\mu \right\}. \quad (15)$$

Як результат отримаємо:

$$T_{l,l'}(2,1)T_{l,l'}^*(2,1) = \left(\sum_{j=1}^3 \sqrt{W_j^{(l_2)}(2)W_j^{(l_1)}(1)} \exp\left(i\left[\varphi_j^{(l_2)}(2) + \varphi_j^{(l_1)}(1)\right]\right) \right) \times \\ \times \left(\sum_{j=1}^3 \sqrt{W_j^{(l_2)}(2)W_j^{(l_1)}(1)} \exp\left(-i\left[\varphi_j^{(l_2)}(2) + \varphi_j^{(l_1)}(1)\right]\right) \right), \quad (16)$$

$$T_{l,l'}(2,1)T_{l,l'}^*(2',1') = \frac{\sqrt{w(2')w(1')w(2)w(1)}}{w_{\text{int}}} \left(\sum_{j=1}^3 \sqrt{W_j^{(l_2)}(2)W_j^{(l_1)}(1)} \exp\left(i\left[\varphi_j^{(l_2)}(2) + \varphi_j^{(l_1)}(1)\right]\right) \right) \times \\ \times \left(\sum_{j'=1}^3 \sqrt{W_{j'}^{(l_2')}(2')W_{j'}^{(l_1')}(1')} \exp\left(-i\left[\varphi_{j'}^{(l_2')}(2') + \varphi_{j'}^{(l_1')}(1')\right]\right) \right), \quad (17)$$

В останніх формулах $l_2 = l - l_1$, $l'_2 = l - l'_1$; w_{int} можна розрахувати за формулою:

$$w_{\text{int}} = \text{Sp} \left\{ u_{p_f^{(2)}, \sigma_f^{(2)}} \otimes \bar{u}_{p_f^{(2)}, \sigma_f^{(2)}} u_{p_i, \sigma_i} \otimes \bar{u}_{p_i, \sigma_i} u_{p_i, \sigma_i} \otimes \bar{u}_{p_i, \sigma_i} u_{\bar{p}_f, \bar{\sigma}_f} \otimes \bar{u}_{\bar{p}_f, \bar{\sigma}_f} \right\}. \quad (18)$$

Отже можемо зробити такі висновки:

1. Для розрахунку ймовірності процесу утворення пари при розсіюванні електрона на полі плоскої хвилі необхідно розрахувати ймовірності наступних процесів першого порядку:
 - а) процесу розсіювання початкового електрону (p_i, σ_i) на хвилі з випромінюванням проміжного фотону (зауважимо, що в загальному випадку $\kappa^2 \neq 0$) і переходом його в стан $p_f^{(1)}, \sigma_f^{(1)}$;
 - б) процес утворення електрон-позитронної пари (стан утвореного електрона: $p_f^{(2)}, \sigma_f^{(2)}$; позитрона – $\bar{p}_f, \bar{\sigma}_f$);
 - в) два підпроцесу отриманих заміною містами 1-го і 2-го кінцевих електронів.
2. Також необхідно за формулою (13), розрахувати фази, що відповідають цим підпроцесам.
3. Для розрахунку доданку, що відповідає інтерференції амплітуд необхідно також розрахувати для кожного підпроцесу величини w (13) та w_{int} (18).
4. Знайдений вираз для ймовірності описує ефекти пов'язані з поляризацією частинок, що приймають участь в процесі.

Список використаних джерел

- [1] С.П. Рошупкин, А.И. Ворошило, Резонансные и когерентные эффекты квантовой электродинамики в световом поле (Київ, вид-во Наукова думка, 2008).

ОРГАНІЗАЦІЯ ДОСЛІДНО – ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ СТУДЕНТІВ НА ЗАНЯТТЯХ З ФІЗИКИ В УМОВАХ ЗМІШАНОГО НАВЧАННЯ

Голубкова І.М. викладач фізики, викладач-методист

Відокремлений структурний підрозділ «Машинобудівний фаховий коледж

Сумського державного університету», Суми, Україна

Фізика – фундаментальна наука, яка вивчає загальні закономірності природних явищ та закладає основи розуміння світу, формування його природничо-наукової картини. Згідно навчальної Програми з фізики і астрономії для 10-11 класів закладів загальної середньої освіти, за якою працюють заклади фахової передвищої освіти, завданнями курсу

є не тільки формування у здобувачів освіти системи фізичних і астрономічних знань на основі сучасних теорій, а й вміння самостійно шукати відповіді на питання, які ставить життя, використовувати набуті знання в практичній діяльності. Важливу роль в цьому відіграють вміння вести природничо-наукові дослідження методами наукового пізнання (планувати експеримент, обирати метод дослідження, проводити вимірювання, обробляти та інтерпретувати одержані результати).

В аудиторіях вже давно стали звичними демонстраційні експерименти у виконанні викладача, які можуть бути використані для створення проблемної ситуації. Чому одночасно падають на підлогу металевий та картонний листки, якщо їх скласти разом, тоді коли вони, одночасно відпущені з однакової висоти, падають неодноразово? Куди подівся запас потенціальної енергії тіла, піднятого на певну висоту, після падіння його на землю? Чому повітряний конденсатор розряджається, якщо ввести палаючого сірника в простір між його обкладинками? До пошуку відповідей залучаються всі здобувачі освіти. І вже на цьому етапі формуються вміння спостерігати, висувати гіпотези та робити висновки.

Перші практичні вміння дослідницько-експериментальної діяльності формуються та відпрацьовуються під час лабораторних робіт. Саме на цих заняттях студенти мають можливість виконати дослід своїми руками, безпосередньо спостерігати за фізичними явищами, проводити розрахунки та робити певні висновки щодо природних явищ, оцінювати результати.

До самостійної дослідницької діяльності студенти залучаються під час роботи над проектом. Кожен проект розв'язує певну проблему, має практичне спрямування. У випадку групових проектів всі учасники долучаються до пошуку інформації, планування, проведення дослідів, створення кінцевого продукту, набувають навичок роботи в групі, бачать її результати.

В своїй діяльності я використовую лише елементи проектного навчання, оскільки використання виключно проектних технологій передбачає високу підготовленість студентів до даного виду діяльності. Досить широкою популярністю користуються прикладні проекти, які завершуються виготовленням наочності, вимірювальних приладів, тощо. Так проект «Вологість повітря та її вимірювання» має результатом створення діючого психрометра, а сам опис містить доведення актуальності практичного визначення відносної вологості повітря, будову та принцип дії приладу для її вимірювання. Розглядаючи світлові явища, студенти виготовляють камеру-обскура як прообраз фотоапарату, охоче демонструють та пояснюють принцип її роботи на основі закону прямолінійного поширення світла.

Розвиток сучасної техніки значно урізноманітнює проектні продукти. Останнім часом популярними стали проекти по вивченню властивостей речовини: власноруч поставлені досліди та фіксація їх результатів на відео. Як приклад можу навести відео з явищем дифузії під час заварювання чаю, демонстрація твердих властивості води, принципу Бернуллі, вирощених кристалів, тощо.

На жаль, сьогодні в умовах військового часу, коли більшість закладів освіти перейшли на змішане навчання, коли доступу до обладнання немає або він суттєво обмежений, у викладача та студентів не завжди є можливість провести реальні спостереження та дослідів, які лежать в основі пізнання навколишнього світу.

Велику допомогу в подоланні зазначених труднощів дає всесвітня павутина, зокрема You Tube. Але при таких переглядах студенти стають тільки пасивними спостерігачами. Хоча є такі спостереження та лабораторні роботи, які студенти можуть провести самостійно в домашніх умовах. В основному, це дослідів з механіки та молекулярної фізики. Хоча лабораторне обладнання в цих випадках відсутнє, підбір «замінників» до нього, виготовлення необхідної конструкції, планування експериментів та дослідів дають поштовх до креативного мислення та розвитку інженерної кмітливості. Сучасні засоби зв'язку дають можливість фіксації таких дослідів у вигляді відеороликів або фото.

В умовах, коли обладнання неможна нічим замінити, стають в пригоді інтерактивні симуляції. Значну кількість таких симуляцій можна знайти на сайтах PhET [1] та сайті

Physics Animations/Simulations [2]. Кожен з цих сайтів має свої переваги, які роблять корисним їх використання на тому чи іншому етапі вивчення матеріалу.

Так при проведенні лабораторних робіт вони створюють «ефект присутності» студентів в лабораторії, дають змогу реально впливати на процеси, перевіряти теоретичні висновки, відпрацьовувати навички практичного застосування набутих знань. Як приклад, наведу лабораторну роботу по перевірці газових законів. В цій роботі використовують симуляцію, яка дозволяє вимірювати параметри газу в різних ізопроцесах, спостерігати за розподілом молекул за швидкостями та енергіями а також їх залежністю від температури. В цей же час доцільно провести паралелі між результатами експерименту та законами розподілу випадкових величин [3].

Особливу увагу заслуговує комплект по конструюванню електричних мереж постійного та змінного струму[4]. Він дає змогу студентам відпрацьовувати вміння збирати електричні кола, використовувати вимірювальні прилади, розглядати процеси в коливальному контурі, визначати індуктивний та ємнісний опір тощо.

Своєрідну «віртуальну лабораторію» можна використовувати для організації змішаного навчання, пропонуючи дослідницьку роботу по одній з симуляцій. Прикладом може бути дослідження явища фотоефекту [5]. Студенти мають змогу самостійно вивчати залежність сили фотоструму від частоти та довжини світлової хвилі, а отже і кольору світла, підійти до поняття «червоної границі фотоефекту» та залежності її величини від матеріалу катоду а також виявляти умови припинення фотоефекту, тощо.

Отже, введення елементів експериментально-дослідницької діяльності в освітній процес, навіть в умовах змішаного навчання, має великий вплив не тільки на формування єдиної системи знань, умінь та навичок, що стосуються безпосередньо фізики, а й розвивають креативність та спостережливість здобувачів освіти, їх логічне мислення та вміння робити висновки, планувати власну діяльність та вміння працювати в команді, формулювати твердження та відстоювати свою думку. А найголовніше – це вміння шукати відповіді на питання, формування та розвиток культури роботи з інформацією, здатність використовувати сучасні її джерела. А саме це і є необхідною умовою навчання людини протягом життя.

Список використаних джерел

- [1]. <https://phet.colorado.edu/uk>
- [2]. www.vascak.cz/physicsanimations.php?l=en.
- [3]. https://phet.colorado.edu/sims/html/gas-properties/latest/gas-properties_uk.html
- [4]. https://phet.colorado.edu/sims/html/circuit-construction-kit-dc-virtual-lab/latest/circuit-construction-kit-dc-virtual-lab_en.html
- [5] https://www.vascak.cz/data/android/physicsatschool/template.php?s=opt_fotoefekt&l=ua

МОТОРИ, ЯКІ ВИКОРИСТОВУЮТЬ У БІОНІЧНИХ ПРОТЕЗАХ РУКИ, ТА ЇХНІ ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Гусак А.В.; н.к. Мусієнко О.С., доктор філософії

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені
Ігоря Сікорського», Київ, Україна*

Біонічні протези — високо функціональні протези, які відновлюють рухливість та дрібну моторику. Вони працюють від сигналів м'язів кукси: людина напружує потрібний м'яз, і протез виконує запрограмовану дію [1]. З розвитком технологій, ускладнилась і механічна система біонічних протезів, постали нові проблеми, а саме: які мотори підібрати для біонічного протезу руки?

Одні з найперших біонічних протезів почали з'являтися ще в 1960-х (Російська Рука, Рука Вадуца або Французька Рука, Англійська Рука), вони мали лише одну функцію та були не адаптивні. У ті ж роки було декілька спроб використання пневматичних систем у протезах, проте працювати із стиснутим газом було складно, тому дослідники вирішили зосередитись на використанні електроенергії [2]. І якщо дизайн біонічних рук майже не змінився з 60-х рр., то сильно змінилися внутрішні комплектуючі та матеріали. Так, від використання одного мотору на руку для виконання однієї простої операції розробники перейшли до використання багатьох моторів для виконання різних операцій. Наприклад, компанія “Vincent Systems” у своїх біонічних протезах руки встановлює до шести спеціально полірованих електродвигунів компанії “maxon” DCX 10 (які також використовувались у першому Марсіанському дроні-досліднику) діаметром усього 10мм. Генеральний директор “Vincent Systems” Стефан Шульц також зазначив: “Одиниці [моторів] компактні, і це мотори з найвищими показниками енергії, які зараз доступні для нашого вжитку” [3].

Найбільшою проблемою є впровадження достатньої сили хвату. Більшість протезів мають достатні характеристики швидкості хвату, проте сила може бути недостатньою для виконання всіх звичних дій, які середньостатистична людина може виконувати здоровою рукою. Оскільки протези руки бажають зробити максимально легкими та не дуже великими за розміром, загалом більшість біонічних протезів не демонструють силу хвату, більшу за 45 Н, яка вважається оптимальною для практичного використання [4]. Деякі компанії зосередились на впровадженні більшої кількості різних варіантів хвату для подолання цієї проблеми. Наприклад, компанія “Bebionic” впровадила 14 різних варіантів хвату, один з яких дозволяє переносити важкі предмети до 25кг. Ця компанія встановлює в кожний протез руки 5 моторів, по одному для кожного пальцю: 4 розташовані в долоні, і п'ятий — у великому пальці [5]. Це мотори компанії “FAULHABER” 1024SR із швидкістю без навантаження 12800хв^{-1} , масою 10,8г та номінальною напругою від 3 до 12 В [6] (для порівняння аналогічні характеристики моторів DCX 10, розглянутих вище: 12500хв^{-1} , 6г та 9В, відповідно [7]). Аналогічно до проблеми недостатньої сили хвату підійшли розробники біонічних рук “Southampton-Remedi” та “i-Limb”.

Мотори, які використовуються, повинні бути такими ж легкими та малими, наскільки це взагалі можливо. Таким чином, для збільшення сили хвату із збереженням оптимальної ваги та розміру протезу, були проведені дослідження з встановленням двомоторного приводу. Задля цього були використані електромотори: серії DC-Flat Motors 9 W/12 V FAULHABER 2214+196:1 редуктор та серії DC-Micromotor 5 W/6 V FAULHABER 717+69:1 редуктор. При чому, максимальна сила хвату становить 80.2Н, а без поглинання енергії — 62.0Н. Також, була досягнена середня швидкість хвату усього в 1,2с, і це за ваги протезу 540г [8].

Інновації у сфері біоінженерії надзвичайно важливі. За допомогою нових розробок моторів можна вдосконалити біонічні протези, щоб допомогти людям, які втратили кінцівку, жити повноцінно. Ці розробки покращать життя у світі та в Україні.

Список використаних джерел

- [1] Ossur. Що таке біонічні протези й для чого вони? Офіційний сайт компанії. URL: <https://ossur.com.ua/shho-take-bionichni-protezi-j-dlya-chogo-voni/> (дата звернення: 15.03.2023)
- [2] D.S. Childress, PhD. Історичні аспекти саморухомих протезів кінцівок. *Digital Recourse Foundation for the Orthotics & Prosthetics Community*. URL: http://www.oandplibrary.org/cpo/1985_01_002.asp (дата звернення: 15.03.2023)
- [3] S. Roschi. Протез ніколи не буде ідеальним. *drive.tech by maxon*. URL: <https://drive.tech/en/stream-content/the-world-of-prosthetics-is-an-engineers-paradise> (дата звернення: 15.03.2023)
- [4] R. Vinet, Y. Lozac'h, N. Beaudry, G. Drouin. Розробка дизайну мультифункціонального протезу руки. *The Journal of Rehabilitation Research and Development*, 1995. URL: https://www.researchgate.net/publication/14431586_Design_methodology_for_a_multifunctional_hand_prosthesis (дата звернення: 15.03.2023)
- [5] Faulhaber. Інновації йдуть рука об руку. Офіційний сайт компанії. URL: <https://www.faulhaber.com/en/motion/myoelectric-prosthesis/> (дата звернення: 15.03.2023)
- [6] Faulhaber. Серія SR. Офіційний сайт компанії. URL: <https://www.faulhaber.com/en/products/series/1024sr/> (дата звернення: 15.03.2023)
- [7] maxon. DCX 10 S Ø 10mm. Офіційний сайт компанії. URL: https://www.maxongroup.com/maxon/view/product/motor/dcmotor/DCX/DCX10/DCX10S01E_BKL663 (дата звернення: 15.03.2023)
- [8] P. Vanich, P. Tangpornprasert, C. Virulsri. Дизайн протезу руки з єдиним ступенем свободи та практичними максимальними силою хвату та швидкістю хвату для дій з повсякденного життя, з використанням двомоторного приводу. *IEEE Robotics and Automation Letters* PP(99):1-8, березень 2023. URL: https://www.researchgate.net/publication/367289692_Design_of_a_Single-DoF_Prosthetic_Hand_With_Practical_Maximum_Grip_Force_and_Grasp_Speed_for_ADLS_Using_Dual-Motor_Actuator (дата звернення: 15.03.2023)

НЕЛІНІЙНІ ЕФЕКТИ ПРИ ПРОХОДЖЕННІ ЗАРЯДЖЕНОЇ ЧАСТИНКИ КРИЗЬ ЕЛЕКТРОННУ ПЛАЗМУ

Дяченко М. М., к.ф.-м.н., н.с.; Холодов Р. І., д.ф.-м.н., чл. -кор. НАН України
Інститут прикладної фізики НАН України, Суми, Україна

Для проведення експериментів на сучасних колайдерах заряджених частинок одним із вирішальних факторів є досягнення високої яскравості пучків, тобто мінімізація розкиду частинок за їх швидкостями. Серед методів охолодження заряджених частинок, найвідомішим та широко використовуваним є метод електронного охолодження [1]. Незважаючи на його широке застосування, він супроводжується рядом теоретичних проблем, серед яких особливо актуальною є проблема розходження швидкості охолодження позитивно та негативно заряджених частинок при русі через замагнічену електронну плазму. Ця проблема потребує детальнішого вивчення та розробки нових теоретичних підходів для її вирішення. Цей аспект методу електронного охолодження є важливим, оскільки може впливати на ефективність охолодження частинок.

Слід відмітити, що всі наявні теорії електронного охолодження не враховують залежність від знаку заряду. До цього моменту електронне охолодження застосовувалося виключно для позитивно заряджених частинок. Однак, в мега-проекті FAIR (Facility for

Antiproton and Ion Research), цей метод буде застосований для пучків антипротонів [2], що робить актуальною згадану проблему та вимагає проведення теоретичних досліджень.

В даній роботі в рамках методу Particle In Cell (PIC) була розглянута задача проходження різнойменно заряджених частинок через електронну плазму в одновимірному випадку. Для цього були вибрані такі параметри системи: довжина області моделювання $L = 1000 \lambda_D$, одиницею вимірювання швидкостей була теплова швидкість електронів, а часу – обернена плазмова частота, кількість комірок – 2000, крок за часом становив 0.1,

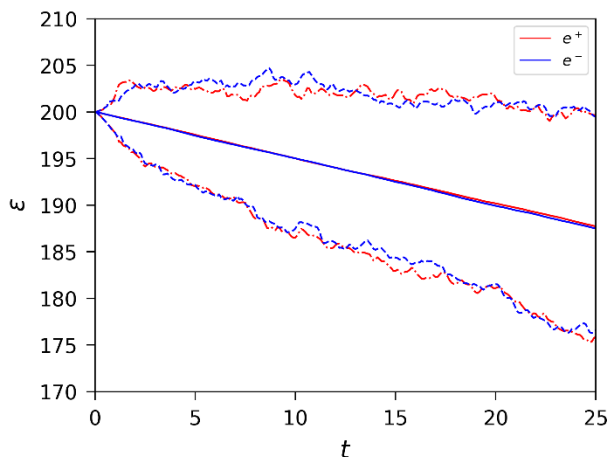


Рис. 1. Порівняння усереднених енергій позитрона та електрона при русі крізь електронну плазму

зовнішньою частинкою та електронами, що потребує значно складніших моделей для розрахунків.

кількість частинок на комірку – 10, граничні умови були періодичними.

В результаті моделювання були отримані залежності енергії швидких електрона та позитрона від часу. Було показано добра узгодженість отриманих результатів з аналітичними виразами. На рисунку 1 показані результати моделювання для частинок з початковою швидкістю 20 теплових швидкостей електронів. З рисунка видно, що відмінність між втратами енергії електрона та позитрона, за рахунок колективних нелінійних ефектів, відсутня в межах похибки обчислень, що вказує на необхідність врахування зіткнень між

Список використаних джерел

- [1] Н. Poth, "Electron cooling: Theory, experiment, application" *Phys. Rep.*, vol. 196, no. 3-4, pp. 135–297.
- [2] "HESR Electron Cooler Design study. Technical report" The Svedberg Laboratory, Uppsala University. 2009.

МЕТАПОВЕРХНІ ДЛЯ ПЛАНАРНИХ ОПТИЧНИХ ПОЛЯРИЗАЦІЙНИХ ПРИБОРІВ ТА ЗАХВАТУ СВІТЛА В ОПТОВОЛОКНО

Єрмаков О. Є, старший викладач

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, Харків, Україна

Метаповерхня, що представляє собою двовимірний періодичний масив субхвильових розсіювачів, дозволяє ефективно керувати властивостями електромагнітних хвиль як у дальньому, так й у ближньому полях [1]. У цій роботі буде розглянуто декілька перспективних застосувань метаповерхонь у задачах планарної та оптоволоконної оптики.

1. Управління поляризацією сильно локалізованого світла за допомогою діелектричної метаповерхні.

Спектр плоских електромагнітних хвиль у будь-якому ізотропному однорідному середовищі є двічі виродженим за поляризацією на будь-якій частоті і в будь-якому напрямку, оскільки дисперсії ортогональних ТЕ- і ТМ-поляризованих власних мод абсолютно однакові. Принцип роботи будь-якого об'ємного класичного поляризатора заснований на усуненні поляризаційного виродження за допомогою анізотропної пластини.

Мініатюризація і планарні технології призводять до високої локалізації електромагнітного сигналу в площині поширення. Однак при цьому поляризаційне виродження знімається. Найпростішим прикладом є діелектричний хвиевод, який демонструє поширення сильно локалізованих хвиль з різними дисперсіями ТЕ і ТМ мод. Таким чином, не існує поляризаційного ступеня свободи для планарних фотонних пристроїв з поширенням електромагнітної хвилі в площині, оскільки локалізовані ТЕ і ТМ моди у загальному випадку не вироджені. Це істотно обмежує функціональність пласких оптичних і планарних фотонних пристроїв. Зокрема, поляризатор хвиеводних мод не може бути створений без ширококутового поляризаційного ТЕ-ТМ виродження.

У цій роботі ми показуємо можливе вирішення цієї фундаментальної проблеми за допомогою наноструктурування діелектричної пластинки. Мета дослідження полягає у поєднанні поляризаційного ТЕ-ТМ виродження та високого ступеня локалізації світла для хвиеводних мод. А саме, теоретично досліджено зонну діаграму періодичного субхвильового масиву кремнієвих циліндрів та продемонстровано ширококутове поляризаційне виродження ТЕ та ТМ власних локалізованих мод цієї структури [2].

Інший підхід досягнення поляризаційного ТЕ-ТМ виродження поверхневих електромагнітних хвиль вимагає застосування самокомплементарних метаповерхонь, що підкорюються принципу Бабіне [3]. У цьому випадку метаповерхня не має магнітного відгуку, але виродження можна досягти тільки у певних напрямках розповсюдження поверхневої хвилі.

Запропонована концепція відкриває новий ступінь свободи локалізованого світла та потенційно може стати платформою для нового покоління поляризаційних пристроїв планарної фотоніки, зокрема планарного поляризатора хвиеводних [4] та поверхневих [5] хвиль.

2. Рекордно ефективний захват світла в наноструктуроване оптоволокно.

Оптичні волокна є ключовими пристроями сучасної фотоніки та успішно застосовуються в різноманітних галузях, включаючи телекомунікації та медицину. Найбільш вдалою і широко використовуваною геометрією є волокно зі ступінчастим профілем показника заломлення, виготовлене з кремнезему з легуванням сердечником, яке підтримує лише одну оптичну моду. Хоча фактичні можливості транспортування світла чудові, основна проблема виникає на початку волокна, де має збиратися світло. Недоліком комерційного одномодового оптоволокна є низький контраст показника заломлення між сердечником і оболонкою, що призводить до низької числової апертури. Як наслідок, світло може ефективно збиратися в оптоволокно в діапазоні кутів падіння лише до 20 градусів [6].

У цій роботі теоретично й експериментально показано, що нанесені на торці оптоволокна діелектричні наноструктури дозволяють суттєво підвищити захват світла, тобто перетворення падаючої пласкої хвилі на хвиеводну моду, до безпрецедентно високих рівнів.

Полімерні аксіально-симетричні наноструктури були виготовлені на торці волокна за допомогою технології прямого лазерного друку. Використовуючи переваги унікальних властивостей технології нанодруку, нам вдалося перевершити функціональність оптоволокна на порядки у порівнянні з неструктурованим. Різні типи аксіально-симетричних структур (наприклад, одношагові та двошагові решітки або аперіодичні масиви) були нанесені на торці одномодових оптоволокна SMF-28, що призвело до створення структур виняткової якості та ефективності захвату світла, що перевершують усі раніше відомі аналогічні пристрої [6]. Продemonстровано посилення захвату світла під кількома вибраними кутами та у межі великих кутових інтервалів.

Ця розробка може бути застосована в різноманітних передових галузях, які вимагають високоефективного збору світла в обраних кутових інтервалах, включаючи ендоскопію або квантові технології.

Список використаних джерел

- [1] H. T. Chen, A. J. Taylor, and N. Yu, “A review of metasurfaces: physics and applications”, Reports on Progress in Physics, vol. 79, № 7, p. 076401, 2016.
- [2] O. Yermakov, and S. Polevoy, “Merging polarization degeneracy and high localization with all-dielectric metasurfaces in microwave and near-infrared ranges”, 2022 IEEE 12th International Conference Nanomaterials: Applications & Properties (NAP), pp. 1-4, 2022.
- [3] O. Yermakov, V. Lenets, A. Sayanskiy, J. Baena, E. Martini, S. Glybovski, and S. Maci, “Surface waves on self-complementary metasurfaces: all-frequency hyperbolicity, extreme canalization, and TE-TM polarization degeneracy”, Physical Review X, vol. 11, № 3, p. 031038, 2021.
- [4] O. Y. Yermakov, A. A. Bogdanov, and A. V. Lavrinenko, “Broadband polarization degeneracy of guided waves in subwavelength structured ZnO pattern”, IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, vol. 25, № 3, pp. 1-7, 2019.
- [5] S. Polevoy, and O. Yermakov, “Excitation of surface waves with on-demand polarization at self-complementary metasurface”, arXiv preprint, arXiv:2301.07195, 2023.
- [6] O. Yermakov, M. Zeisberger, H. Schneidewind, J. Kim, A. Bogdanov, Y. Kivshar, and M. A. Schmidt, “Advanced fiber in-coupling through nanoprinted axially symmetric structures”, Applied Physics Reviews, vol. 10, № 1, p. 011401, 2023.

ДОСЛІДНИЦЬКО-ПРОЄКТНИЙ ПІДХІД ДО НАВЧАННЯ ФІЗИКИ ТА ФОРМУВАННЯ МОЛОДИХ НАУКОВЦІВ

Єрмаков О. Є., старший викладач

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, Харків, Україна

Стандартні засоби навчальної діяльності з фізики включають в себе лекції, практичні заняття, лабораторні роботи, семінари та самостійні види робіт. Як правило, будь-який курс побудований у вигляді авторської комбінації цих засобів навчальної діяльності.

У цій доповіді буде запропоновано новий підхід, що базується на виконанні учнями чи студентами самостійного дослідницького проєкту. Дослідницький проєкт передбачає проведення студентами чи учнями самостійного теоретичного, чисельного чи навіть експериментального дослідження для вирішення відносно складної творчої задачі.

Теми для дослідницьких проєктів пропонуються провідними світовими вченими з урахуванням наявних знань та навичок учнів чи студентів. Як правило, для виконання проєкту студенти об'єднуються в групи по 2-4 особи, хоча й індивідуальне виконання проєкту є допустимим. Для кожного проєкту роботу студентів супроводжує ментор, що має досвід наукової роботи або виконання подібних проєктів. У ролі ментора можуть виступати студенти старших курсів, аспіранти, молоді вчені та провідні науковці. До задач ментора входить допомога групі студентів у постановці та обранні методів вирішення задач, допомога у вирішенні супровідних технічних питань, забезпечення правил безпеки при виконанні експериментальних досліджень, поради щодо вивчення літератури та підготовки фінального звіту. У рамках декількох семінарів наприкінці семестру, студенти презентують результати їхнього дослідження, проведеного упродовж декількох тижнів. Частка оцінки виставляється одними студентами іншим студентам у форматі наукового рецензування, що вчить критично оцінювати чужу наукову роботу.

Перевагами такого підходу є значна частка самостійної роботи студентів, самостійне вивчення нового матеріалу в комфортному для студента темпі, вміння приймати рішення та застосовувати отримані знання та вивчені методики, ознайомлення з науковими публікаціями, підготовка презентації та захист отриманих результатів, критична оцінка інших наукових результатів. Недоліками такого підходу є вузька специфічність тематики,

недостатній час на виконання проєкту, ризик поверхневого розуміння без заглиблення в деталі, потреба в значній кількості цікавих ідей та менторів, проблеми відкритої науки.

У доповіді будуть наведені деякі конкретні приклади та результати таких дослідницьких проєктів, а також зроблена оцінка ефективності цього підходу. Успішне виконання подібних проєктів може потенційно бути оформлено в наукову публікацію [1], зокрема для журналів першого квартиля (Q_1) згідно баз даних Web of Science та/або Scimago [2].

Список використаних джерел

[1] A. Hrinchenko, O. Mankovska, and O. Yermakov, "Engineering of hyperbolic metasurfaces based on gold nanodisks", 2022 IEEE 2nd Ukrainian Microwave Week (UkrMW), pp. 434-438, 2022.

[2] A. Girich, L. Ivzhenko, A. Hrinchenko, S. Tarapov, and O. Yermakov, "Manipulation over surface waves in bilayer hyperbolic metasurfaces: topological transition and multidirectional canalization", IEEE Microwave and Wireless Technology Letters, vol. 33, № 3, pp. 367-370, 2023.

ДІЛЬНИК НАПРУГИ ПРИСКОРЮВАЛЬНОЇ ТРУБКИ ДЛЯ ПРОТОННО - ПРОМЕНЕВОЇ ЛІТОГРАФІЇ

Ігнат'єв І. Г., к.ф.-м.н., с.н.с.

Інститут прикладної фізики НАН України, Суми, Україна

На даний час в Інституті прикладної фізики НАН України (ІПФ НАН України) ведуться роботи з розробки та створення малогабаритної установки протонно-променевої літографії високої роздільної здатності [1].

У роботі [2] представлено концептуальний проєкт електростатичного прискорювача (ЕСП), що входить до складу установки.

Для отримання пучка протонів з енергією до 500 кеВ і струмом пучка до 1 нА в даному ЕСП використовується прискорювальна трубка (ПТ), виробництва фірми National Electrostatics Corp. (NEC) [3]. Як дільник напруги ПТ служить система електродів типу

«голка-площина» (коронуючий дільник напруги, далі КДН) (рис. 1).

Мета випробувань: верифікація можливості застосування КДН у ПТ ЕСП на напругу до 500 кВ. Дільник повинен забезпечувати стабільну роботу ПТ для забезпечення струму протонів пучка 1 нА при стабільності енергії 10^4 рр. [4].

Метод: вимірювання вольт-амперних характеристик (ВАХ) дільника. Випробування проводилися на відкритому повітрі, при температурі навколишнього середовища $t = 15 - 20^\circ\text{C}$, атмосферному тиску 750-760 Торр та відносній вологості повітря 50-90%.

Джерелом живлення ПТ служило

джерело високої напруги (ІВН) NCN 35-35000 виробництва фірми Fug (Гамбург, Німеччина).

На рис. 2 представлені ВАХ «позитивної корони» (+ джерела високої напруги на голках КДН).

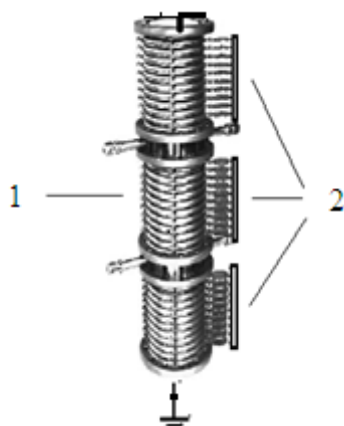


Рис. 1. Триплет секцій ПТ NEC: 1 — ПТ, 2 — КДН

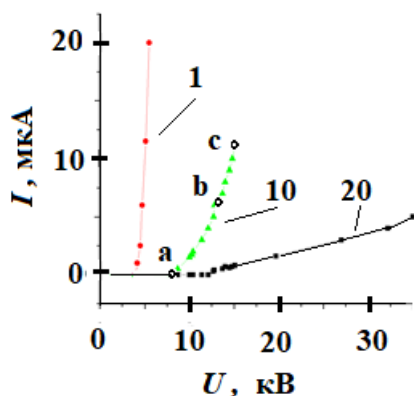


Рис. 2. ВАХ ПТ: 1,10,20 — проміжків ПТ

режиму.

Вплив полярності електродів. Полярність електродів мало впливає на напругу запалювання розряду. Струми «негативної корони» у кілька разів перевищують струми «позитивної корони», що загалом відповідає даним роботи [6].

Резистивні характеристики дільника напруги для N проміжків ПТ представлені в табл. 1.

Тут R_0 , R , $U_{\max}$ опору ділянок Оа, бс дільника і максимальна напруга дільника. Напруга початку розряду U_0 фіксувалася візуально (початок світіння корони).

1. Електрична міцність ПТ становить 8,4 кВ/см за нормальних умов, що дозволяє отримати робочу напругу $U_{\max} = 240$ кВ. В даному режимі (використовується вся ПТ) внаслідок недостатньої напруги ІВН NCN 35-35000 не вдалося вийти на режим можливості реєстрації початку розряду $I > 1$ мА.

2. Для режиму роботи до 160 кВ доцільно використовувати 2 секції ПТ (20 проміжків). Тут дільник працює у режимі (BC, $R = 5000$ МОм, табл. 1). Як ІВН може бути застосований NCN 100-100000 виробництва фірми Fug (Гамбург, Німеччина).

3. При експлуатації КДН необхідно забезпечити очищення КДН від пилу, слідів пробоїв та мікророзрядів; контроль вмісту озону в повітрі (гранично допустима концентрація (ГДК) у повітрі робочої зони $0,1$ мг/м³); захист від високої напруги: клітка Фарадея, захисне заземлення.

4. Необхідно збільшити електричну міцність ПТ.

Робота виконано у рамках теми НДР № III-110-20 номер держ. реєстрації 0120U101035 «Формування пучка в установках протонно-променевої літографії високої роздільної здатності (Beam formation in high-resolution proton beam writing facility)» НАН України та угоди про співпрацю між Національною Академією наук України та Національним центром наукових досліджень Франції (CNRS) № II-28-18 «Розробка детекторних систем для експериментів на прискорювачах та технологій для фізики прискорювачів».

Список використаних джерел

- [1] О. Г. Пономарьов, В. А. Ребров, та С. В. Колінько, «Устаткування протонно-променевої літографії на базі електростатичного прискорювача для фабрикації 3D мікро- і наноструктур» Nauka innov., 15(4), с. 62-69, 2019.
- [2] І. Г. Ігнат'єв та В. Б. Москаленко, «Прискорювач для протонно - променевої літографії» Сучасні проблеми експериментальної, теоретичної фізики та методики

ВАХ КДН має класичний вигляд [5-7]: Оа – ділянка запалення розряду, точка «а» відповідає напрузі запалювання розряду U_0 ; ab – висхідна лінія, $I \sim U^2$, bc – висхідна, майже лінійна залежність, "с" точка початку переходу коронного розряду в іскровий.

ВАХ у діапазонах відносної вологості повітря $\omega = 50-90$ %, тиску $P = 750 - 760$ Торр ідентичні з точністю до похибки вимірювань, що відповідають літературним даним [7].

Кількість голок. Напруги запалення розряду в межах точності вимірювань однакові, сила струму різко зростає (на порядок) при переході до штатного (3 голки)

Таблиця 1

N	U_0 , кВ	R_0 , МОм	R , МОм	$U_{\max}$, кВ
1	4,5	2000	14	8
10	8	4000	500	80
20	12	6000	5000	160
30	16	8000	-	240

навчання фізики: матеріали VIII Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю, м. Суми, 24-26 жовтня 2022 р. / за ред. С. О. Лебединського, с. 25-26, 2022.

[3] R. Hellborg, *Electrostatic Accelerators Fundamentals and Applications*, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2005.

[4] В. І. Возний, О. Г. Пономарьов, В. Б. Москаленко та С. О. Садовий, «Іонне джерело з електронним ударом для компактного мікрозонда» Сучасні проблеми експериментальної, теоретичної фізики та методики навчання фізики: матеріали VIII Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю, м. Суми, 24-26 жовтня 2022 р. / за ред. С. О. Лебединського, с. 15, 2022.

[5] J. S. Townsend, *Die Ionization der Gase*. Handb. der Radiologie, Berlin: Marxa, 1920.

[6] А. В. Токарев, *Коронний розряд*, Бішкек: КРСУ, 2009.

[7] Ф. Тэнэсеску, *Електростатика в техніці*, М: Енергія, 1980.

НДС КОРТИКАЛЬНОЇ КІСТКИ ЛЮДИНИ НА ПРИКЛАДІ ФАЛАНГ ПАЛЬЦІВ РУКИ

Ищенко О. А.^{1,2}, асп., асист.; Старостін А. Є.², студ.

¹ ТОВ «ІПП-Центр», Київ, Україна

² Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

Дослідження напружено-деформованого стану (НДС) фаланг кістки необхідні для розуміння взаємодії між силами, що діють на пальці руки та структурою кісток, суглобів і м'язів. В подальшому такі дослідження допомагають коректно підібрати матеріали і обладнання при виготовленні маніпуляторів.

Метою роботи є визначення максимальної критичної сили для кожної із фаланг пальця. Так в роботі [1] була також створена біомеханічна модель руки, проте дослідження полягали у знаходженні контактного тиску поверхні шкіри пальця. Контактний тиск в свою чергу необхідний для правильного захвату маніпулятором різних об'єктів. В іншій роботі [2], була створена тривимірна скінченно-елементна модель, де палець був змодельований як суцільне пів-циліндричне тіло.

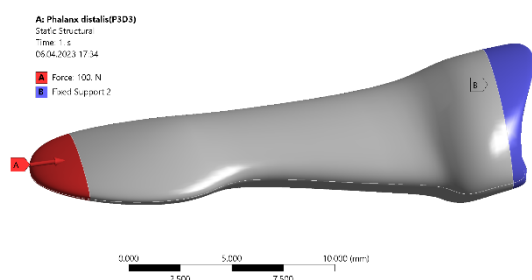


Рис. 1. Граничні умови, прикладені до моделі

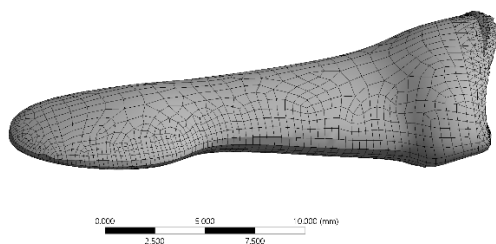


Рис. 2. Скінчено-елементна модель Phalanx distalis (P3D3)

Тому в даній роботі було створено геометрію для кожної з фаланг пальців руки. При цьому, так як губчаста тканина, яка є всередині кістки є набагато податливішою, то в розрахункову модель була включена лише кортикальна частина. Товщина такої частини встановлена від 0.5 до 5.2 мм для кожної фаланги з роботи [3]. Така мала товщина кортикальної частини дає можливість використовувати двовимірні елементи при розрахунку МСЕ.

Механічні характеристики були вибрані з роботи [4], де експериментально отримано модуль Юнга та коефіцієнт Пуассона.

Як граничні умови прикладено на кожну фалангу осьову силу 100 Н і защемлення в місці кріплення фаланги до іншої фаланги (показано на рис. 1). При побудові скінченно-елементної моделі використовувались

двовимірні елементи, консервативно задано найменшу товщину кортикальної частини кістки для всієї моделі. Скінченно-елементна модель для однієї з фаланг показана на рис. 2.

Після створення моделі та встановлення граничних умов було проведено розрахунки напружено-деформованого стану фаланги пальця. А саме фаланг Phalanx proximales, Phalanx media та , Phalanx distalis. Для кожної з фаланг руки було присвоєно індекс згідно з атласами анатомії а саме P1D3,P2D3,P3D3 відповідно де D-номер пальця, а P-номер фаланги.

Пораховані переміщення та напруження для кожної із фаланг наведені у таблиці 1. Можна побачити, що найбільші значення отримано для Phalanx distalis, тобто першої фаланги пальця. Це обумовлено також малою товщиною кортикальної кістки в цій фаланзі(0.5 мм), порівняно з іншими.

Для Phalanx distalis на рис. 3-рис.5 показано осьові переміщення, напруження за Мізесом та осьові напруження відповідно.

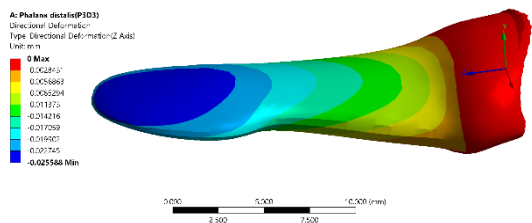


Рис. 3. Осьові переміщення

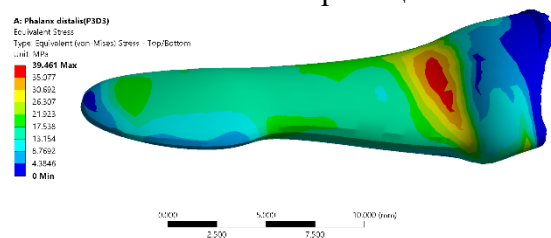


Рис. 2. Напруження за Мізесом

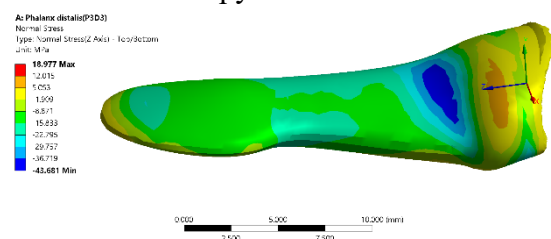


Рис. 3. Осьові напруження

показують що критична сила для такої моделі в 600 разів більша за ту що використовувалась в розрахунках.

Таблиця 1

	Phalanx distalis	Phalanx media	Phalanx proximales
Переміщення осьові	0.026 мм	0.0065 мм	0.0125 мм
Напруження (за Мізесом)	39.46 МПа	4.02 МПа	3.22 МПа
Осьові	43.68 МПа	4.11 МПа	3.27 МПа

Аналізуючи результати, можна побачити, що переміщення розподілені вздовж осі, а найбільші напруження (концентратори) знаходяться в місцях перегину кістки, тобто «крайові ефекти» відсутні і граничні умови прикладені коректно.

З іншої сторони скінченно-елементна модель була протестована для кількох різних сіток. Була обрана сітка при якій подальше згущення сітки не є доцільним.

В роботі показано розрахунок в першому наближенні фаланг пальців MCE в програмному середовищі ANSYS, що піддаються стиску, причому найбільш небезпечною при таких навантаженнях виявилась фаланга Phalanx distalis. Інші дві фаланги мають значно малі напруження і переміщення. Протестовані сітки показали хорошу збіжність, вибрана сітка що має найкращі показники якості/кількості елементів. Приймаючи до уваги що відносне видовження при розриві кортикальної кістки є не більшим 0.7%, отримані переміщення

Список використаних джерел

- [1] B. Faudot, J.-L. Milan, B. G. Monsabert, T. L. Corroller, L. Vigouroux, «Estimation of joint contact pressure in the index finger using a hybrid finite element musculoskeletal approach» Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering, p. 1-11, 2020.
- [2] Z. Alam, V. K. Dalla, A. Shrivastavac, «Finite Element Analysis of Fundamental Deformation of Robot Soft Finger» AIP Conference Proceedings 2341, p. 1-14, 2021.
- [3] T. Pastor, S. Fröhlich, T. Pastor, J. Spörri, A. Schweizer, «Cortical Bone Thickness, Base Osteophyte Occurrence and Radiological Signs of Osteoarthritis in the Fingers of Male Elite Sport

Climbers: A Cross-Sectional 10-Year Follow-Up Study» Study. Front Physiol, <https://doi.org/10.3389/fphys.2022.893369>, 2022.

[4] J. Z. Wu, D. E. Welcome, T. W. McDowell, X. S. Xu, R. G. Dong, «Modeling of the interaction between grip force and vibration transmissibility of a finger» Medical Engineering and Physics, p. 1–10, 2017.

ФОРМУВАННЯ ІНІЦІАТИВНОСТІ І ПІДПРИЄМЛИВОСТІ НА УРОКАХ ФІЗИКИ ЧЕРЕЗ ВИКОРИСТАННЯ ІНТЕРАКТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Калініченко Д. І, магістрант

Сумський державний педагогічний університет імені А. С. Макаренка, Суми, Україна

Розвиток різних технологій, виробництва, галузей господарства значною мірою залежить від конкурентоспроможності фахівців, їх здатності і готовності швидко вирішувати професійні завдання, реагувати на актуальні зміни та випереджувати їх за рахунок власного ініціювання, самостійно й усвідомлено приймати рішення тощо. У забезпеченні формування підприємницької культури та ініціативності особистості провідне значення має освіта.



Рис. 1. Ключові компетентності для навчання протягом життя

підприємливість визначаються як «уміння генерувати нові ідеї й ініціативи та втілювати їх у життя з метою підвищення як власного соціального статусу та добробуту, так і розвитку суспільства і держави. Вміння раціонально вести себе як споживач, ефективно використовувати індивідуальні заощадження, приймати доцільні рішення у сфері зайнятості, фінансів тощо» [1].

Компетентність «ініціативність і підприємливість» охоплює такі аспекти, як креативність, потяг до різноманітних інновацій, здатність ризикувати, а також уміння планувати заходи і реалізувати їх.

У навчальній програмі з фізики для 10-11 класів [2] зазначені уміння та ставлення у ключовій компетентності «Ініціативність і підприємливість» (рис. 2). У ній також вказані деякі навчальні ресурси фізики, які сприяють формуванню цієї компетентності: приклади успішних бізнес-проектів у галузі новітніх технологій (мікроелектроніка, нанотехнології, космічна техніка, електромобілі тощо), навчальні екскурсії на високотехнологічні підприємства, зустрічі з успішними підприємцями тощо.

Європейським парламентом і Радою Європейського Союзу в 2018 році було схвалено Рамкову програму оновлених ключових компетентностей для навчання протягом життя (рис. 1), в якій зафіксована, зокрема, і підприємницька компетентність.

У Концепції Нової української школи ініціативність і

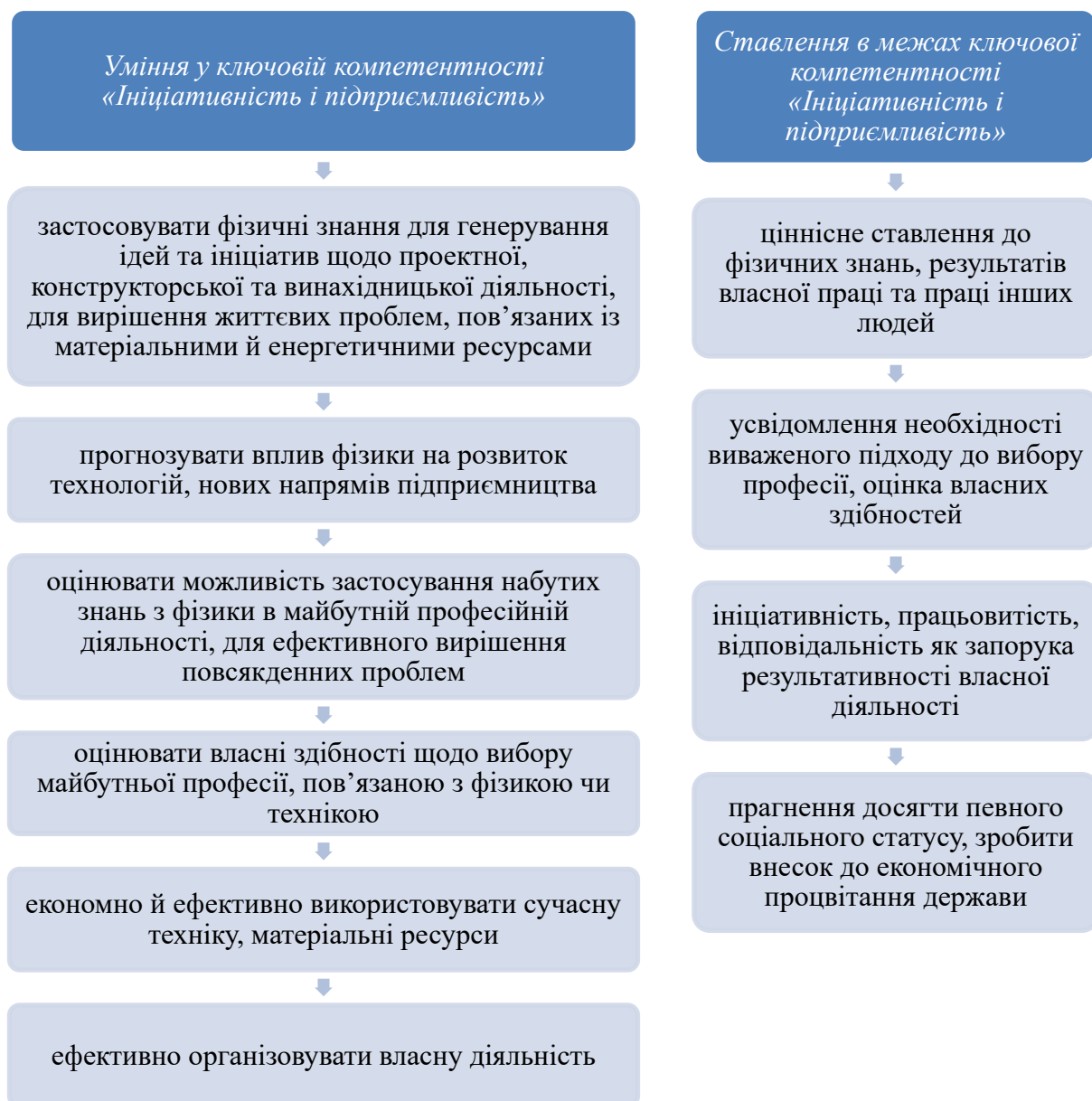


Рис.2. Уміння та ставлення у ключовій компетентності «Ініціативність і підприємливість»

Застосування системи різноманітних форм і методів інтерактивного навчання в проектно-технологічній діяльності старшокласників на уроках фізики дозволить поетапно розвинути у випускників нової української школи важливі складові ключової компетентності «ініціативність та підприємливість». При розробці та проведенні таких уроків потрібно робити акцент на тому, як наука використовується у реальних умовах.

Інтерактивні методи навчання – це група методів, для яких характерним є те, що в процесі цього навчання активність учнів перевершує активність учителя. Для формування ініціативності і підприємливості на уроках фізики через використання інтерактивних технологій доцільно органічно поєднувати різні прийоми інтерактивних технологій: «акваріум», «асоціативний куш», «коло ідей», «рольова гра», «ділова гра» «мікрофон», «навчаючи-вчусь», інсценізація, ток-шоу, дискусія, моделювання, групові дослідження, внутрішні або зовнішні кола, мозковий штурм, обмін думками, парні інтерв'ю, кейс-метод, віртуальні семінари, відеоконференції, вебінари, метод проєктів та ін. Завдяки цьому забезпечується активне формування підприємницької культури учнів старшої школи на уроках фізики.

Одним із методів інтерактивного навчання є дискусія. Він припускає цілеспрямований і впорядкований обмін думками та спрямований на розвиток критичного мислення й комунікативних здібностей, узгодження протилежних точок зору. Здобувачі освіти мають уміти виражати власні думки, наводити аргументи та поважати міркування інших. Тема дискусії повинна викликати емоційне переживання, що дозволить знайти істину в суперечці. Застосування дискусії сприяє налагодженню співробітництва, прийняття відповідальності за свою думку, пошуку інформації із застосуванням різних джерел.

При вивченні теми «Електричний опір» (10 клас) прикладом дискусії може бути обговорення запитання: «Чому птахи спокійно сидять на високовольтних проводах?». Під час цієї дискусії учні приходять до висновку, що птаха може бути вбито струмом, якщо він випадково хвостом або крилом доторкнеться до стовпа, тобто відбудеться заземлення через тіло птаха. В інших випадках, тіло птаха є розгалуженням кола з опором набагато більшим, ніж опір частини дроту між лапками птаха. Тому через тіло птаха проходить мала сила струму.

Цікавим предметом для обговорення є розжарення волоска лампи до білого кольору, але в той же час при тій самій силі струму й опорі провід майже не нагрівається. У ході дискусії учні висловлюють думки про те, що температура, до якої нагрівається провідник, визначається його здатністю віддавати тепло навколишньому середовищу, а вона залежить від площі поверхні провідника.

Призначенням дискусії є спонукання учнів замислитися над проблемою, уточнити й визначити свою позицію, навчитися аргументовано відстоювати власну точку зору, але, в той же час, усвідомлювати право інших мати свій погляд на обговорювану тему, бути індивідуальністю.

Навчання за допомогою інтерактивних методів викликає в учнів потребу ініціативності та підприємливості, здійснити перегляд своїх переконань і уявлень, приймати активну участь в громадському житті.

Список використаних джерел

[1] Концепція НУШ. <https://mon.gov.ua/storage/app/media/zagalna%20serednya/nova-ukrainska-shkola-compressed.pdf> (дата звернення 5.04.2023 р.)

[2] Фізика. Навчальні програми для загальноосвітніх навчальних закладів. <https://mon.gov.ua/storage/app/media/zagalna%20serednya/programy-10-11-klas/2018-2019/fizika-10-11-avtorskij-kolektiv-pid-kerivnicztvom-lokteva-vm.pdf> (дата звернення 5.04.2023 р.)

ВПЛИВ РАДІАЦІЙНО-ІНДУКОВАНИХ ДЕФЕКТІВ НА СТІЙКІСТЬ ДО ВАКУУМНИХ ПРОБОЇВ ПОВЕРХНІ МІДНИХ ЗРАЗКІВ.

**Карпенко О.Ю., м.н.с; Батурін В.А., к.ф.-м.н., зав.лаб.; Єрьомін С.О., к.ф.-м.н., н.с;
Роєнко О.Ю., м.н.с , Нагорний А.Г., к.т.н., с.н.с.**
Інститут прикладної фізики НАН України, Суми, Україна.

Впродовж останніх років в ІПФ НАН України проводяться спільні з ЦЕРН роботи з вивчення можливості зменшення ймовірності виникнення високовольтних вакуумних пробоїв у прискорювальних структурах сучасних прискорювачів. У цих роботах передбачається тестування матеріалів, що використовуються при виробництві ВЧ-структур прискорювачів. Одним з факторів, що впливають на високо вакуумні пробої є поверхневі властивості матеріалу електродів. Нами було запропоновано розглянути можливість поліпшення стійкості електродів прискорювальних структур до високо вакуумних пробоїв шляхом модифікації їх поверхні.

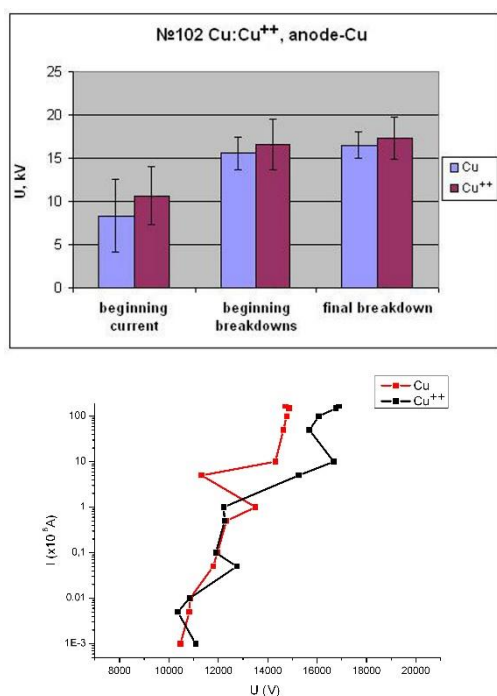


Рис.1. Пробивні характеристики для зразків, опромінених Cu^{2+} іонами з дозою опромінення $D=1.3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$.

проводилася на високодозному імплантері ПФ НАН України, що дозволяє опромінювати зразки одно або двозарядними іонами з енергіями до 300 кеВ. Для виключення можливості впливу впровадження

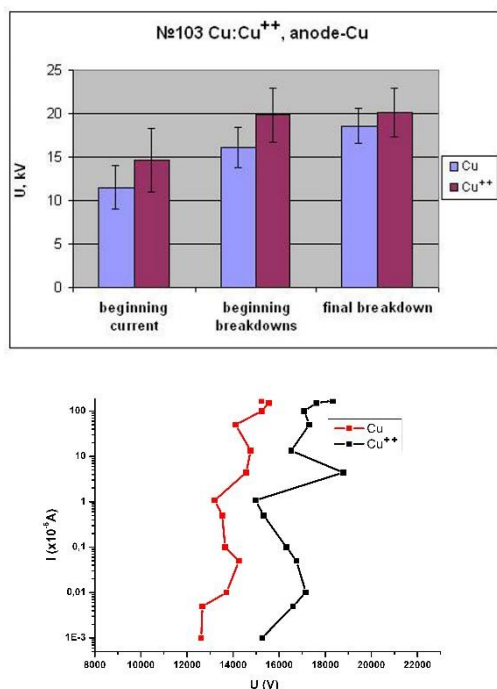


Рис.2 . Пробивні характеристики для зразків, опромінених Cu^{2+} іонами з дозою опромінення $D=3,5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$.

У цій роботі нами розглядається можливість обробки матеріалів методами іонної імплантації для підвищення електричної міцності прискорюючих структур шляхом напрацювання радіаційних дефектів та інтерметалідних включень в при поверхневих шарах матеріалу прискорюючих структур з ціллю суттєвого зниження темнового струму, а отже і підвищення стійкості до високовольтних пробоїв.

В основу радіаційних методів обробки речовини покладено процеси взаємодії заряджених частинок та випромінювання з твердим тілом та процеси подальшого утворення в ньому структурних дефектів. Ефективність цих процесів залежить від умов опромінення та природи матеріалу. Нашою метою була спрямована зміна приповерхневих властивостей мідних зразків, таким чином, щоб покращити їх стійкість до вакуумних пробоїв і при цьому визначити оптимальні параметри необхідної іонно-плазмової обробки поверхні цих структур.

Іонно-променева обробка зразків

Таблиця 1. Параметри імплантації .			
№ зразка	Тип іонів	Доза D, іон/см ²	Енергія E, кеВ
99	Cu^{2+}	$7 \cdot 10^{15}$	300
102	Cu^{2+}	$1.3 \cdot 10^{16}$	300
103	Cu^{2+}	$3.5 \cdot 10^{16}$	300

сторонніх атомів у приповерхневий шар зразків на їх властивості були обрані іони міді, якими опромінювалися мідні зразки при трьох різних дозах. В таблиці 1 приведені режими опромінення зразків.

Для дослідження зразків використовувалась установка [1], яка дозволяє вимірювати такі параметри пробою, як передпробийний струм, та фіксувати напругу при якій виникають пробої та напругу остаточного пробою. На зразках проводилися порівняльні вимірювання модифікованої та не модифікованої поверхні у безлічі точок, що надало можливості визначити ступень впливу модифікації поверхні на параметри пробою.

Дослідження мідних зразків на стійкість до пробоїв при їх опроміненні іонами Cu^{2+} показало, що результат змінюється залежно від дози опромінення, а отже і від кількості дефектів у приповерхневому шарі. При малих дозах опромінення, напруги при яких виникають пробої та напруги остаточного пробою можна порівняти з такими ж на чистій міді. Збільшення дози

опромінення мідними іонами до $D=1.3 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ призвело до збільшення напруги, при якій виникають передпробійні струми, напруги появи пробоїв і напруги остаточного пробою на опроміненій поверхні, в порівнянні з чистою міддю. У цьому випадку (рис.1) криві передпробійних струмів порівняні на імплантованій та не імплантованій поверхнях.

В результаті збільшення дози опромінення до $D=3,5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ змінилися тільки співвідношення передпробійних струмів та крива темного струму на поверхні (рис.2), яка була опромінена, прямувала в бік більш високих напруг.

Таким чином, при збільшенні дози опромінення зразків міді іонами Cu^{2+} , а значить і збільшенні числа напрацьованих дефектів у приповерхневих шарах спостерігається зменшення передпробійних струмів та збільшення різних значень характеристик пробою на 17 -28%

Список використаних джерел

1. V. A. Baturin, O. Yu. Karpenko, Ia.V. Profatilova, S. O. Pustovoitov, V. I. Miroshnichenko // ВАНТ, 2015, №4 (98), с. 294-297.

ОТРИМАННЯ СТИЙКИХ ДО АБРАЗИВНОГО ЗНОСУ ПОКРИТТІВ В4С МЕТОДОМ МАГНЕТРОННОГО РОЗПИЛЕННЯ

*Коломієць В. М., к.ф.-м.н., Кравченко С. М., м.н.с., Гончаренко О. І., асп.
Інститут прикладної фізики НАН України, Суми, Україна*

Карбід бору В4С має надзвичайно широкий комплекс хімічних, фізичних і механічних властивостей. Завдяки цьому він широко використовується у сучасній техніці. Висока твердість (третій за твердістю матеріал після алмазу та кубічного нітриду бору) дозволила йому зайняти важливе місце серед абразивних матеріалів.

В атомній енергетиці карбід бору широко застосовується як матеріал стрижнів, що регулюють перебіг ядерних реакцій, в металургії використовується як складова частина сумішей для дифузійного борування сталей і тугоплавких металів. З карбіду бору виготовляють піскоструминні сопла, сопла для розпилення пульп та добрив. Він має виключно високу хімічну стійкість у різних агресивних середовищах.

В сучасній промисловості для отримання зносостійких покриттів все більш широко застосовується метод магнетронного розпилення. Це обумовлено можливістю отримання покриттів з покращеними фізико-механічними властивостями (твердість, адгезія, шорсткість тощо) та з можливістю управління цими властивостями за рахунок зміни потужності розряду, потенціалу зміщення на підкладці, тиску або складу газового середовища [1; 2].

Виходячи з вищесказаного метою роботи було напилення захисного покриття В4С на деталь складної форми зі сплаву NiSpan C902.

Отримання покриттів проводилося у вакуумній установці ВУП-5М за допомогою магнетронного випаровувача виробництва ІПФ НАН України з діаметром мішені 60 мм [3]. Оскільки В4С є напівпровідником, то для збільшення швидкості напилення використовувався високочастотний блок живлення МВ-05 потужністю до 500 Вт. Було проведено серію напилень захисних покриттів В4С при різних параметрах технологічного процесу (потужність блоку живлення 100-250 Вт, тиск аргону 0,5-5 Па, температура підкладки 100-250 °С, напруга зміщення 0-100 В). Слід зазначити, що головним фактором, що покращує якість плівкового покриття, є прикладення напруги зміщення на підкладку. Застосування напруги зміщення істотно змінює структуру покриття В4С: пористість покриття зникає, і плівка стає щільною структурою. Покриття, які отримані із застосуванням потенціалу зміщення, стають менш прозорими та їх колір при товщині понад

500 нм стає чорним. Але в усіх випадках, скоріш за все, через напруженість покриття, відбувається його розтріскування та обсіпання плівки.

Оскільки ніобій є тугоплавким матеріалом та має досить гарну адгезію до сталі, то для вирішення проблеми розтріскування покриття В4С було введено проміжний шар з ніобію. В результаті повторного проведення серії напилень при різних технологічних параметрах, було встановлено, що найкращі показники твердості та адгезії були досягнуті при потужності розряду 200 Вт, тиску аргону 2 Па, температурі підкладки-деталі 250 °С, напрузі зміщення 80 В. Отримані покриття при вказаних параметрах мають чорний колір, склоподібну поверхню та суттєву стійкість до механічного зносу.

Список використаних джерел

- [1] Г. В. Москвитин, Е. М. Биргер, А. Н. Поляков, Г. Н. Полякова, «Наукоемкие технологии нанесения упрочняющих покрытий» Металлообработка, №1, с. 44–49, 2015.
- [2] А. И. Кузьмичев, Магнетронные распылительные системы: Кн.1. Введение в физику и технику магнетронного распыления, К.: Изд. Аверс, 2008.
- [3] В. М. Коломієць, О. І. Шкурят, О. І. Гончаренко, Ю. А. Павленко, І. Г. Чижов, П. Є. Самойлов, «Магнетронна розпилювальна система з плавним регулюванням ступеня незбалансованості магнітного поля», матеріали конференції СПЕТФ-2022, с. 87-88, 2022.

ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ І СУЧАСНІ АКТУАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ ЯДЕРНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

Kul'ment'ev A. I.¹, д.ф.-м.н, снс, пров.н.с.; Flat A.Ya.² Dr. rer. nat., Associate Professor, Quality manager,

¹*Institute of Applied Physics of the Academy of Sciences of Ukraine, Sumy, Ukraine*

²*Techniques Surfaces member of HEF Groupe, Lichtenberg / Erzgebirge, Deutschland*

Атомна енергетика є найбільшим джерелом низьковуглецевої електроенергії в країнах Організації Економічного Співробітництва та Розвитку (OECD), із загальною часткою виробництва електроенергії 18% у 2013 р. і, як передбачається в [1] (Рис.1), продовжить і в 2050 р. відігравати важливу роль у зниженні викидів парникових газів в енергетичному секторі при одночасному підвищенні надійності постачання, підтримці різноманітності видів палива та забезпеченні масштабного виробництва електроенергії при стабільних виробничих витратах.

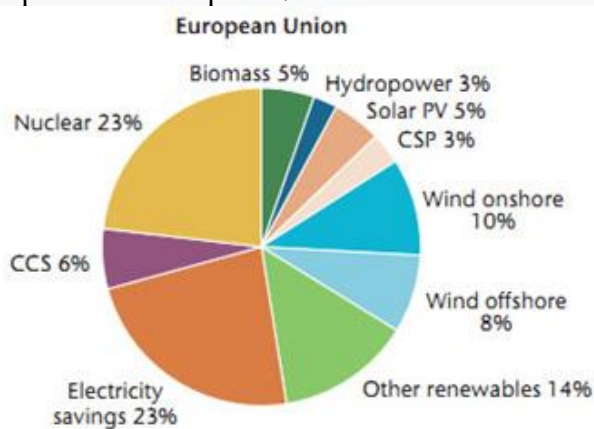
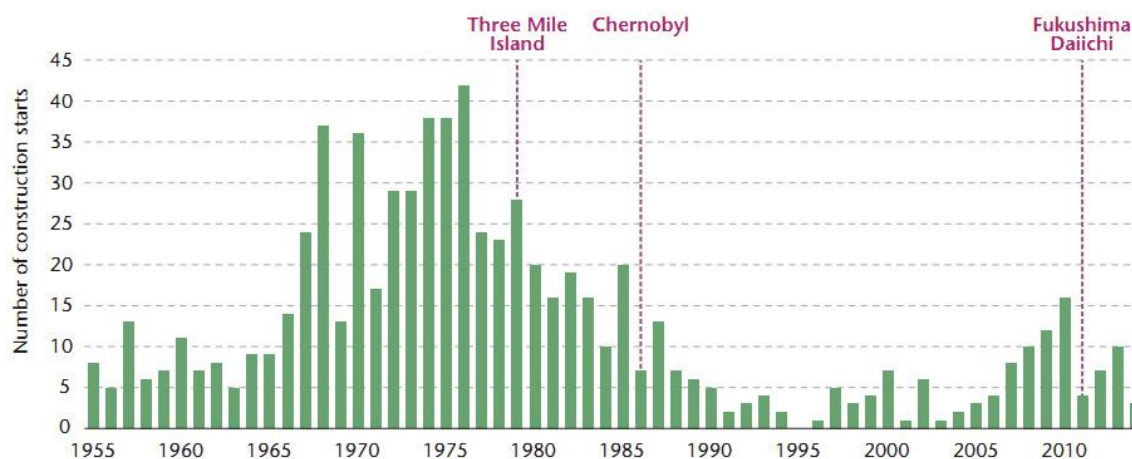


Рис.1. Скорочення викидів парникових газів в електроенергетиці до 2050 р. у 2DS у Євросоюзі [1].

Сценарій 2DS – технології, необхідні у всіх секторах енергетики, щоб викиди CO₂ у 2050 р. скоротилися наполовину порівняно з рівнями викидів 2009 р., що дозволяє довгострокове підвищення глобальної температури лише на 2°C.

Традиційним індикатором активності в галузі ядерної енергетики є кількість закладених в поточному році АЕС (Рис.2). З малюнка видно, які негативні наслідки цей процес надає кожна велика аварія. У 2010 р. була опублікована «Дорожня карта ядерних технологій», було розпочато 16 нових будівництв – число, яке не досягалося з 1985 р. – і багато хто очікував «ядерного ренесансу». Проте аварія на АЕС Фукусіма

безпосередньо вплинула на короткостроковий і середньостроковий розвиток ядерної енергетики в багатьох країнах.



Source: IAEA Power Reactor Information System (PRIS).

Рис.2. Роки початку будівництва нових реакторів поділу та їх число з 1955 до 2014 р.р.

Аварія на АЕС Фукусіма стала результатом Великого землетрусу в Східній Японії, із зареєстрованою магнітудою 9 балів за шкалою Ріхтера - найсильнішого з будь-коли зареєстрованих в Японії, - і цунамі, що послідувало за ним, що обрушився на електростанцію. Блоки 1, 2 і 3 перебували в експлуатації під час аварії і були зупинені після землетрусу, а аварійні енергоблоки включилися при відключенні зовнішнього джерела живлення. Однак більшість із них вийшли з ладу, коли на станцію обрушилося цунамі, і підвали реакторних будівель були затоплені. Як наслідок, можливості реакторів щодо відведення залишкового тепла були втрачені, що призвело до тяжкої аварії з деградацією активної зони, утворенням водню (та наступними вибухами) та викидом радіоактивних матеріалів у навколишнє середовище внаслідок часткового руйнування будівель реакторів. Через три роки після аварії в Японії глобальна ситуація з атомною енергетикою покращується і кількість нових будівництв знову зростає. Тим не менш, рівень підключення до мережі все ще занадто низький, щоб до 2025 досягти цільового показника 2DS.

Аварія на Фукусімі була найгіршою після Чорнобильської аварії в 1986 році, отримавши 7-й рейтинг за Міжнародною шкалою ядерних подій (INES), на тому ж рівні, що і Чорнобильська. Однак, на відміну від аварії в Україні, десятки тисяч людей були евакуйовані з району станції і приховані до того, як сталася велика частина викиду радіоактивних речовин у навколишнє середовище. У 2014 р. Науковий комітет ООН з дії атомної радіації опублікував свій остаточний звіт про радіологічні наслідки аварії, в якому зроблено висновок про те, що радіоактивні викиди Фукусіми склали від 10% до 20% від викидів Чорнобильської аварії.

Смертельних випадків внаслідок надмірного опромінення зафіксовано не було, хоча на АЕС мали місце кілька травм, пов'язаних із землетрусом та цунамі. Великі території навколо станції були забруднені радіоактивними опадами, а запровадження дуже низьких норм радіаційного опромінення не дозволило евакуйованим повернутися до своїх будинків. Було прийнято багатомільярдну програму «відновлення» для знезараження навколишнього середовища, але знадобилося кілька років, перш ніж людям було дозволено повернутися до своїх будинків.

На найближчі перспективи розвитку ядерної енергетики у багатьох країнах вплинула аварія на АЕС Фукусіма. Хоча аварія не викликала безпосередньо пов'язаних з радіацією жертв, вона викликала стурбованість щодо безпеки АЕС і призвела до падіння громадської думки, а також зміни енергетичної політики в обмеженій кількості країн. Це, поряд з економічною кризою, що знизила попит на електроенергію в багатьох країнах, і фінансовою кризою, яка ускладнила фінансування капіталомістких проектів, призвела до зниження

загальних обсягів початку будівництва АЕС та темпів підключення їх до мереж.

Малі модульні реактори могли б розширити ринок ядерної електроенергії, забезпечуючи невеликі енергосистеми або ізольовані ринки, де більші атомні електростанції не підходять. Модульний характер цих проектів також допоможе усунути фінансові бар'єри.

Однак реалізація цього та безлічі інших проектів обов'язково пов'язана з підготовкою міжнародного багатотисячного ресурсу кваліфікованих менеджерів. Для вирішення цього завдання останнім часом все частіше робляться міжнародні зусилля з активною участю вищої школи, Академії наук, приватного сектора, виробничих структур тощо. Щодо цього організатори конференції так само могли б прийняти свою програму з урахуванням великого досвіду експлуатації АЕС в Україні в цілому, а також курсів спеціалізованих лекцій, які в цій галузі читаються для аспірантів та співробітників нашого інституту.

Список використаних джерел

[1] IEA (International Energy Agency), Energy Technology Perspectives: Scenarios and Strategies to 2050, OECD/IEA, Paris. 2015.

[2] IAEA (International Atomic Energy Agency), Milestones in the Development of a National Infrastructure for Nuclear Power, International Atomic Energy Agency, Vienna. 2007.

ПОЛЬОВА ЕЛЕКТРОННА ЕМІСІЯ ПРИ НАЯВНОСТІ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ ВКРАПЛЕНЬ В МЕТАЛІ

***Лебединська Ю. С., аспірант; Лебединський С.О., к.ф.-м.н., н.с.; Холодов Р. І., д.ф.-м.н.,
чл.-кор. НАН України, в.о. директора***

Інститут прикладної фізики НАН України, Суми, Україна

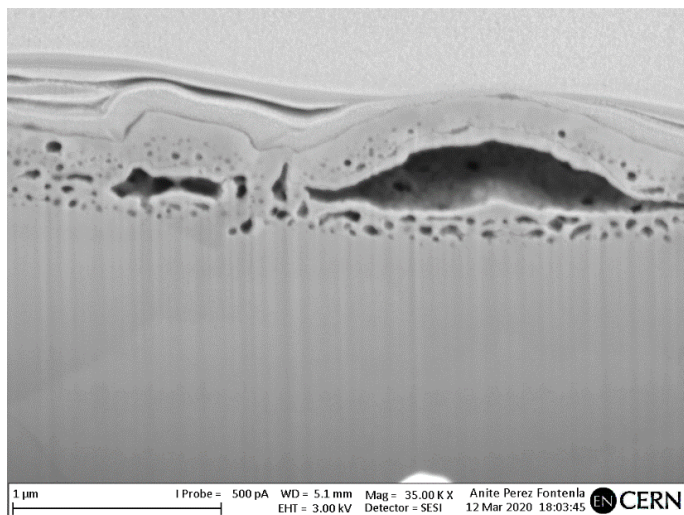


Рис. 1. Знімок зрізу металу Cu-OFE коліматора отриманий за допомогою СЕМ [1].

Під час дослідження конструкційних матеріалів майбутнього лінійного прискорювача CLIC (Compact Linear Collider) було встановлено, що поверхневий шар міді (основного матеріалу майбутнього прискорювача) на глибині близько 0,5 мкм сильно уражений порами [1]. Автори цієї роботи наголошують, що подібні явища описані в літературі через проникнення відносно нерозчинних газів (водню) у товщу металу. Саме тому нами було проведено теоретичні дослідження впливу пор заповнених діелектриком на струм польової електронної емісії,

яка є одним із початкових факторів виникнення високовакумних пробоїв

При розгляді дефектів у приповерхневому шарі металевого електроду доцільно використати моделі двобар'єрного потенціалу.

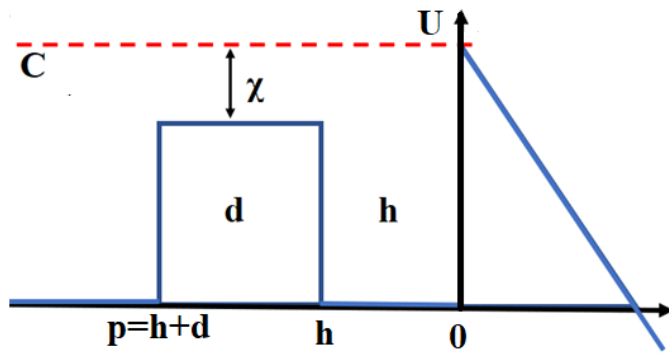


Рис. 2. Схематичне зображення потенціального бар'єру для системи метал-діелектрик-метал-вакуум

Розглянемо потенціальний бар'єр у випадку присутності діелектрику у приповерхневому шарі металу. Вигляд такого потенціального бар'єру зображено на рисунку 1.

Для розрахунку ймовірності тунелювання електрона через бар'єр розв'язується одновимірне незалежне від часу рівняння Шрьодінгера,

$$-\frac{\hbar}{2m} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \psi(x) + [U(x) - W] \psi(x) = 0,$$

де $\psi(x)$ - комплексна хвильова функція електрона, $\hbar$ - приведена стала Планка, m - маса електрона, $U(x)$ потенціал, заданий рівнянням (1), а W - початкова поздовжня енергія падаючих на поверхню металу електронів. Для спрощення, маса електрона m у всіх трьох областях (тобто в металі, діелектрику і вакуумі) приймається рівною масі спокою електрона.

У такому випадку можна записати хвильові функції електрона у наступному вигляді:

$$\psi_1 = e^{ik\sqrt{W}x} + B_1 e^{-ik\sqrt{W}x}$$

$$\psi_2 = A_2 e^{k\sqrt{V}x} + B_2 e^{-k\sqrt{V}x}$$

$$\psi_3 = A_3 e^{ik\sqrt{W}x} + B_3 e^{-ik\sqrt{W}x}$$

$$\psi_4 = T(Ai(-\eta) - iBi(-\eta))$$

де $k = \frac{\sqrt{2m}}{\hbar}$, $V = C - W - \chi$, $\eta = \xi \left(x - \frac{C-W}{eE} \right)$, $\xi = (k^2 eE)^{1/3}$, m - маса електрона, C - висота потенціального бар'єру, χ - енергія спорідненості електрону, $-e$ - заряд електрону, E - напруженість електричного поля.

Коефіцієнт прозорості бар'єру визначається як відношення густини ймовірності струму, що пройшов, до густини ймовірності падаючого струму $D(\varepsilon) = \frac{J_{\text{пройш}}(W)}{J_{\text{пад}}(W)}$.

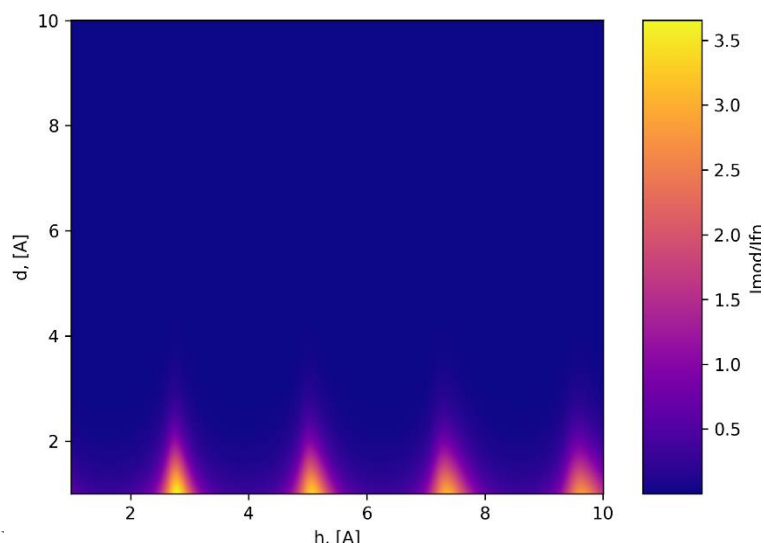
Накладання умов неперервності хвильової функції на границі метал-діелектрик, діелектрик-метал та метал-вакуум та використання типових значень роботи виходу металу та напруженості електричного поля дає змогу отримати аналітичний вираз для коефіцієнта прозорості потенціального бар'єру, зображеного на рисунку 1:

$$D = \frac{16\xi e^{-2k\sqrt{V}} d V k W^{\frac{3}{2}}}{\pi(V+W) \left(\left(k\sqrt{V} Bi(y) + \xi Bi'(y) \right) \sqrt{W} \cos(k\sqrt{W} h) + (Bi(y) kW - Bi'(y) \sqrt{V} \xi) \sin(k\sqrt{W} h) \right)^2}$$

де $y = \xi \frac{C-W}{eE}$.

На рисунку 2 схематично зображено потенціальний бар'єр на межі розділу метал-діелектрик-метал-вакуум. Для цього введено наступні позначення: h - глибина розташування нанорозмірної порожнини в поверхневому шарі металу, d - як діаметр нанорозмірної порожнини. Висота прямокутної сходишки потенціального бар'єру знижується на величину спорідненості електрону для діелектрику.

З формули можна побачити, що струм польової емісії з системи метал-діелектрик-метал-вакуум сильно залежить від товщини діелектричного шару. Зі збільшенням товщини струм буде експоненційно зменшуватися. У той же час залежність від глибини розташування діелектричного шару знаходиться у аргументі синуса та косинуса. Це означає, що струм має носити осциляційний характер. Легко побачити, що умова максимуму буде:



діелектрик-метал-вакуум у залежності від розміру пори d та товщини шару металу h

спорідненості $\chi = 1$ еВ. З рисунка видно, що струм дійсно має резонансний характер. Також варто відмітити, що у випадку коли розмір дефекті (або їх ефективний розмір) $d > 0.2$ нм має спостерігатися зменшення струму польової електронної емісії не залежно від глибини їх залягання. Тому дослідження впливу діелектричних вкраплень у приповерхневому шарі металу є важливим у вивченні феномену високовакуумного високоградієнтного пробою.

$$h = \frac{\sqrt{2}\pi\hbar}{4\sqrt{mW}} (2n + 1), n = 0, 1, 2, \dots$$

На рисунку 3 зображено результат чисельного знаходження густини струму польової емісії виращеного у одиницях струму з ідеальної поверхні у випадку коли енергія

Список використаних джерел

- [1] А. Т. Fontenla, «MeVArc,» в *Microscopy investigation of the surface behaviour of different materials after H- irradiation in different conditions*, Geneva, 2021.

ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПОР У ПРИ ПОВЕРХНЕВОМУ ШАРІ МЕТАЛУ НА ГУСТИНУ СТРУМУ ПОЛЬОВОЇ ЕМІСІЇ

Лебединський С.О., к.ф.-м.н., н.с.; Лебединська Ю. С., аспірант; Холодов Р. І., д.ф.-м.н., чл.-кор. НАН України, Сторіжко В.Ю., д.ф.-м.н., академік НАН України
Інститут прикладної фізики НАН України, Суми, Україна

Одним із типів радіаційних дефектів, які утворюються при опроміненні є пори. Саме тому нами було проведено теоретичні дослідження впливу такого роду дефектів на струм польової електронної емісії, яка є одним із початкових факторів виникнення високовакуумних пробойів. При розгляді дефектів у приповерхневому шарі металевго електроду доцільно використати моделі двобар'єрного потенціалу. На рисунку 4 а) схематично зображено пори, які виникають внаслідок модифікації поверхні, наприклад, під дією опромінення іонами. Також дана модель потенціального бар'єру дає змогу врахувати ще один клас дефектів: нанокластери розміром в декілька нанометрів на поверхні металевго електроду. Якщо в поверхневому шарі металу є нанорозмірна пустота, то модель представляє h як відстань від межі розділу метал-вакуум до місця розташування нанорозмірної пустоти в поверхневому шарі металу, а d - як діаметр нанорозмірної пустоти.

Якщо нанокластер розташований на поверхні металу, то параметри бар'єру можна пояснити як h - розмір нанокластера, d - товщина дипольного шару контакту метал-метал. У подальшому для зручності ми будемо розглядати пори у приповерхневому шарі, але всі викладки будуть справедливими також і для нанокластерів.

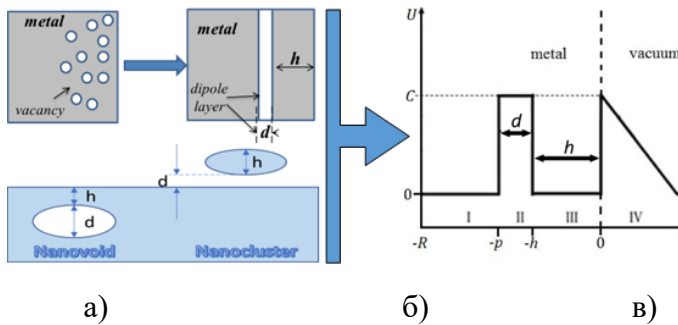


Рис. 1. Модель утворення нанорозмірних дефектів у приповерхневому шарі металу: а) нанопори в приповерхневому шарі; б) нанокластери на поверхні; в) схема двоступеневого потенціального бар'єру, що описує дані дефекти

У загальному випадку формула для знаходження густини струму польової електронної емісії має вигляд:

$$j = \int_0^U N(W) D(W) dW, \quad (2)$$

де $N(W)$ – кількість електронів, що падають на поверхню одиничної площі за одиницю часу з кінетичною енергією W по нормалі до поверхні, $D(W)$ – коефіцієнт тунелювання електронів крізь потенціальний бар'єр. У випадку ідеально гладкої поверхні цей струм був знайдений Фаулером і Нордгеймом [1] і дорівнює:

$$j_{F-N} = A(eE)^2 \exp\left(-\frac{B}{eE}\right), \quad (3)$$

де A і B константи, що залежать від властивостей металу.

Для знаходження струму польової електронної емісії з урахуванням нанорозмірних дефектів у приповерхневому шарі металу j_{mod} нами було знайдено коефіцієнт тунелювання електрону крізь потенціальний бар'єр, зображений на рисунку 4 в). Коефіцієнт тунелювання у випадку двоступеневого потенціального бар'єру має вигляд:

$$D = \frac{16(C-W)^{3/2} W^{3/2} e^{-\frac{4k(C-W)^{3/2}}{3eE}} e^{-2k\sqrt{C-W}d}}{c(2\sqrt{W}\sqrt{C-W}\cos(k\sqrt{W}h) + (C-2W)\sin(k\sqrt{W}h))^2}, \quad (4)$$

де C – висота потенціального бар'єру, W – енергія електрону, $-e$ – заряд електрону, E – напруженість електричного поля, m – маса електрона, $k = \frac{\sqrt{2m}}{\hbar}$. З виразу (4) можна побачити, що струм буде мати резонансний характер. Умова максимуму коефіцієнта тунелювання [2]:

$$h = \frac{\lambda_B}{4} (2n + 1), n = 0, 1, 2, \dots \quad (5)$$

де довжина хвилі де Бройля для електрона $\lambda_B = \frac{\sqrt{2\pi\hbar}}{\sqrt{mW}}$. Також з формули (4) видно, що зі збільшення розміру дефекта d струм повинен експоненційно згасати. У випадку відсутності дефектів ($d = h = 0$) вираз (4) приймає відомий вигляд коефіцієнта тунелювання з гладкої поверхні металу [1].

На рисунку 1 в) область I – внутрішня область металу, області II і III – області модифікації металу, область IV – потенціальний бар'єр на межі розділу метал-вакуум. Вплив на густину струму польової емісії вакансій і пор ангстремних розмірів, що утворюються при опроміненні поверхні металу, враховується введенням ефективної товщини дипольного шару d , яка є сумою об'ємів всіх утворених дефектів і пустот модифікованої поверхні (Див. Рис. 4 а)-б)).

Нами було чисельно розраховано густину струму польової емісії з модифікованої поверхні металу j_{mod} за формулою (2). Порівняння значень густини струму польової емісії з поверхні з нанопорожнинами в приповерхневому шарі металу j_{mod} та струму з ідеалізованої поверхні металу j_{F-N} показано на рисунку 5. На ньому зображено відношення струму з модифікованої поверхні до струму з ідеальної поверхні для різних розмірів дефектів d та глибини їх розташування h при постійному значенні локальної напруженості

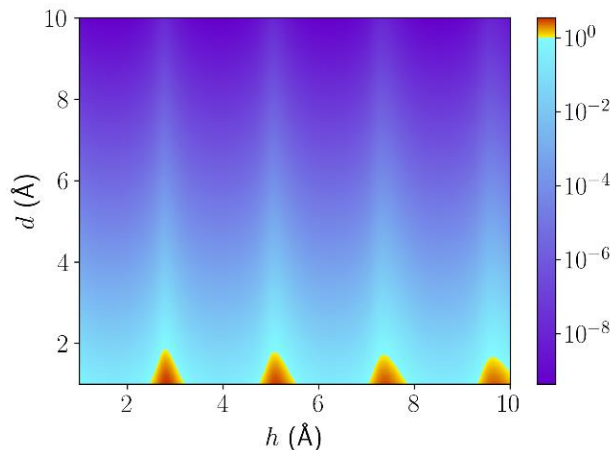


Рис. 2. Графічні залежності струму з модифікованої поверхні в залежності від розміру пори d та товщини шару металу h .

електричного поля $E_{loc} = 5 \text{ GV}/m$. На рисунку 2 представлено кольорову карту залежності струму з модифікованої поверхні вираженого у одиницях струму Фаулера-Нордгейма в залежності від розміру вакуумного проміжку d та товщини шару металу h при постійному значенні локальної напруженості електричного поля $E_{loc} = 5 \text{ GV}/m$. З рисунка можна зробити висновок, що струм дійсно має резонансний періодичний характер, що не залежить від розміру дефекту d . Максимальні значення струму, що посилюється до 3,5 разів, також як і у випадку максимумів коефіцієнта тунелювання (4), повторюються з періодом, що відповідає довжині хвилі де Бройля (5).

Також варто відмітити, що у випадку коли розмір дефекті (або їх ефективний розмір) $d > 0.2 \text{ nm}$ має спостерігатися зменшення струму польової електронної емісії з модифікованої поверхні не залежно від глибини їх залягання. Тому модифікація поверхні, яка приводить до утворення нано пор у приповерхневому шарі матеріалу, дійсно може бути одним зі шляхів підвищення стійкості матеріалів прискорювальних структур до пробойів.

Список використаних джерел

- [1] R. H. Fowler, L. Nordheim «Electron emission in intense electric fields» Proceedings of the Royal Society of London. Series A, т. 119, № 781, pp. 173-181, 1928
- [2] I.I. Musiienko, S. O. Lebedynskyi, R. I. Kholodov “Nanoclusters and nanoscale voids as possible sources of increasing dark current in high-gradient vacuum breakdown” The European Physical Journal D, 2022, V. 76 (4), p. 1-10.

АКТУАЛЬНІ ПИТАННЯ РЕАЛІЗАЦІЇ ФАЗОВОГО КОНТРАСТУ НА КОМПАКТНИХ ДЖЕРЕЛАХ РЕНТГЕНІВСЬКОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

Лебедь О.А., д. ф.-м. н., с.д., Овчаренко А.Ю., аспірант; Стародуб С.С., к. ф.-м. н., с.н.с., Крамченков А.Б., к. ф.-м. н.

Інститут прикладної фізики НАН України, Суми, Україна

Розробка технологій на основі рентгенівських фазових зображень представляється як один з найбільш перспективних методів медичної діагностики. Висока контрастність у цьому способі досягається шляхом запису та обробки інформації щодо зміни фазового профілю рентгенівської хвилі, що проходить через об'єкт. Значення фазового зсуву може істотно перевищувати рівень поглинання рентгенівського випромінювання (РВ), що

забезпечує унікальні можливості для розрізнення об'єктів з малою різницею щільності. Поєднання методів вивчення біологічних об'єктів на основі поглинання та фазового контрасту є основою для створення рентгенівських томографів нового покоління. Однак слід зазначити, що отримання рентгенівських контрастних зображень створює ряд наукових, технологічних і технічних проблем, які можуть бути вирішені шляхом використання сучасних технологій в області прискорювачів частинок, рентгенівської оптики, детектування випромінювання, інтерпретації та обробки зображень.

Практична реалізація методів рентгенівського фазового контрасту (РФК) висуває певні вимоги до характеристик усіх елементів установки (див. схему нижче).



Основними компонентами експериментальної установки РФК є джерело РВ, канал об'єкту дослідження, елементи рентгенівської оптики (за необхідності в залежності від методу), система реєстрації РВ. Джерело випромінювання можна розглядати як ключову частину майбутніх рентгенівських РФК томографів. Основними характеристиками джерела є фізичний механізм генерації випромінювання, інтенсивність, спектр, енергія фотонів, когерентність, розмір області активного випромінювання, а також лінійні розміри установки та її вартість. Реалізація різних методів РФК висуває вимоги до інтенсивності та просторової когерентності випромінювання, суттєво обмежуючи використання таких поширених джерел, як рентгенівські трубки.

Експериментальна можливість РФК методом вільного поширення спочатку була показана на джерелах синхротронного випромінювання, але через великі розміри та високу ціну такого обладнання його широке використання в медичній діагностиці проблематично. Найбільш перспективними в цьому відношенні є високояскраві джерела рентгенівського випромінювання на основі компактних прискорювачів частинок. У цьому випадку енергія заряджених частинок перетворюється на рентгенівське випромінювання, наприклад, при гальмуванні частинок в конвертері з подальшою генерацією характеристичного випромінювання. Компактні прискорювачі мають реальні переваги з точки зору широкого застосування та ринкового потенціалу.

МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРКОЛЯЦІЙНОЇ ПОВЕДІНКИ ЕЛЕКТРОПРОВІДНОСТІ ПОЛІМЕРНИХ НАНОКОМПОЗИТІВ, ЯКІ МІСТЯТЬ ВУГЛЕЦЕВІ НАНОТРУБКИ

Лисенков Е. А., д.ф.-м.н., проф.; Гилко М. В., асп.; Біла В. О., асп.

Чорноморський національний університет імені Петра Могили, Миколаїв, Україна

Розробка теоретичних моделей і, безпосередньо, моделювання електропровідності нанонаповнених полімерних систем має важливе як прикладне, так і фундаментальне значення. З прикладної точки зору для виробництва електропровідних наноккомпозитних матеріалів важливим є прогнозування їх електричних властивостей. З фундаментальної

точки зору, моделювання, крім прогнозування, дозволяє визначити додаткові параметри системи, які неможливо встановити експериментально.

Існує велика кількість моделей, які можна використовувати для опису електричної поведінки полімерних нанокомпозитів [1, 2]. Найбільші труднощі для прогнозування електропровідності викликають системи на основі матриць з високою власною провідністю, у яких приріст електропровідності при досягненні порогу перколяції не великий і становить два-три порядки. Значні труднощі при моделюванні викликають полімерні системи, наповнені багатошаровими вуглецевими нанотрубками (БШВНТ). Нанотрубки створюють навколо себе перехідний шар, який значно впливає загальну на електропровідність системи. При детальному дослідженні перколяційного переходу в таких системах, які містять БШВНТ можна побачити, що електропровідність системи до досягнення порогу перколяції зростає нелінійно, що свідчить про внесок у загальну електропровідність інші провідні фази, окрім БШВНТ та полімерної матриці. Врахування всіх цих факторів дозволить створити більш досконалу модель для опису перколяційної поведінки електропровідності полімерних нанокомпозитів.

Враховуючи вищесказане, у роботі була запропонована модель для опису електропровідності полімерних систем, які містили БШВНТ у широкому діапазоні концентрацій наповнювача.

В основу запропонованої моделі електропровідності лягли наступні модельні припущення. Опираючись на результати структурних досліджень, у полімерних системах з функціоналізованими нанотрубками, можна припустити існування трьох основних шляхів та механізмів переносу зарядів:

1) перенос зарядів реалізується через прямі контакти між індивідуальними БШВНТ, які можуть утворити перколяційну сітку, проте ймовірність цього при низьких концентраціях наповнювача дуже мала. Ймовірність утворення перколяційної сітки зростає при наближенні до порогу перколяції (рис. 1а);

2) транспорт носіїв заряду відбувається через перколяційну сітку, яка утворена із розпушених агрегатів (рис. 1б). При утворенні розпушених агрегатів площа контакту наповнювача з полімером дуже велика, тому внесок контактного опору у загальний опір системи є визначальним, тому їх електропровідність є значно меншою. Ці агрегати є нестійкими і легко руйнуються при прикладанні навіть незначного механічного навантаження;

3) транспорт носіїв заряду відбувається через перколяційну сітку, яка утворена із щільних (компактних) агрегатів (рис. 1б). Такі агрегати характеризуються високою електропровідністю через високу концентрацію прямих контактів між ВНТ та малий внесок контактного опору. Ці агрегати є дуже міцними і не руйнуються при прикладанні досить великого механічного навантаження.

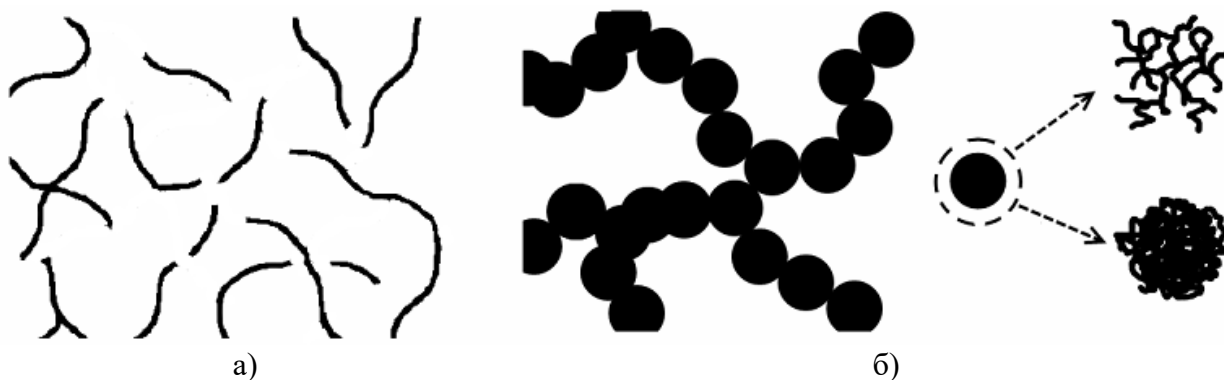


Рис. 1. Схематичне зображення перколяційної сітки, яка сформована з нанотрубок, що утворюють прямі контакти (а) та агрегатів з нанотрубок (б).

З урахуванням зроблених припущень загальну електропровідність системи полімер-БШВНТ можна визначити як функцію:

$$\sigma^* = f(\sigma_m, \sigma_{agg}, \sigma_c, \sigma_{surf}), \quad (1)$$

де: σ_m та σ_{agg} — електропровідності матриці та агрегатів, при чому електропровідність агрегатів визначається електропровідностями щільних (σ_c) та розпушених агрегатів (σ_{surf}).

Враховуючи вищезазначені модельні припущення, розроблену модель можна представити у вигляді комбінації внесків від різних провідних фаз, кожна з яких описується у рамках стандартної моделі критичної перколяції. У результаті цього електропровідність (σ) систем полімер-БШВНТ можна описати за допомогою наступного рівняння:

$$\sigma = \sigma_1(\varphi_{c_1} - \varphi)^{-s} + \sigma_2(\varphi - \varphi_{c_1})^{t_1} + \sigma_3(\varphi - \varphi_{c_2})^{t_2}, \quad (2)$$

де σ_1 , σ_2 , σ_3 — константи, які характеризують електропровідність матриці, розпушених та щільних агрегатів, відповідно, φ — масова частка нанонаповнювача, φ_{c_1} та φ_{c_2} — пороги перколяції, t_1 , t_2 та s — критичні індекси електропровідності.

У результаті проведеного моделювання експериментальних кривих електропровідності систем полімер-БШВНТ було встановлено, що запропонована модель з високим ступенем точності описує експериментальні дані.

Список використаних джерел

- [1] L.-J. Zhu, W.-Z. Cai, B.-Q. Gu and S.-T. Tu. "Tunneling percolation model of the electrical conductivity of particulate nanocomposites" Modern Physics Letters B, Vol. 23, № 10, pp. 1273-1279, 2009.
- [2] V.V. Klepko and E.A. Lysenkov. "Features of percolation transition in systems on the basis of oligoglycols and carbon nanotubes", Ukr. J. Phys., Vol. 60, № 9, pp. 944-949, 2015.

ВИВЧЕННЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНИХ ФІЗИЧНИХ ТЕОРІЙ В ШКІЛЬНОМУ КУРСІ ФІЗИКИ

Лобас Д. І., магістрант

Сумський державний педагогічний університет імені А. С. Макаренка, Суми, Україна

Фізика як навчальний предмет займає вирішальне місце у формуванні наукової картини світу учнів і тому грає роль базового компонента у змісті природничої освіти. Ідея сучасної освіти полягає в тому, щоб зміст шкільного курсу відповідав розвитку науки і методам пізнання, що є визначальними в ній.

Будь-яке знання по своїй природі система, тобто вона складається з певних елементів, які пов'язані між собою і розвиваються. Вищим результатом будь-якої системи є фундаментальна теорія. Ознакою фізичної теорії є замкненість систем понять, що дають вичерпні відповіді на певне коло питань. Формування та розвиток в учнів старшої школи системних фундаментальних знань з фізики являються метою навчання фізиці на профільному рівні та узгоджується з метою повної загальної середньої освіти [1]. З огляду на це, вивчення фундаментальних теорій фізики є важливою складовою. У рамках шкільного курсу фізики розглядаються:

- Механіка - закони Ньютона, рух тіл, сила, робота та енергія, механічні коливання та хвилі;

- Електромагнетизм – електричні та магнітні поля, закон Ома, закони Фарадея, електромагнітні хвилі;

Термодинаміка – температура, теплота та робота, закони термодинаміки, кінетична теорія газів.

У шкільному курсі фізики використовуються різні підходи до вивчення теорій, зокрема:

- Дедуктивний підхід: ми починаємо з формулювання загальних законів та теорій, а потім переходимо до прикладів та особливостей цих законів.

- Індуктивний підхід: ми починаємо з прикладів та конкретних ситуацій, а потім виводимо загальні закони та теорії.

- Активний підхід: ми пропонуємо учням активно досліджувати фізичні явища та заохочуємо їх до самостійного вивчення теорій.

Вивчення фундаментальних фізичних теорій відповідає основним завданням шкільного курсу фізики:

- формування у учнів системи фізичних знань на основі сучасних фізичних теорій (наукових фактів, понять, теоретичних моделей, законів, принципів) та розвиток у них вміння застосовувати отримані знання у пізнавальній практиці;

- учні оволодівають методологією природничо-наукового пізнання та науковим стилем мислення, усвідомлюючи сутність фізичної картини світу та застосовуючи їх для пояснення різних фізичних явищ та процесів;

- формування у учнів загальних алгоритмів розв'язання фізичних завдань із використанням різних методів, евристичних прийомів пошуку розв'язку задач;

- розвиток у учнів узагальнених експериментальних здібностей до проведення природничих досліджень з використанням методів фізичного пізнання (планування експерименту, вибір методу дослідження, вимірювання, обробка та інтерпретація отриманих результатів);

- формування у учнів наукового світогляду, розкриття ролі фізичних знань у житті людини та суспільному розвитку, виділення засобами фізики етичних проблем наукового пізнання, формування екологічної культури людини засобами фізики [1].

Для реалізації вищезазначених завдань використовуються різні методи вивчення, зокрема:

- Лекції та демонстрації;

- Практичні заняття: учні проводять різні експерименти та вправи, щоб навчитися застосовувати теорію на практиці та розвивати навички вимірювання та аналізу даних;

- Групова робота: учням пропонується виконувати проекти та завдання у групах, щоб розвинути свої комунікативні навички та полегшити взаємодію з іншими учнями.

Використання різних методів та підходів до вивчення фізики сприяє розвитку пізнавальних та практичних навичок учнів. Дає можливість зрозуміти фізичні закони та теорії, застосувати їх на практиці та розвинути навички спостереження, експериментування та аналізу даних.

Велике значення гуманітарного, світоглядного та виховного аспекту фізичних знань для фахівців усіх, у тому числі гуманітарних галузей, а також безпосередній зв'язок між рівнем технологічної грамотності населення і техногенною безпекою та обороноздатності країни визначає потребу та рівень вивчення фізики в старшій школі.

Список використаних джерел

[1] Фізика та астрономія. Навчальні програми для 10-11 класів закладів загальної середньої освіти (рівень стандарту, профільний рівень) Авторський колектив під керівництвом Ляшенка О. І. Затверджено Міністерством освіти і науки України (наказ № 1539 від 24.11. 2017 р.)

ОСОБЛИВОСТІ ВИКЛАДАННЯ МЕДИЧНОЇ І БІОЛОГІЧНОЇ ФІЗИКИ В МЕДИЧНОМУ УНІВЕРСИТЕТІ

Микитюк О.Ю., к. ф.-м. н., доц.

Буковинський державний медичний університет, Чернівці, Україна

Медична і біологічна фізика - це мультидисциплінарна сфера, яка охоплює застосування фізики, техніки та математики до кількісних досліджень біологічних і фізіологічних процесів. Місія розвитку цієї сфери полягає у розробці нових або вдосконалених діагностичних засобів і терапії для широкого кола захворювань людини, включаючи серцево-судинні та онкологічні захворювання. Ця мета найкраще може бути досягнена за допомогою міждисциплінарного навчання та спільних досліджень, які перетинають традиційні межі наукових і медичних дисциплін.

Розвиток медичної фізики в галузі візуалізації пройшов тривалий шлях від оптичної мікроскопії до функціональної візуалізації організму людини. Нові інноваційні можливості медичної діагностики обумовлені виникненням такої інтегрованої галузі як біомедична інженерія. Сильний зв'язок біомедичної інженерії з медичною біофізикою як приклад можна прослідкувати у галузі когнітивної нейрологічної науки в дослідженнях мускулоскелета. Для медицини всі методи візуалізації є надзвичайно важливими, особливо стереовізуалізація. Сюди відносять отримання трьохвимірної інформації про пацієнта за допомогою комп'ютерних та магніто-резонансних томографів, що дозволяє планувати методику хірургічного втручання, проектувати окремі органи тіла людини та їх частини, протези і ін.

Учені зуміли візуалізувати рух стерильного вірусу, з'єднаного з флуоресцентною міткою, в реальному часі за допомогою системи 3D-TrIm, яка являє собою два мікроскопи в одному: один фіксує вірус, що швидко рухається у пошуках входу в клітину, а другий формує тривимірні зображення навколишніх клітин.

Медичні дослідники зуміли розробити систему 4D-голограм, яка об'єднала результати багатьох медичних тестів, ультразвукового та рентгенівського дослідження і відтворила моделі тіл реальних пацієнтів. Отримане зображення проектується на три стіни та підлогу і значно допомагає медичним працівникам у їх роботі. Вже створені і такі голограми де, в залежності від кута під яким голограма оглядається, видно або шкірний покрив, або кровоносні судини чи кістяк. Також розроблені голограми де під різними кутами видно м'язову структуру людини, судини чи внутрішні органи. Такі досягнення є синтезом роботи багатьох вчених - фізиків, математиків, біоінженерів - та допомагають не тільки практичній медицині, а також можуть бути досконалыми навчальними засобами для студентів медичних університетів.

Допоможе зробити прорив у медицині відкриття можливості візуалізації звуку, оскільки лікарі зможуть робити необхідні точні акустичні візуалізації навіть через щільну кісткову тканину за допомогою довгих хвиль, що менш небезпечно для здоров'я пацієнта, ніж використання електромагнітних хвиль.

Вчені медичні і біологічні фізики для вирішення практичних завдань медицини зосереджені на таких базових напрямках: наноматеріали, фотоніка, квантова фізика, спінтроніка та магнетизм, біологічні матеріали. В процесі викладання медичної і біологічної фізики студентам медичного університету постійно доноситься інформація про нові технічні досягнення у вищеназваних напрямках, оскільки таким чином розширюється світогляд студента – майбутнього магістра медицини і пояснюються фізичні аспекти винаходів. У лікаря, який отримав базові знання з медичної і біологічної фізики та інших природничих дисциплін з високою ймовірністю виникатиме потреба не тільки використовувати те, що вже зроблено фізиками та інженерами, але й думати у напрямку створення майбутніх інновацій. Тому формуємо у студентів розуміння важливої ролі медичної та біологічної фізики для дослідницької і практичної медицини.

ВПЛИВ СИЛИ ДЗЕРКАЛЬНОГО ЗОБРАЖЕННЯ НА ФОРМУ ПОТЕНЦІАЛЬНОГО БАР'ЄРА ДЛЯ ПОЛЬОВОЇ ЕМІСІЇ З МЕТАЛІВ

Мусієнко І.І., м.н.с.

Інститут прикладної фізики НАН України, Суми, Україна

Формулу для густини струму j_{F-N} польової емісії з металу, не враховуючи вплив сили зображення на форму потенціального бар'єра біля поверхні металу, знайдено Фаулером Р.Г. і Нордгеймом Л.В. в [1] у формі:

$$j_{F-N} = A_0 (eE_0)^2 \exp\left(-\left(4k/(3eE_0)\right)\chi^{\frac{3}{2}}\right), \quad (1)$$

де $A_0 = (e\sqrt{\mu}) / (4\pi^2 \hbar \sqrt{\chi(\mu + \chi)})$, e – заряд електрона; E_0 – напруженість постійного електричного поля; χ – робота виходу; μ – електрохімічний потенціал; $k = \sqrt{2m}/\hbar$; m – маса електрона; $\hbar$ – зведена стала Планка.

Враховуючи вплив сили зображення на польову емісію, формулу Фаулера - Нордгейма для густини струму j_1 , знайдено у [2], представлено в [3,4,5] і записано автором дослідження в одиницях вимірювання Міжнародної системи одиниць (SI) у зручній формі:

$$j_1 = A(eE_0)^2 \exp\left(-\frac{B}{eE_0}v(y_F)\right) \cdot \alpha_T, \quad (2)$$

де $A = \frac{e}{16\pi^2 \hbar \chi t^2(y_F)}$; $B = \frac{4k}{3} \chi^{\frac{3}{2}}$; $v(y_F)$ – функція Нордгейма;
 $y_F = \sqrt{\frac{e_0}{4\pi\epsilon_0}} \cdot \frac{e\sqrt{eE_0}}{\chi}$; $e_0 = 1,602176 \cdot 10^{-19}$; $\epsilon_0 = 8,8541878 \cdot 10^{-12}$ Ф/м;
 $\sqrt{\frac{e_0}{4\pi\epsilon_0}} \approx 3,7947 \cdot 10^{-5} \frac{\sqrt{\kappa\epsilon} \cdot \sqrt{m^3}}{A \cdot c^2}$; $\alpha_T = \frac{\pi\beta_y k_B T}{e_0 \sin(\frac{1}{e_0} \pi\beta_y k_B T)}$; $\beta_y = 2k \frac{\sqrt{\chi}}{eE_0} t(y_F)$; T – температура; $k_B = 1,380649 \cdot 10^{-23}$ Дж/К.

Функцію Нордгейма записано у формі:

$$v(y) = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{1 + \sqrt{1 - y^2}} \left(E(k_y) - \left(1 - \sqrt{1 - y^2}\right) K(k_y) \right), \quad (3)$$

$$t(y) = v(y) - \left(\frac{2y}{3}\right) \left(\frac{dv(y)}{dy}\right), \quad (4)$$

де $y = \sqrt{\frac{e_0}{4\pi\epsilon_0}} \cdot \frac{e\sqrt{eE_0}}{C - W}$; $y(\mu) = y_F$, $E(k_y)$, $K(k_y)$ – повні еліптичні інтеграли другого і першого роду відповідно; $k_y = \frac{2\sqrt{1 - y^2}}{1 + \sqrt{1 - y^2}}$; $C = \mu + \chi$; W – компонента енергії, що відповідає руху електрона за нормаллю до поверхні металу [2]. Формула (2) достовірна, якщо $\beta_y k_B T < 0,7$, що допускає значення $\alpha_T \leq 5$ [5].

Відношення множників перед експонентами виразів (1) і (2): $A/A_0 \approx 0,516$.

Порівняння розглянутих величин показані графічно на рис. 1 і рис. 2, які побудовані за умов: $\chi = 4,5$ еВ, $\mu = 7,5$ еВ, $T = 300$ К.

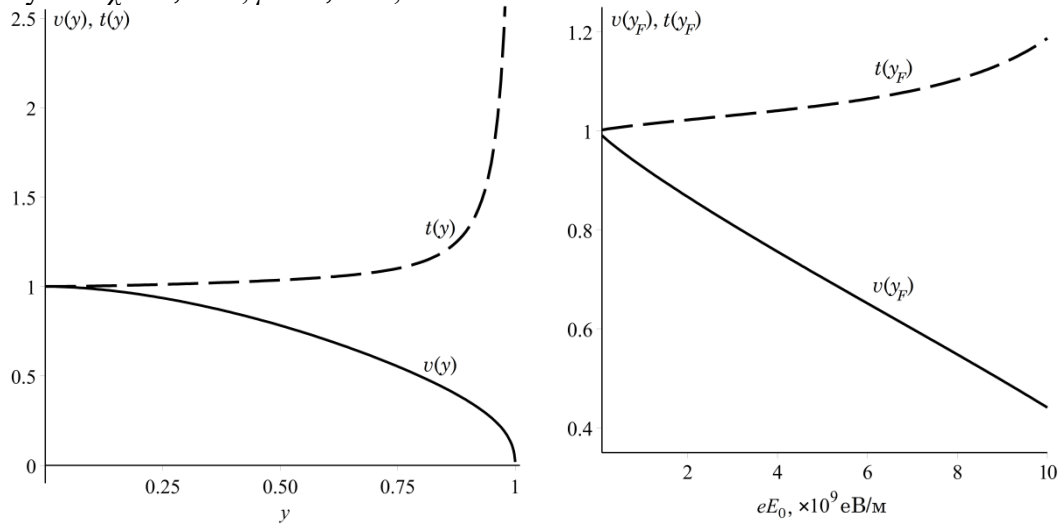


Рис. 1. Графіки функцій Нордгейма $v(y)$ і $t(y)$

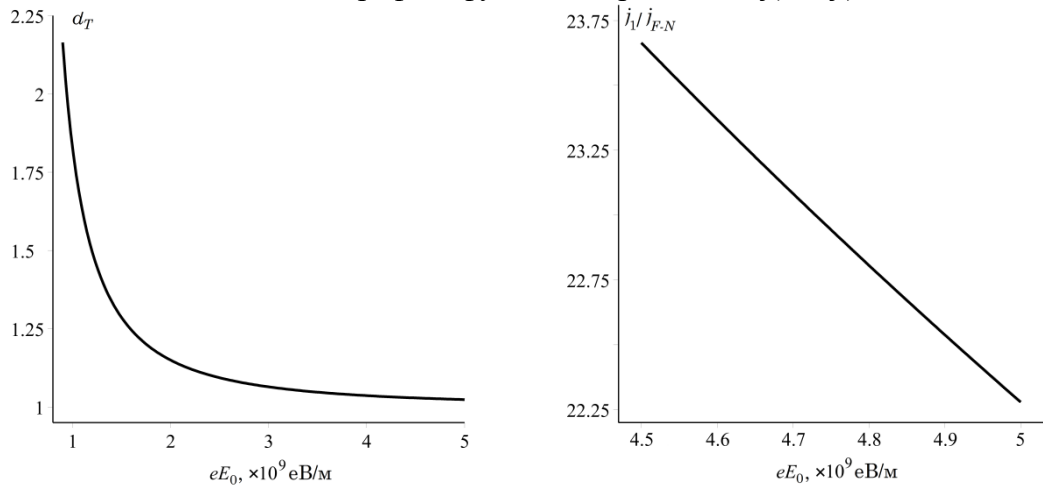


Рис. 2. Графіки залежностей α_T і j_1/j_{F-N} від eE_0

Список використаних джерел

- [1] R.H. Fowler and L. Nordheim, "Electron emission in intense electric fields," *Proceedings of the Royal Society of London. Series A*, vol. 119, no. 781, pp. 173-181, 1928.
- [2] L.W. Nordheim, "The effect of the image force on the emission and reflexion of electrons by metals," *Proceedings of the Royal Society of London. Series A*, vol. 121, no. 788, pp. 626-639, 1928.
- [3] N. Egorov and E. Sheshin, *Field Emission Electronics*. New York, U.S.A.: Springer Series in Advanced Microelectronics, 2017.
- [4] Г.Г. Владимиров, *Физическая электроника. Эмиссия и взаимодействие частиц с твердым телом*. Санкт-Петербург: Лань, 2013.
- [5] Г.Н. Фурсей, *Автоэлектронная эмиссия*. Санкт-Петербург: Лань, 2012.

ПОЛЯРИЗАЦІЙНІ ЕФЕКТИ ПРИ СПОНТАННОМУ ВИПРОМІНЕННЮ ФОТОНА ЕЛЕКТРОНОМ У ПОЛІ ЛАЗЕРНОЇ ХВИЛІ

Недорешта В. М., к.ф.-м.н., н.с

Інститут прикладної фізики НАН України, Суми, Україна

Теоретично враховано вплив поляризаційних ефектів на процес спонтанного випромінювання фотона електроном у полі лазерної хвилі. Детально вивчено кінематичні характеристики процесу, отримано амплітуду та ймовірність. Було виявлено, що ймовірність випромінювання чутлива до поляризації зовнішньої хвилі та випроміненого фотона.

Процес спонтанного випромінювання фотона електроном у полі світлової хвилі досліджується давно (див., наприклад, [1-3]). У цій роботі, на відміну від попередніх, отримано ймовірність процесу спонтанного випромінювання фотона електроном у полі лазерної хвилі еліптичної поляризації. Використовується модель монохроматичного електромагнітного поля, що розповсюджується вздовж осі z , чотири-потенціал якого має вигляд:

$$A(\varphi) = \frac{F}{\omega} [\varepsilon_x \cos \varphi + \delta \varepsilon_y \sin \varphi] \quad (1)$$

$$\varphi = \kappa x = \omega(t - z).$$

Тут δ – параметр еліптичності, $\kappa = (\omega, \mathbf{k})$ і $\varepsilon_{x,y} = (0, \varepsilon_{x,y})$, $\varepsilon_{x,y}^2 = -1$ – 4-імпульс та поляризаційні 4-вектори хвилі.

Процес розглядається для частинок високих енергій, коли основним параметром є класичний релятивістськи-інваріантний параметр

$$\eta = \frac{|e| F \lambda}{mc^2} \gtrsim 1 \quad (2)$$

який чисельно дорівнює відношенню роботи поля на довжині хвилі до енергії спокою електрона (e і m – заряд і маса електрона, F і $\lambda = c/\omega$ – напруженість і довжина хвилі електричного поля, ω – частота хвилі). Будемо використовувати релятивістську систему одиниць: $\hbar = c = 1$.

Досліджуваний процес є суперпозицією процесів у формі $e^-(q) + l\gamma_L(\kappa) \rightarrow e^-(q') + \gamma(k)$, де електрон поглинає довільну кількість l лазерних фотонів γ_L з енергією ω перед випромінюванням одного фотона γ . Підкреслю, що процес спонтанного випромінювання фотона електроном не пригнічується жодними пороговими ефектами. Таким чином, можна

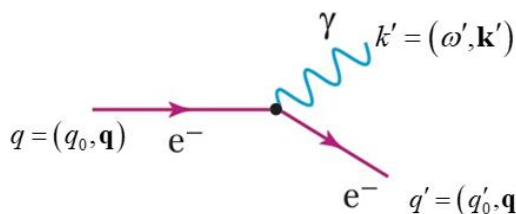


Рис. 1. Діаграма Фейнмана для процесу спонтанного випромінювання фотона електроном у полі електромагнітної хвилі.

досліджувати ефекти інтенсивності при довільно низьких енергіях центру мас як для фотонів, так і для електронів. Це досить унікальна особливість, яка виділяє цей процес з точки зору фізики елементарних частинок. Діаграма Фейнмана для спонтанного випромінювання фотона з чотири-імпульсом $k' = (\omega', \mathbf{k}')$ електроном з чотири-імпульсом $q = (q_0, \mathbf{q})$ та $q' = (q'_0, \mathbf{q}')$ у початковому та кінцевому станах відповідно показана на рис. 1.

Амплітуду процесу отримано у вигляді суми парціальних амплітуд. Кожному парціальному процесу відповідає процес взаємодії електрона з $|l|$

фотонами зовнішньої хвилі ($l < 0$ відповідає поглинанню з хвилі, $l > 0$ – випромінювання у хвилю):

$$S_{rad} = \sum_{l=-\infty}^{\infty} S_l, \quad S_l = \frac{-ie(2\pi)^4}{2\sqrt{2q_0q'_0V^3}} (\bar{u}_p G_{-l}^\nu u_p) \delta^{(4)}(q - q' - k' + lk). \quad (3)$$

Функція G_{-l}^ν у виразі (3) має громіздкий вигляд і представляється як лінійна комбінація функцій Бесселя, аргументи яких залежать від імпульсно-просторових характеристик лептонів, фотонів та зовнішнього поля.

Цікавою є диференціальна ймовірність переходу у фазовий об'єм:

$$dw_{i \rightarrow f} = |S_{rad}|^2 \frac{Vd^3p' Vd^3k'}{(2\pi)^3 (2\pi)^3}. \quad (4)$$

Після стандартних процедур [1] вираз (4) для диференціальної ймовірності можна представити у вигляді суми парціальних імовірностей:

$$\frac{1}{T} \frac{dW}{d\Omega'} = \sum_l \Xi \frac{N^2 V^3 q'_0 \omega'^2}{(2\pi)^2 [l(\kappa n') + (qn')]}, \quad \omega' = \frac{l(\kappa q)}{q_0 + l\omega - \mathbf{q}\mathbf{n}' - l\mathbf{k}\mathbf{n}'}, \quad (5)$$

$$2\Xi = (W_1 + W_2) + \xi'_1(W_{\pi/4} - W_{-\pi/4}) + \xi'_2(W_+ - W_-) + \xi'_3(W_1 - W_2), \quad (6)$$

де ξ'_1, ξ'_2, ξ'_3 – параметри Стокса, що описують випромінений фотон. Функції W_1, W_2 представляють собою випадок лінійної поляризації фотона вздовж осі x та y відповідно, а $W_{\pm\pi/4}, W_{\pm}$ – випадки лінійної поляризації під кутом $\pm\pi/4$ та правої і лівої кругової поляризації фотона. Для еліптичної поляризації зовнішньої хвилі вони мають громіздкий вигляд.

Аналіз показав, що ймовірність спонтанного випромінювання фотона електроном чутлива до поляризації зовнішньої хвилі та випромінено-го фотона

Список використаних джерел

- [1] А.И. Никишов, В.И. Ритус, «Квантовая электродинамика явлений в интенсивном поле», Труды ФИАН, т. 111, 1979.
- [2] Н.Б. Нарожный, М.С. Фофанов, Излучение фотона электроном при столкновении с коротким фокусированным лазерным импульсом, ЖЭТФ, Т.110, №1(7), с. 26-47, 1996.
- [3] D.Y. Ivanov, G.L. Kotkin & V.G. Serbo, Complete description of polarization effects in emission of a photon by an electron in the field of a strong laser wave, Eur. Phys. J. C, vol. 36, 127–145, 2004.

ОСОБЛИВОСТІ ПЕРЕРОЗПОДІЛУ ІНТЕНСИВНОСТІ НА ГРАНИЦІ ПОДІЛУ СЕРЕДОВИЩ В МЕТОДІ ЛІНІЙНОГО ФАЗОВОГО КОНТРАСТУ

Овчаренко А.Ю., аспірант; Лебедь О.А., д. ф.-м. н. Крамченков А.Б., к. ф.-м. н.
Інститут прикладної фізики НАН України, Суми, Україна

Метод рентгенівського фазового контрасту широко застосовується в різних галузях науки і техніки для вивчення внутрішньої структури різних об'єктів. Він дозволяє надзвичайно сильно збільшити контраст слабо поглинаючих матеріалів за рахунок поєднання явищ заломлення і дифракції рентгенівських променів, отримав назву методу рентгенівського фазового контрасту (РФК) [1]. Це дозволяє з високою просторовою роздільною здатністю здійснювати візуалізацію внутрішньої будови об'єктів з малими градієнтами щільності речовини. В основі методу РФК лежить використання явища

заломлення рентгенівських променів, яке призводить до зміни фазового фронту хвилі, що пройшла через досліджуваний об'єкт. В результаті такої деформації фазового фронту рентгенівські промені відхиляються від свого первинного напрямку на малі кути, величина яких залежить від просторового розподілу щільності речовини в досліджуваному об'єкті.

Фазовий зсув рентгенівського випромінювання, спричинений заломленням в досліджуваному об'єкті, не може бути виміряний безпосередньо, тому певним чином перетворюється в різницю інтенсивності випромінювання, що може бути зафіксована детектором.

Враховуючи те, що метод фазового контрасту на основі вільного поширення, базується на дифракції Френеля, розподіл інтенсивності на детекторі матиме вигляд [2]:

$$I = I_0 \left[1 - \frac{\Delta}{k} \left[\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} \right] + \frac{\Delta^2}{4k^2} \left[\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} \right]^2 + \frac{\Delta^2}{4k^2} \left[\left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial y} \right)^2 \right] \right] \quad (1)$$

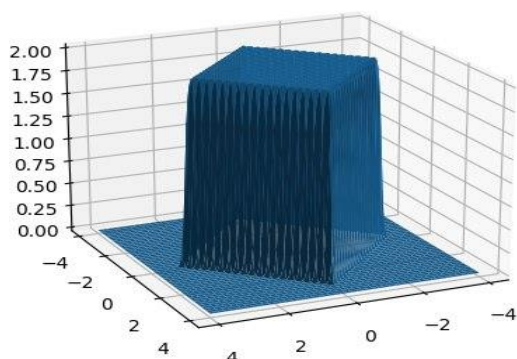
$$\phi_\omega(x, y, z = 0) \approx \phi_{IN}^\omega - k \int \delta(x, y, z) dz \quad (2)$$

де Δ —відстань між об'єктом і джерелом, k -хвильове число, ϕ -фаза хвилі, $\delta(x, y, z)$ -просторовий розподіл показника заломлення у зразку.

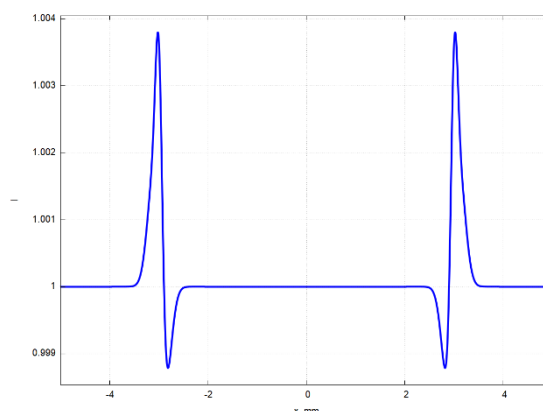
Для розрахунку границь застосування даної розрахункової моделі, слід взяти до уваги, що в основі методу фазового контрасту вільного поширення лежить дифракція Френеля [3]. Тому доданки 2,3 і 4 в рівнянні (1) є набагато меншими за 1. Відстань Δ , між джерелом і тестовим об'єктом, за якої є справедливими попередні наближення, залежить від розмірів, типу об'єкта (показника заломлення δ), а також довжини хвилі випромінювання λ . Розрахунки показують, що наведена вище теоретична модель для прямокутного об'єкта висотою T_0 з різкими границями (рис. 1а) дає коректні результати за умови:

$$\Delta \ll \frac{\lambda a^2}{8\delta^2 T_0^2} \quad (3)$$

В даному дослідженні було розраховано розподіл інтенсивності фазовоконтрастного зображення від однорідного (1-компонентного) прямокутного тестового об'єкта. Побудовано графіки профілю розподілу інтенсивності для випадку плоскої монохроматичної хвилі для однорідного прямокутного об'єкта. На рисунку 1б показано графік розподілу інтенсивності фазовоконтрастного зображення прямокутного об'єкта. Розрахунки проводилися для довжини хвилі падаючого випромінювання $\lambda = 10^{-10}$ м, та відстані до об'єкта 3 см. Інтенсивність падаючого випромінювання задана в умовних одиницях і рівна 1. Масштаб графіків вздовж осі x – 1мм. Як видно з кривої, по краях тестового об'єкта, спостерігаються максимуми інтенсивності. Це пояснюється тим, що рентгенівські промені мають інші кути заломлення після проходження тестового об'єкта з подальшим перерозподілом інтенсивності на екрані.



а)



б)

Рис.1. Зображення тестового об'єкта

Таким чином, була розроблена досить проста розрахункова модель, яка дозволяє визначити значення зміни інтенсивності для певного типу об'єктів і, відповідно, умови спостереження контрастного зображення при відомих характеристиках детекторної системи та інтенсивності джерела випромінювання.

Список використаних джерел

- [1] On the possibilities of x-ray phase contrast microimaging by coherent high-energy synchrotron radiation / A. Snigirev та ін. Review of Scientific Instruments. 1995. Т. 66, № 12. С. 5486—5492. URL: <https://doi.org/10.1063/1.1146073>
- [2] Paganin D. Coherent x-ray optics. Oxford University Press, 2013. 424 с.
- [3] Прикладна дифракційна оптика: Підручник / В.Г. Колобродов, Г.С. Тимчик. – К.: НТУУ „КПІ”, 2014. – 312 с.

ВИЗНАЧЕННЯ ПРУЖНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПАКЕТУ МОНОШАРІВ КОМПОЗИТНИХ ТОНКОСТІННИХ ПЛАСТИН

Овчаренко Є. І., аспірант; Кришук М. Г., д.т.н, проф., Ярусевиц Д. А.

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені І. Сікорського", м. Київ, Україна

Конструювання композитних тонкостінних пластин ґрунтується на особливостях технологічної будови їх структур з необхідними механічними властивостями [1] і проектними параметрами міцності [2] композитних матеріалів (КМ). Тип армуючого елемента – одна з найважливіших характеристик композитних матеріалів, адже саме через нього в більшій мірі залежать міцність та конструкційні властивості. Правильний вибір напрямку армуючого волокна суттєво впливає на ефективність несучої спроможності конструкції. З найбільш поширених армуючих волокон можна виділити скловолокно, вуглецеве волокно, борне волокно та органічне волокно. Іншим важливим елементом КМ є матриці, які слугують для з'єднання армуючих волокон та забезпечення їх спільної роботи при різних видах навантажень. Саме матриця в більшій мірі визначає рівень робочих температур композиту. Серед матриць, найбільш поширеними є полімерні матриці, серед яких: поліефірні, епоксидні, фенолоформальдегідні, поліамідні.

Визначення пружних характеристик пакету моношарів пластин тонкостінних конструкцій проведено на прикладі вуглетканини і вуглеленти (Таблиця 1).

Таблиця 1

Типові пружні ортотропні характеристики моношарів КМ [1]					
Моношар	Модулі пружності і зсуву, МПа			Коефіцієнти Пуассона	
	E_1	E_2	G_{12}	μ_{12}	μ_{21}
Вуглелента	143000	8400	5600	0.36	0.02
Вуглетканина	65000	63000	6500	0.070	0.068

де E_1 , E_2 - поздовжній і поперечний модулі пружності моношару; G_{12} - модуль зсуву моношару; μ_{12} - головний коефіцієнт Пуассона; μ_{21} - другорядний коефіцієнт Пуассона, який визначається зі співвідношення Максвелла: $\mu_{12} \cdot E_2 = \mu_{21} \cdot E_1$.

Пружні характеристики моношару, поверненого на кут φ [3]: □ □

$$E_x = \frac{\Delta C}{C_{22}^\varphi \cdot C_{66}^\varphi - (C_{26}^\varphi)^2} \quad (1)$$

$$E_y = \frac{\Delta C}{C_{11}^\varphi \cdot C_{66}^\varphi - (C_{16}^\varphi)^2} \quad (2)$$

$$G_{xy} = \frac{\Delta C}{C_{11}^{\varphi} \cdot C_{22}^{\varphi} - (C_{12}^{\varphi})^2} \quad (3)$$

$$\mu_{xy} = \frac{C_{12}^{\varphi} \cdot C_{66}^{\varphi} - C_{16}^{\varphi} \cdot C_{26}^{\varphi}}{C_{22}^{\varphi} \cdot C_{66}^{\varphi} - (C_{26}^{\varphi})^2} \quad (4)$$

де ΔC – визначник матриці жорсткості; C_{ij}^{φ} – коефіцієнти матриці жорсткості моношару, поверненого на кут φ [3].

Результати розрахунку пружних характеристик моношару вуглетканини і вуглеленти за співвідношеннями (1)-(4) представлені в таблиці 2.

Таблиця 2

Пружні характеристики моношару КМ в залежності від кута φ										
Вуглелента						Вуглетканина				
φ , град	E_x , МПа	E_y , МПа	G_{xy} , МПа	μ_{xy}	μ_{yx}	E_x , МПа	E_y , МПа	G_{xy} , МПа	μ_{xy}	μ_{yx}
0	143000	8400	5600	0,360	0,02	65000	63000	6500	0,070	0,07
15	57248	8733	5999	0,314	0,05	43583	42795	8082	0,375	0,37
30	22773	10006	6995	0,260	0,11	26255	26088	15743	0,621	0,62
45	13352	13352	7629	0,192	0,19	21864	21864	29930	0,682	0,68
60	10006	22773	6995	0,114	0,26	26088	26255	15743	0,617	0,62
75	8733	57248	5999	0,048	0,31	42795	43583	8082	0,368	0,37
90	8400	143000	5600	0,021	0,36	63000	65000	6500	0,068	0,07

Пружні характеристики пакету моношарів ортотропної пластини визначаються за формулами:

$$E_x = C_{11} - \frac{C_{12}^2}{C_{22}} \quad (5)$$

$$E_y = C_{22} - \frac{C_{12}^2}{C_{11}} \quad (6)$$

$$G_{xy} = C_{66} \quad (7)$$

$$\mu_{xy} = \frac{C_{12}}{C_{22}} \quad (8)$$

де C_{ij} – коефіцієнти матриці жорсткості моношару, які залежать від товщини моношару їх числа та загальної товщини пакету [3].

Результати розрахунку пружних характеристик вуглетканини і вуглеленти з орієнтацією моношарів $\pm\varphi^\circ$ з однаковою товщиною шарів за (5)-(8) представлені в таблиці 3.

Таблиця 3

Пружні характеристики пакета моношарів КМ з кутом армування $\pm\varphi^\circ$										
Вуглелента						Вуглетканина				
φ , град	E_x , МПа	E_y , МПа	G_{xy} , МПа	μ_{xy}	μ_{yx}	E_x , МПа	E_y , МПа	G_{xy} , МПа	μ_{xy}	μ_{yx}
0	143000	8400	5600	0,360	0,021	65000	63000	6500	0,070	0,068
15	115347	8879	13354	1,103	0,085	57477	55791	12359	0,179	0,173
30	50704	11147	28863	1,377	0,303	36751	35969	24078	0,476	0,466
45	19629	19629	36617	0,753	0,753	21865	21865	29937	0,682	0,682
60	11147	50704	28863	0,303	1,377	35969	36751	24078	0,466	0,476
75	8879	115347	13354	0,085	1,103	55791	57477	12359	0,173	0,179
90	8400	143000	5600	0,021	0,360	63000	65000	6500	0,068	0,070

Список використаних джерел

- [1] Alan Baker - Composite Materials for Aircraft Structures - AIAA, 2004
- [2] M. Kryshchuk, S. Shukayev, V. Rubashevskiy - Modeling of Mechanical Properties of Composite Materials Under Different Types of Loads, Mechanics of Complex Structures From Theory to Engineering Applications, 2021, p.39-54
- [3] Н.А. Альфуттов, П.А. Зиновьев, Расчет многослойных пластин и оболочек из композиционных материалов, М: Машиностроение, 1984

РОЗКРИТТЯ ТРІЩИНИ НА МЕЖІ ТОНКОГО ЖОРСТКОГО ВКЛЮЧЕННЯ У ПРУЖНОМУ МАТЕРІАЛІ

Острик В. І., д.ф.-м.н., проф.

Інститут прикладної фізики НАН України, Суми, Україна

Тонкі жорсткі відшаровані включення у пружному середовищі вивчалися в роботах [1-3] в рамках осциляційної моделі. Осциляція напружень та переміщень в околах кінців включень свідчить про фізичну суперечливість отриманих у цих роботах розв'язків, оскільки поблизу кінців включень спостерігається проникнення матеріалу через включення. Щоб запобігти вказаних протиріч, в роботі [4], аналогічно до моделі Комніоу для міжфазної тріщини [5], поблизу кінця включення введено область гладкого контакту між відшарованою межею пружного тіла та включенням. Нижче розглянемо відшарування тонкого напівнескінченного включення з урахуванням його фрикційного контакту з матрицею.

Розглянемо пружну площину $0 \leq r < \infty$, $-\pi \leq \vartheta \leq \pi$ з розрізом $\vartheta = \pm\pi$. Уздовж розрізу

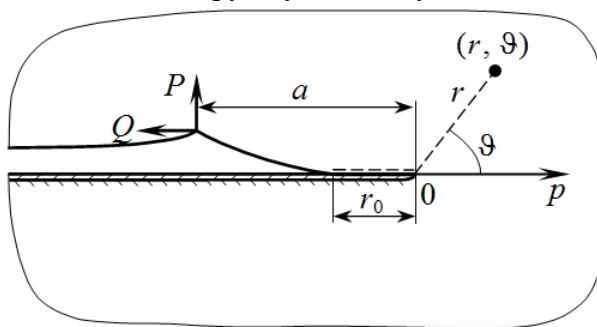


Рисунок 1

розміщене тонке жорстке включення, нижня сторона $\vartheta = -\pi$ якого з'єднана з пружною площиною, а верхня $\vartheta = \pi$ – відшарована від неї. Тобто між включенням і площиною утворилася напівнескінченна тріщина $\vartheta = \pm\pi$. До верхнього берега $\vartheta = \pi$ тріщини на відстані $r = a$ від її вершини прикладено зосереджені нормальну P і дотичну Q сили (рис. 1). Вважаємо, що поблизу вершини тріщини її береги кон-

тактують в області $0 < r \leq r_0$ невідомого розміру r_0 , де нормальні та дотичні напруження пов'язані законом тертя Амонтона.

Із застосуванням інтегрального перетворення Мелліна за координатою r отримано інтегральне рівняння задачі відносно функції нормальних контактних напружень. У результаті експоненціальної заміни змінної $r = e^{-\xi}$ це рівняння зведено до вигляду, коли воно задано на півнескінченному інтервалі, а його ядро є різницеvim. Методом Вінера – Гопфа [6] розв'язок інтегрального рівняння отримано в замкненій формі. Із умови обмеженості контактних напружень у точці $r = r_0$ виведено трансцендентне рівняння для знаходження розміру r_0 області контакту берегів тріщини. Знайдено розподіли напружень в області контакту ($0 < r \leq r_0$, $\vartheta = \pi$), на лінії продовження тріщини ($0 < r < \infty$, $\vartheta = 0$) та в місці з'єднання включення з площиною ($0 < r < \infty$, $\vartheta = -\pi$). Обчислено коефіцієнти інтенсивності напружень та відносний розмір області контакту залежно від відношення сил Q/P .

Список використаних джерел

- [1] Н. И. Мухелишвили, Некоторые основные задачи математической теории упругости, М.: Наука, 1966.
- [2] Ю. О. Васильева и В. В. Сильвестров, «Задача о межфазной трещине с жесткой накладкой на части ее берега» Прикл. математика и механика, т. 75, вып. 6, с. 1017-1037, 2011.
- [3] О. Ф. Кривий, «Міжфазне відшароване включення в кусково-однорідному трансверсально-ізотропному просторі» Фізико-хімічна механіка матеріалів, № 2, с. 77-84, 2014.
- [4] Ю. А. Антипов, «Отслоившееся включение в случае сцепления и проскальзывания» Прикл. математика и механика, 60, вып. 4, с. 669-680, 1996.
- [5] М. Comninou, «Interface crack with friction in the contact zone» J. Appl. Mech., v. 44, p. 780-781, 1977.
- [6] Б. Нобл, Метод Винера – Хопфа, М.: Изд-во иностр. лит., 1962.

ІНСТРУМЕНТ КОРЕКЦІЇ МЕЖ ФАЗОВИХ СТАНІВ ФЕРОМАГНІТНОЇ НАНОЧАСТИНКИ У В'ЯЗКІЙ РІДИНІ ЗІ СКІНЧЕНОЮ МАГНІТНОЮ АНІЗОТРОПІЄЮ

*Павлюк М. О., аспірант; Петренко М. С., аспірант
Сумський державний університет, Суми, Україна*

Широке розповсюдження феромагнітні наночастинки набу в суміжних сферах нанонаук та нанотехнологій. Потенціальне і реальне використання вже впроваджується в медицині[1]. Основним моментом є те, що поведінку цих наночастинок можна розкласти по фазам у модель, що описує відгук за конкретних частоти та амплітуди магнітного поля[2].

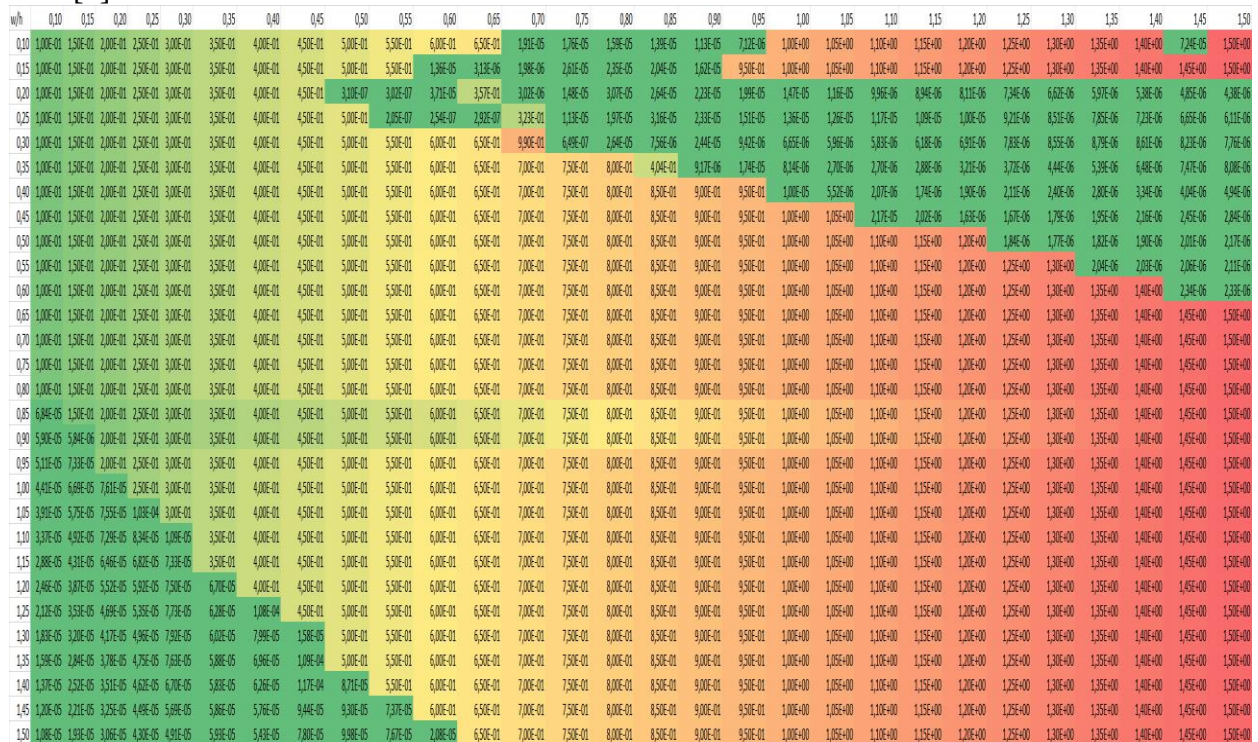


Рис. 1. Швидкісна карта фазових станів феромагнітної наночастинки для вектору легкої вісі[2] без корекції при дії циркулярного магнітного поля з відповідними параметрами (по осі x — частота поля, по осі y — амплітуда поля)

Ця модель картографічного характеру, де по осі x відкладена частота, а по осі y амплітуда. Фазові стани, що опираються на конкретні числові значення швидкості, відображаються кольоровим градієнтом рис. 1.

В нашому випадку ми досліджуємо відгук феромагнітної наночастинки на зовнішнє циркулярно поляризоване магнітне поле[2]. Основними постійними параметрами ми вважаємо: густину в'язкої рідини, намагніченість феромагнітних наночастинок та параметр демпфування. Основні змінні параметри це частота та амплітуда магнітного поля.

У поданій карті фазових станів є досить багато неоднозначностей, тому необхідний інструмент корекції. Такий інструмент був розроблений і впроваджений у корекцію.

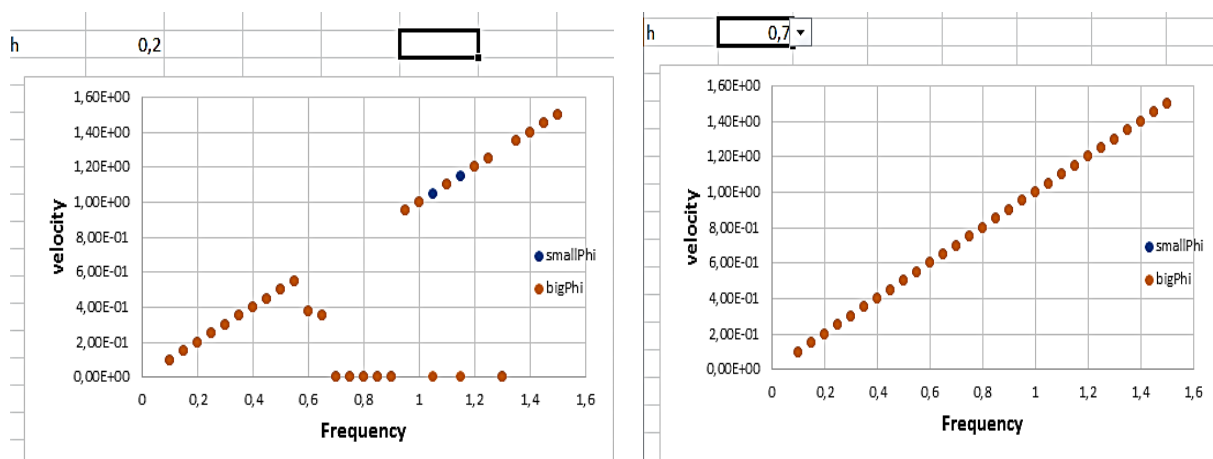


Рис. 2. Інструмент корекції швидкісної карти фазових станів

w/h	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00	1,05	1,10	1,15	1,20	1,25	1,30	1,35	1,40	1,45	1,50
0,10	1,00E-01	1,50E-01	2,00E-01	2,50E-01	3,00E-01	3,50E-01	4,00E-01	4,50E-01	5,00E-01	5,50E-01	6,00E-01	6,50E-01	7,00E-01	7,50E-01	8,00E-01	8,50E-01	9,00E-01	9,50E-01	1,00E+00	1,05E+00	1,10E+00	1,15E+00	1,20E+00	1,25E+00	1,30E+00	1,35E+00	1,40E+00	1,45E+00	1,50E+00
0,15	1,00E-01	1,50E-01	2,00E-01	2,50E-01	3,00E-01	3,50E-01	4,00E-01	4,50E-01	5,00E-01	5,50E-01	6,00E-01	6,50E-01	7,00E-01	7,50E-01	8,00E-01	8,50E-01	9,00E-01	9,50E-01	1,00E+00	1,05E+00	1,10E+00	1,15E+00	1,20E+00	1,25E+00	1,30E+00	1,35E+00	1,40E+00	1,45E+00	1,50E+00
0,20	1,00E-01	1,50E-01	2,00E-01	2,50E-01	3,00E-01	3,50E-01	4,00E-01	4,50E-01	5,00E-01	5,50E-01	6,00E-01	6,50E-01	7,00E-01	7,50E-01	8,00E-01	8,50E-01	9,00E-01	9,50E-01	1,00E+00	1,05E+00	1,10E+00	1,15E+00	1,20E+00	1,25E+00	1,30E+00	1,35E+00	1,40E+00	1,45E+00	1,50E+00
0,25	1,00E-01	1,50E-01	2,00E-01	2,50E-01	3,00E-01	3,50E-01	4,00E-01	4,50E-01	5,00E-01	5,50E-01	6,00E-01	6,50E-01	7,00E-01	7,50E-01	8,00E-01	8,50E-01	9,00E-01	9,50E-01	1,00E+00	1,05E+00	1,10E+00	1,15E+00	1,20E+00	1,25E+00	1,30E+00	1,35E+00	1,40E+00	1,45E+00	1,50E+00
0,30	1,00E-01	1,50E-01	2,00E-01	2,50E-01	3,00E-01	3,50E-01	4,00E-01	4,50E-01	5,00E-01	5,50E-01	6,00E-01	6,50E-01	7,00E-01	7,50E-01	8,00E-01	8,50E-01	9,00E-01	9,50E-01	1,00E+00	1,05E+00	1,10E+00	1,15E+00	1,20E+00	1,25E+00	1,30E+00	1,35E+00	1,40E+00	1,45E+00	1,50E+00
0,35	1,00E-01	1,50E-01	2,00E-01	2,50E-01	3,00E-01	3,50E-01	4,00E-01	4,50E-01	5,00E-01	5,50E-01	6,00E-01	6,50E-01	7,00E-01	7,50E-01	8,00E-01	8,50E-01	9,00E-01	9,50E-01	1,00E+00	1,05E+00	1,10E+00	1,15E+00	1,20E+00	1,25E+00	1,30E+00	1,35E+00	1,40E+00	1,45E+00	1,50E+00
0,40	1,00E-01	1,50E-01	2,00E-01	2,50E-01	3,00E-01	3,50E-01	4,00E-01	4,50E-01	5,00E-01	5,50E-01	6,00E-01	6,50E-01	7,00E-01	7,50E-01	8,00E-01	8,50E-01	9,00E-01	9,50E-01	1,00E+00	1,05E+00	1,10E+00	1,15E+00	1,20E+00	1,25E+00	1,30E+00	1,35E+00	1,40E+00	1,45E+00	1,50E+00
0,45	1,00E-01	1,50E-01	2,00E-01	2,50E-01	3,00E-01	3,50E-01	4,00E-01	4,50E-01	5,00E-01	5,50E-01	6,00E-01	6,50E-01	7,00E-01	7,50E-01	8,00E-01	8,50E-01	9,00E-01	9,50E-01	1,00E+00	1,05E+00	1,10E+00	1,15E+00	1,20E+00	1,25E+00	1,30E+00	1,35E+00	1,40E+00	1,45E+00	1,50E+00
0,50	1,00E-01	1,50E-01	2,00E-01	2,50E-01	3,00E-01	3,50E-01	4,00E-01	4,50E-01	5,00E-01	5,50E-01	6,00E-01	6,50E-01	7,00E-01	7,50E-01	8,00E-01	8,50E-01	9,00E-01	9,50E-01	1,00E+00	1,05E+00	1,10E+00	1,15E+00	1,20E+00	1,25E+00	1,30E+00	1,35E+00	1,40E+00	1,45E+00	1,50E+00
0,55	1,00E-01	1,50E-01	2,00E-01	2,50E-01	3,00E-01	3,50E-01	4,00E-01	4,50E-01	5,00E-01	5,50E-01	6,00E-01	6,50E-01	7,00E-01	7,50E-01	8,00E-01	8,50E-01	9,00E-01	9,50E-01	1,00E+00	1,05E+00	1,10E+00	1,15E+00	1,20E+00	1,25E+00	1,30E+00	1,35E+00	1,40E+00	1,45E+00	1,50E+00
0,60	1,00E-01	1,50E-01	2,00E-01	2,50E-01	3,00E-01	3,50E-01	4,00E-01	4,50E-01	5,00E-01	5,50E-01	6,00E-01	6,50E-01	7,00E-01	7,50E-01	8,00E-01	8,50E-01	9,00E-01	9,50E-01	1,00E+00	1,05E+00	1,10E+00	1,15E+00	1,20E+00	1,25E+00	1,30E+00	1,35E+00	1,40E+00	1,45E+00	1,50E+00
0,65	1,00E-01	1,50E-01	2,00E-01	2,50E-01	3,00E-01	3,50E-01	4,00E-01	4,50E-01	5,00E-01	5,50E-01	6,00E-01	6,50E-01	7,00E-01	7,50E-01	8,00E-01	8,50E-01	9,00E-01	9,50E-01	1,00E+00	1,05E+00	1,10E+00	1,15E+00	1,20E+00	1,25E+00	1,30E+00	1,35E+00	1,40E+00	1,45E+00	1,50E+00
0,70	1,00E-01	1,50E-01	2,00E-01	2,50E-01	3,00E-01	3,50E-01	4,00E-01	4,50E-01	5,00E-01	5,50E-01	6,00E-01	6,50E-01	7,00E-01	7,50E-01	8,00E-01	8,50E-01	9,00E-01	9,50E-01	1,00E+00	1,05E+00	1,10E+00	1,15E+00	1,20E+00	1,25E+00	1,30E+00	1,35E+00	1,40E+00	1,45E+00	1,50E+00
0,75	1,00E-01	1,50E-01	2,00E-01	2,50E-01	3,00E-01	3,50E-01	4,00E-01	4,50E-01	5,00E-01	5,50E-01	6,00E-01	6,50E-01	7,00E-01	7,50E-01	8,00E-01	8,50E-01	9,00E-01	9,50E-01	1,00E+00	1,05E+00	1,10E+00	1,15E+00	1,20E+00	1,25E+00	1,30E+00	1,35E+00	1,40E+00	1,45E+00	1,50E+00
0,80	1,00E-01	1,50E-01	2,00E-01	2,50E-01	3,00E-01	3,50E-01	4,00E-01	4,50E-01	5,00E-01	5,50E-01	6,00E-01	6,50E-01	7,00E-01	7,50E-01	8,00E-01	8,50E-01	9,00E-01	9,50E-01	1,00E+00	1,05E+00	1,10E+00	1,15E+00	1,20E+00	1,25E+00	1,30E+00	1,35E+00	1,40E+00	1,45E+00	1,50E+00
0,85	6,94E-05	1,50E-01	2,00E-01	2,50E-01	3,00E-01	3,50E-01	4,00E-01	4,50E-01	5,00E-01	5,50E-01	6,00E-01	6,50E-01	7,00E-01	7,50E-01	8,00E-01	8,50E-01	9,00E-01	9,50E-01	1,00E+00	1,05E+00	1,10E+00	1,15E+00	1,20E+00	1,25E+00	1,30E+00	1,35E+00	1,40E+00	1,45E+00	1,50E+00
0,90	5,90E-05	5,84E-06	2,00E-01	2,50E-01	3,00E-01	3,50E-01	4,00E-01	4,50E-01	5,00E-01	5,50E-01	6,00E-01	6,50E-01	7,00E-01	7,50E-01	8,00E-01	8,50E-01	9,00E-01	9,50E-01	1,00E+00	1,05E+00	1,10E+00	1,15E+00	1,20E+00	1,25E+00	1,30E+00	1,35E+00	1,40E+00	1,45E+00	1,50E+00
0,95	5,11E-05	7,33E-05	2,00E-01	2,50E-01	3,00E-01	3,50E-01	4,00E-01	4,50E-01	5,00E-01	5,50E-01	6,00E-01	6,50E-01	7,00E-01	7,50E-01	8,00E-01	8,50E-01	9,00E-01	9,50E-01	1,00E+00	1,05E+00	1,10E+00	1,15E+00	1,20E+00	1,25E+00	1,30E+00	1,35E+00	1,40E+00	1,45E+00	1,50E+00
1,00	4,41E-05	6,69E-05	7,61E-05	2,50E-01	3,00E-01	3,50E-01	4,00E-01	4,50E-01	5,00E-01	5,50E-01	6,00E-01	6,50E-01	7,00E-01	7,50E-01	8,00E-01	8,50E-01	9,00E-01	9,50E-01	1,00E+00	1,05E+00	1,10E+00	1,15E+00	1,20E+00	1,25E+00	1,30E+00	1,35E+00	1,40E+00	1,45E+00	1,50E+00
1,05	3,91E-05	5,75E-05	7,59E-05	1,03E-04	3,00E-01	3,50E-01	4,00E-01	4,50E-01	5,00E-01	5,50E-01	6,00E-01	6,50E-01	7,00E-01	7,50E-01	8,00E-01	8,50E-01	9,00E-01	9,50E-01	1,00E+00	1,05E+00	1,10E+00	1,15E+00	1,20E+00	1,25E+00	1,30E+00	1,35E+00	1,40E+00	1,45E+00	1,50E+00
1,10	3,37E-05	4,92E-05	7,29E-05	8,34E-05	1,00E-04	3,50E-01	4,00E-01	4,50E-01	5,00E-01	5,50E-01	6,00E-01	6,50E-01	7,00E-01	7,50E-01	8,00E-01	8,50E-01	9,00E-01	9,50E-01	1,00E+00	1,05E+00	1,10E+00	1,15E+00	1,20E+00	1,25E+00	1,30E+00	1,35E+00	1,40E+00	1,45E+00	1,50E+00
1,15	2,88E-05	4,31E-05	6,46E-05	6,82E-05	7,33E-05	3,50E-01	4,00E-01	4,50E-01	5,00E-01	5,50E-01	6,00E-01	6,50E-01	7,00E-01	7,50E-01	8,00E-01	8,50E-01	9,00E-01	9,50E-01	1,00E+00	1,05E+00	1,10E+00	1,15E+00	1,20E+00	1,25E+00	1,30E+00	1,35E+00	1,40E+00	1,45E+00	1,50E+00
1,20	2,46E-05	3,87E-05	5,52E-05	5,92E-05	7,50E-05	6,70E-05	4,00E-01	4,50E-01	5,00E-01	5,50E-01	6,00E-01	6,50E-01	7,00E-01	7,50E-01	8,00E-01	8,50E-01	9,00E-01	9,50E-01	1,00E+00	1,05E+00	1,10E+00	1,15E+00	1,20E+00	1,25E+00	1,30E+00	1,35E+00	1,40E+00	1,45E+00	1,50E+00
1,25	2,12E-05	3,53E-05	4,69E-05	5,35E-05	7,73E-05	6,28E-05	1,00E-04	4,50E-01	5,00E-01	5,50E-01	6,00E-01	6,50E-01	7,00E-01	7,50E-01	8,00E-01	8,50E-01	9,00E-01	9,50E-01	1,00E+00	1,05E+00	1,10E+00	1,15E+00	1,20E+00	1,25E+00	1,30E+00	1,35E+00	1,40E+00	1,45E+00	1,50E+00
1,30	1,83E-05	3,20E-05	4,17E-05	4,66E-05	7,92E-05	6,02E-05	7,99E-05	1,58E-05	5,00E-01	5,50E-01	6,00E-01	6,50E-01	7,00E-01	7,50E-01	8,00E-01	8,50E-01	9,00E-01	9,50E-01	1,00E+00	1,05E+00	1,10E+00	1,15E+00	1,20E+00	1,25E+00	1,30E+00	1,35E+00	1,40E+00	1,45E+00	1,50E+00
1,35	1,59E-05	2,94E-05	3,78E-05	4,75E-05	7,63E-05	5,88E-05	6,96E-05	1,09E-04	5,00E-01	5,50E-01	6,00E-01	6,50E-01	7,00E-01	7,50E-01	8,00E-01	8,50E-01	9,00E-01	9,50E-01	1,00E+00	1,05E+00	1,10E+00	1,15E+00	1,20E+00	1,25E+00	1,30E+00	1,35E+00	1,40E+00	1,45E+00	1,50E+00
1,40	1,37E-05	2,52E-05	3,51E-05	4,62E-05	6,70E-05	5,83E-05	6,26E-05	1,17E-04	8,71E-05	5,50E-01	6,00E-01	6,50E-01	7,00E-01	7,50E-01	8,00E-01	8,50E-01	9,00E-01	9,50E-01	1,00E+00	1,05E+00	1,10E+00	1,15E+00	1,20E+00	1,25E+00	1,30E+00	1,35E+00	1,40E+00	1,45E+00	1,50E+00
1,45	1,20E-05	2,21E-05	3,25E-05	4,49E-05	5,99E-05	5,86E-05	5,76E-05	9,44E-05	9,30E-05	7,37E-05	6,00E-01	6,50E-01	7,00E-01	7,50E-01	8,00E-01	8,50E-01	9,00E-01	9,50E-01	1,00E+00	1,05E+00	1,10E+00	1,15E+00	1,20E+00	1,25E+00	1,30E+00	1,35E+00	1,40E+00	1,45E+00	1,50E+00
1,50	1,08E-05	1,93E-05	3,06E-05	4,30E-05	4,91E-05	5,93E-05	5,43E-05	7,80E-05	7,67E-05	2,08E-05	6,50E-01	7,00E-01	7,50E-01	8,00E-01	8,50E-01	9,00E-01	9,50E-01	1,00E+00	1,05E+00	1,10E+00	1,15E+00	1,20E+00	1,25E+00	1,30E+00	1,35E+00	1,40E+00	1,45E+00	1,50E+00	1,50E+00

Рис. 2. Перша корекція швидкісної карти

Розкид та відхилення від тренду, в нашому випадку «лінії», є ознакою того, що на цій ділянці відбуваю

означає, що на ділянці карти при $h=0,2$ (по вісі y на рис. 1) та $w=[0,6—1,4]$ (по вісі x на рис. 1) буде проведена лінія розділу фазових станів або виокремлена ділянка фазових станів перехідних режимів (рис. 3). При чому такий розкид має місце, як для вектору легкої вісі, так і для вектору магнітної вісі.

Список використаних джерел

- [1] Q.A. Pankhurst, et al., J.Phys. D: Appl. Phys.36, R167(2003)
- [2] T.V. Lyuty, V.V. Reva, N.S. Petrenko, M.O.Pavlyuk, J. Nano- Electron. Phys. 11 No 5, 05021 (2019)

ЧИСЕЛЬНО-ВІЗУАЛЬНИЙ ПОШУК КОНТРАСТНИХ ЗОБРАЖЕНЬ В МЕТОДІ РЕНТГЕНІВСЬКОГО ФАЗОВОГО КОНТРАСТУ НА ОСНОВІ ВІЛЬНОГО ПОШИРЕННЯ

Поліщук А. В.¹, м.н.с.; Павлюк М.О.², аспірант

¹ Інститут прикладної фізики НАН України, Суми, Україна

² Сумський державний університет, Суми, Україна

Задача побудови та відтворення високоякісного рентгенівського зображення внутрішньої структури досліджуваного об'єкту є вкрай важливою, особливо в області медичної фізики, де величина дози має бути з однієї сторони мінімальною, а з іншої — забезпечувати максимальну інформативність. Існує міжнародний принцип, якого дотримуються при формуванні дози [1, с.12] для візуалізації біооб'єктів ALARA (as low as reasonably achieved), яка потребує подальшої оптимізації (зниження) у випадку комп'ютерної томографії. Отже, недостатня контрастність будь-то медичних чи матеріалознавчих зображень є незмінним викликом в області сучасної цифрової рентгенодіагностики у зв'язку з невинним розвитком як джерел випромінювання й оптичних елементів, так і відповідних світло-чутливих сенсорів для реєстрації таких променів. Важливе місце при 2- та 3-вимірній візуалізації останнім часом займають чутливі до незначних змін в поглинанні та заломлюванні випромінювання речовиною класи експериментальних методів під назвою рентгенівський фазовий контраст (РФК). Така варіативність [2, с.261] в експериментальних приладах обумовлена в кожному випадку притаманними обмеженнями згідно з предметом візуалізації, когерентністю джерела та роздільністю вихідного зображення. Основне застосування РФК полягає в класифікації й контролю якості в матеріалах близької густини і візуалізації структур слабопоглинаючих об'єктів.

Метою даної роботи є аналіз існуючих методів чисельного оцінювання якості зображень для оптимального рентгенографії випадку сірих чи градієнтно-сірих зображень у задачі пошуку оптимальної контрастності. В якості початкових даних були використані результати синхротронного експериментального вимірювання стандартизованого зразка Зірки Сіменса та крила комах-шкідника в режимі РФК на основі вільного поширення при енергії рентгенівських квантів $E=10\text{ keV}$.

Фазове відновлення є основним кроком при цифровій обробці знімків РФК для кількісного аналізу мало-контрастних, з висоти загальноприйнятого методу, зразків на основі їх 2- та 3-вимірних зображень. РФК зображення були люб'язно надані з експериментальної лінії Nanoscopium (SOLEIL, France). Ми нормалізували кожен знімок при допомозі алгоритму корекції неоднорідностей детектора та неоднорідностей рентгенівського пучка. Для отримання контрастного нормалізованого знімку два параметри

мають бути підібрані. Для спрощення пошуку ми використали метод простого перебору пари параметрів.

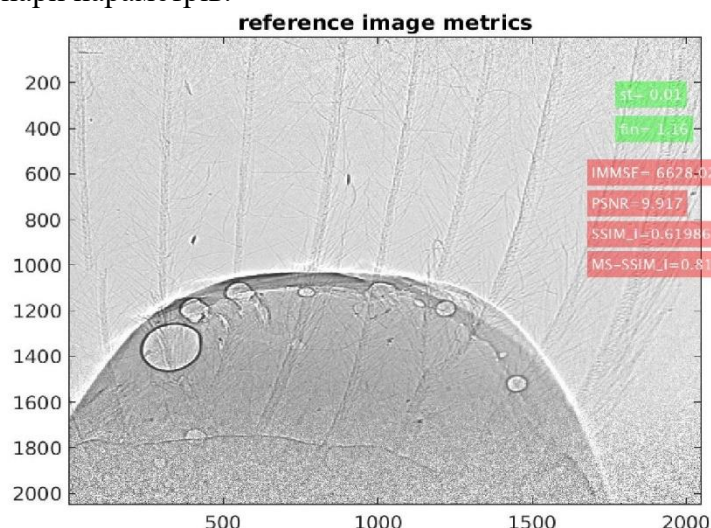


Рис.1. Нормалізований знімок крила комах. Одне зображення з масиву зображень різної контрастності та відповідними числовими даними відносно вибраного еталону. Пара параметрів $st=0.01$ та $fin=1.16$ використані для створення контрастного знімку. На осях позначені номери відповідних пікселів.

роботи з наборами зображень та обрання візуально-прийнятної підвибірки.

Впровадження методики обробки 2-вимірних зображень в електростатичних прискорювачах [4] також є ціллю даного дослідження.

Список використаних джерел

- [1] С. И. Мирошниченко, Цифровые приемники рентгеновских изображений, К.: «Медицина Украины», 2014.
- [2] D. M. Paganin, Coherent X-ray Optics, Oxford University Press, 2006. doi: <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780198567288.001.0001>
- [3] Z. Wang et al., Multiscale structural similarity for image quality assessment, The Thirty-Seventh Asilomar Conference on Signals, Systems & Computers, 2003. doi: 10.1109/ACSSC.2003.1292216.
- [4] O. M. Buhay et al., Current Status of the IAP NASU Accelerator-Based Analytical Facility, Phys. Procedia 66, 2015. doi: <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2015.05.022>

ПРОТОННА ЛІТОГРАФІЯ В СВІТІ ТА В УКРАЇНІ

Положій Г. Є., аспірант; Пономарьов О. Г., д. ф-м. н., зав. від.; Ребров В. А., к. ф-м. н., п. н. с.; Колінько С. В., к. ф-м. н., н. с.; Салівон В. Ф., пров. інженер; Калінкевич О. М., к.ф-м.н., п. н. с.; Калінкевич О. В., м. н. с.; Шуліна Р. О., м. н. с.
Інститут прикладної фізики НАН України, Суми, Україна

Протонна літографія (в англomовних джерелах відома як Proton-beam writing) опрацьовується в наукових установах багатьох країн світу. Зокрема, в Сингапурі ця технологія розробляється з другої половини 1990х років. За цей час сингапурським вченим вдалось виготовити різні малорозмірні структури спеціального призначення. Зокрема, вони

Були проведені чисельні розрахунки якості кожного із масиву згенерованих зображень шляхом їх порівняння із в ручну обраним еталонним зображенням. У ролі критеріїв якості розглядались такі еталонні моделі порівняння: середньоквадратична похибка (IMMSE), пікове відношення сигналу до шуму (PSNR), індекс структурної подібності (SSIM) та багатомасштабний індекс структурної подібності (MS-SSIM) [3]. Такий підхід дає змогу виявити вибірку зображень оптимальної контрастності на основі найвищих оцінок, згідно з обраними метриками. Нами створено програмний інтерфейс для простішої

виготовляли мікроструктури з високим аспектним відношенням, а також структури субмікронних розмірів (десятки нанометрів). Наразі там ведеться розробка джерела іонів на нано-отворах, що дасть змогу виготовляти структури розміром в одиниці нанометрів. Це досягається завдяки високій стабільності джерела іонів (енергетичний розкид 1 електрон-вольт). Завдяки високій яскравості джерела значно підвищиться швидкість протонної літографії.

В ІПФ НАНУ (м. Суми) розробляється технологія протонної літографії попри те що купа несприятливих факторів сповільнюють роботу. В умовах України ця технологія може дати можливість відносно швидко та дешево налагодити виробництво електроніки та інших необхідних малорозмірних структур.

Список використаних джерел

- [1] J. A. van Kan et al. Micromachining using focused high energy ion beams: Deep Ion Beam Lithography. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 148 (1999) 1085-1089.
- [2] J. A. van Kan, A. A. Bettiol, F. Watt. Hydrogen silsesquioxane a next generation resist for proton beam writing at the 20 nm level. Nucl. Instr. and Meth. B 260 (2007) 396-399.
- [3] F. Watt et al. Proton beam writing. Materials today June 2007, Volume 10, number 6, 20-29.
- [4] A. A. Bettiol et al. Three-dimensional metamaterials fabricated using Proton Beam Writing. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 306 (2013) 271–274.
- [5] F. Watt et al. Ion beam lithography and nanofabrication: A review. International Journal of Nanoscience Vol. 4, No. 3 (2005) 269–286.
- [6] X. Xu et al. Design considerations for a compact proton beam writing system aiming for fast sub-10 nm direct write lithography. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 404 (2017) 243–249.

ПЕРЕВАГИ VS НЕДОЛІКИ ІНТЕРАКТИВНИХ ВПРАВ ФІЗИЧНОГО ЗМІСТУ, РОЗРОБЛЕНИХ ЗАСОБАМИ LEARNING APPS

Пустовий М. С., магістрант

Сумський державний педагогічний університет імені А. С. Макаренка, Суми, Україна

Інтерактивне навчання є підходом до навчання, що активно використовується у сучасній освіті. Сутність такого підходу полягає в залученні учнів до активної участі у процесі навчання. У межах використання інтерактивного підходу ефективним засобом для створення активного, цікавого та пізнавального навчального середовища є, так звані, інтерактивні вправи.

У контексті навчання фізики, використання інтерактивних вправ може допомогти учням зрозуміти концепції та теорії, які можуть бути складними для засвоєння в межах традиційного підходу до навчання. Інтерактивні вправи можуть бути розроблені таким чином, щоб допомогти учням побачити фізичні явища на практиці, що сприяє кращому засвоєнню та зрозумінню теоретичних концепцій.

Серед учителів одним з найбільш популярних хмарних сервісів для створення інтерактивних вправ є сервіс Learning Apps (<https://learningapps.org>). Виокремимо переваги та недоліки використання інтерактивних вправ фізичного змісту, розроблених засобами Learning Apps (рис. 1).

- підвищення мотивації учнів до вивчення предмету; - формуванню позитивної атмосфери на уроці; - розвиток критичного мислення учнів; - розвиток самостійності учнів; - інтерактивні вправи можуть бути використані як для індивідуальної роботи учнів, так і для роботи в парах або групах; - інтерактивні вправи можуть бути використані як для оцінювання знань та навичок учнів; - збільшенню активності учнів на уроці; - використання інтерактивних вправ як у межах традиційного навчання, так і для дистанційного навчання.	- обмежені можливості для налаштування та персоналізації вправ; - залежність від Інтернет з'єднання (Learning Apps зазвичай працює на основі хмарної технології, тому вправи можуть бути недоступні в разі відсутності Інтернет з'єднання); - Learning Apps може не надавати вчителям достатніх можливостей контролювати процес виконання вправ, що може вплинути на результативність навчання.
---	---

Рис.1. Переваги та недоліки використання інтерактивних вправ фізичного змісту, розроблених засобами Learning Apps

Зазначимо, що інтерактивні вправи фізичного змісту, розроблені засобами Learning Apps, можна доповнювати та модифіковані відповідно до мети уроку, що робить їх універсальними та гнучкими для використання на уроках фізики.

Аналіз переваг та недоліків використання подібних інтерактивних вправ засвідчує переважно технічну сутність недоліків, водночас переваги в більшості методичного змісту.

Використання інтерактивних вправ фізичного змісту, розроблених засобами Learning Apps, може допомогти вчителям створити більш цікаве та ефективне навчальне середовище, що сприяє активному залученню учнів до навчального процесу.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ІОННОГО ПУЧКА КОМПАКТНОГО ДЖЕРЕЛА ІОНІВ МЕТАЛІВ ДЛЯ ІМПЛАНТЕРНОЇ ТЕХНІКИ

*Роєнко О. Ю., м.н.с., Литвинов П. О., к.т.н., с.н.с., Батурін В. А., к.ф.-м.н., пров. н.с.
Інститут прикладної фізики НАН України, Суми, Україна*

Протягом 2022 року в Інституті прикладної фізики НАН України на замовлення Інституту фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України було розроблено нове компактне джерело іонів металів та газів (1). Існуюче у замовника джерело не відповідало поставленим вимогам, не могло генерувати струм мінімальної необхідної величини ($I \geq 0.5 - 1$ мкА). Нове джерело іонів металів розпилювального типу розроблено на основі використання розряду Пеннінга з холодним порожнистим катодом. В конструкції джерела металевих та газових іонів шляхом розпорошення іонами робочого газу (аргону або іншого) вставок в катоді та антикатодному електроді забезпечується утворення фази надлишкового тиску парів металу (Al, Be, Ti, C, W і т. д.). Далі цей пар іонізується осцилюючими в розрядній камері електронами, траєкторія руху яких задається відповідною розрахованою конфігурацією магнітної системи. На даний момент, джерело уже виконує свої функції на іонно-променевому імплантері, але проведення експериментів і

дослідження його робочих режимів, параметрів, розширення спектра можливостей залишається актуальною задачею.

Для проведення експериментального вивчення параметрів пучка іонів джерела використовувалися розпилювальні вставки з алюмінію. Типові значення робочих параметрів джерела виглядають наступним чином:

- Рівень вакууму - $1 \cdot 10^{-3} \div 4 \cdot 10^{-3}$ Па;
- Напруга на розряді (катод-анод) – $100 \div 500$ В;
- Струм розряду – $100 \div 400$ мкА;
- Індукція магнітного поля в розрядній камері – $0.16 \div 0.2$ Т.

Вимірювання струму проводилося після проведення сформованого пучка через магнітний сепаратор і прискорювальну трубку за допомогою циліндра Фарадея. Напруга екстракції в усіх експериментах ~ 30 кВ, а напруга в прискорювальній трубці ~ 100 кВ.

В наступній таблиці можна побачити співвідношення робочих параметрів джерела і відповідних отриманих струмів іонів робочого газу та матеріалу розпилювальних вставок:

Також було досліджено залежність струму іонів Al^+ та Ar^+ від величини напруги екстракції. На наступних рисунках можна бачити, що зі збільшенням напруги екстракції струм іонів зростає майже прямо пропорційно:

Аналізуючи отримані результати, можна зробити висновок, що нове компактне іонне джерело показало себе в роботі надійним і стабільним, здатним генерувати широкий спектр іонів різних металів та газів. Отриманий струм іонів збільшується зі збільшенням величини розрядного струму та напруги екстракції, що повністю відповідає прийнятій теорії (3). Ресурс одного комплексу вставок досягає 14-16 годин, що для джерела розпилювального типу являється гарним показником.

В майбутньому планується провести додаткові дослідження на іонному джерелі з метою перевірки його здатності генерувати іони інших матеріалів, внесення змін до конструкції для збільшення її надійності, простоти обслуговування та збільшення ресурсу вставок. Також планується запровадити в новому джерелі механізм термалізації атомів металу з метою підвищення ступеню їх іонізації в розряді (2).

Таблиця 1
Параметри розряду та струм іонів

Operation pressure $P(Ar)=1,1 \cdot 10^{-3}$			
I_p , mA	U_p , V	$I(Al^+)$, mkA	$I(Ar^+)$, mkA
100	370	4	70
200	420	10,5	109
300	500	20	118
400	560	30	130

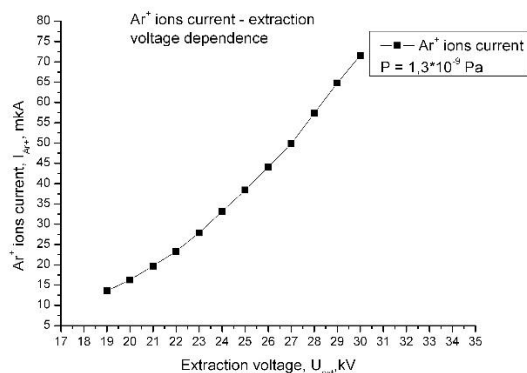


Рис. 1. Залежність струму Ar^+ від U_{ext}

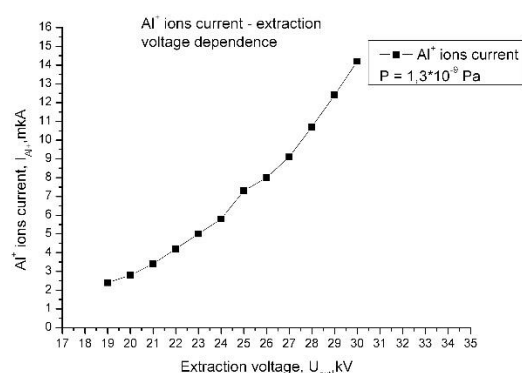


Рис. 2. Залежність струму Al^+ від U_{ext}

Список використаних джерел

1. В.А. Батурін, П.О. Литвинов, С.О. Пустовойтов, О.Ю. Роєнко. Розробка інжектора іонів берилію для технологічної установки з виготовлення інфрачервоних фотоприймачів для систем наведення. Озброєння та військова техніка, 2022, 36(4), с. 79 – 85.

2. V.A. Baturin, P.A. Litvinov, S.A. Pustovoitov, O.Yu. Roenko. Thermalization and ionization of metal atoms of operating environment at a metal ion-sputtering source, ISSN 1562-6016. ВАНТ. 2021. №6(136), Р. 99-102.
3. Физика и технологии ионных источников / Под ред. Я. Брауна; пер. с англ. М.: Мир, 1998. 496 с.

ЦІННІСНИЙ КОМПОНЕНТ ПРЕДМЕТНОЇ КОМПЕТЕНТНОСТІ УЧНІВ З ФІЗИКИ

*Сасенко О. В., магістрантка; Салтиков Д. І., доктор філософії (природничі науки)
Сумський державний педагогічний університет імені А. С. Макаренка, Суми, Україна*

На сьогодні, фізика як фундаментальна наука, яка вивчає природу, має крім наукового, ще й загальнокультурне значення. Вона є невід'ємною складовою загальної культури нашого суспільства. Тому, предметна компетентність з фізики за навчальними програмами включає в себе, крім когнітивного та діяльнісного компонентів, ще й і ціннісний. Ми поділяємо думку автора роботи [1], яка відмічає, що компетентності не треба протиставляти знанням, умінням і навичкам, вони передбачають свідоме їх використання. У структурі предметної компетентності з фізики учнів старшої школи слід виділити три компоненти: когнітивний, діяльнісний, особистісний (див. схему), які тісно пов'язані між собою.



Активізація навчальної пізнавальної діяльності учнів під час вивчення фізики у багатьох випадках пов'язана саме з ціннісною компонентою, яка включає розуміння учнями місця фізичної науки в системі загальнолюдських цінностей; розуміння необхідності розумного використання досягнень фізичної науки та технологій для подальшого розвитку людського суспільства; досвід морально-етичної оцінки використання наукових досягнень; розуміння власної відповідальності за захист довкілля тощо.

В освітньому процесі з фізики найповніше можна розкрити сутність соціально-економічних цінностей. Вони включають у собі відкриття та досягнення фізичної науки, які впливають на всі галузі матеріального виробництва, економіку, соціальний устрій та політику держави. Розуміння учнями їх сутності формується щодо фізичних основ устрою та принципу дії технічних пристроїв і технологічних процесів. Для формування в учнів розуміння економічної та соціальної ролі фізики як науки до змісту уроків слід включати інформацію про основні напрями науково-технічного прогресу та галузі сучасного виробництва, в яких використовуються досягнення фізики; про способи вирішення техніко-економічних проблем виробництва, які пропонує сучасна фізика (зменшення енерговтрат при передачі електроенергії на відстань; зменшення собівартості товару та збільшення його якісних характеристик при використанні нових матеріалів та технологій; пошук дешевих та безпечних джерел енергії тощо); про взаємозв'язок та взаємозумовленість розвитку науково-технічного потенціалу країни та її соціальну стабільність.

Важливим є також ознайомлення з впливом фізики на якість життя людини: фізичні методи діагностики та лікування в медицині, автоматизація виробництва та сільського господарства, електрифікація, телефонізація, комп'ютеризація, розвиток побутової техніки тощо.

Ще один аспект, у якому в учнів розкривається соціальна цінність фізики, - патріотичне виховання. Одним з дієвих способів формування ціннісного ставлення учнів до фізичного знання є розкриття здобутків вітчизняної фізичної науки та на конкретних прикладах висвітлення внеску українських учених у розвиток природничих наук. Крім цього, варто на прикладі життя й діяльності вчених-фізиків показати, що і як вони робили, аби досягнути успіху в певній науці.

У основі культурних цінностей лежить визнання загальнокультурної значущості фізики як науки. Аналіз навчальних програм [1] і підручників показує, що загальнокультурний зміст фізичної науки у шкільному курсі розкрито недостатньо. Під час навчання фізики треба виділяти фундаментальні поняття та закони, загальні для фізики та різних галузей мистецтва, архітектури, скульптури, кіно, театру, спорту. Включати інформацію про витвори мистецтва, в яких відображено наукове знання: науково-фантастичні твори літератури, твори усної народної творчості, мистецькі та науково-популярні фільми, поетичні твори, картини, скульптури. Розкривати сутність фізичних методів та засобів збереження культурної спадщини: реставрація, копіювання, зберігання тощо.

З навчанням фізики пов'язані також естетичні цінності. Показ краси природи у відображенні фізики, наукового пошуку, обґрунтованість та логічність математичних висновків; витонченість математичної форми запису фізичних законів; фото та відео зображення фізичних явищ. Естетичні переживання посилюють усвідомлення цінності наукового знання та розширюють традиційні уявлення про прекрасне.

Найважливішим елементом етичних цінностей є моральні принципи взаємодії науки, людини і природи. Тому, екологічна складова навчання фізики є, на сьогодні, особливо важливою.

Отже, ціннісний компонент є невід'ємною складовою предметної компетентності учнів з фізики.

Список використаних джерел

[1] Чайковська І. А. "Структура, зміст і модель формування предметних компетентностей з фізики в учнів старшої школи." Збірник наукових праць Кам'янець-Подільського національного університету ім. Івана Огієнка 21 (2015): С 300-303.

[2] Фізика та астрономія. Навчальні програми для 10-11 класів закладів загальної середньої освіти (рівень стандарту, профільний рівень) Авторський колектив під керівництвом Ляшенка О. І. Затверджено Міністерством освіти і науки України (наказ № 1539 від 24.11.2017 р.)

БЛОК ВИСОКОВОЛЬТНОГО ЖИВЛЕННЯ УСТАНОВКИ ВАКУУМНОГО МАГНЕТРОННОГО НАПИЛЕННЯ

Сайко М. О., м.н.с.; Ігнатенко С. М., м.н.с.

Інститут прикладної фізики НАН України, Суми, Україна

Розвиток сучасних технологій невід'ємно пов'язаний з розробкою багаторівневих систем керування і збору даних для формування бази параметрів процесу та їх візуалізації за допомогою засобів людино машинного інтерфейсу, використовуючи новітні комп'ютерно-інтегровані технології.

В НДЦ ННП ІПФ НАН України розроблено автоматизовану систему керування вакуумною установкою магнетронного розпилення, що побудована на принципах розподіленого керування, коли кожна функція локалізована в конкретному обчислювальному модулі з інтерфейсом Ethernet. В рамках цієї системи виготовлено та протестовано блок високовольтного живлення, підтверджені його параметри. Блок високовольтного живлення призначений для регульованого живлення магнетрона та п'єзоелектричного клапана напуску, збереження та відтворення режимів роботи установки. Блок має мережевий інтерфейс Ethernet та відповідний програмний інтерфейс.

Схема управління вимірює імпульсні напругу та струм та на їх основі розраховує усереднену потужність за одиницю часу, яку споживає магнетрон. Цей параметр задається та по ньому виконується стабілізація живлення. Схема керування управляє потужністю живлення магнетрона за допомогою зовнішнього диммера шляхом регулювання фази включення, при цьому диммер формує Zero-Cross сигнал переходу фази мережі в нулі, щодо якого контролер змінює час вмикання симістора від 0.1мс до 9.9мс за півперіод мережі.

Живлення п'єзоелектричного клапана напуску виконано по двохтактній схемі з підвищуючим трансформатором та високовольтним випрямлячем. Схема керування управляє напругою живлення за допомогою плати регулювання напруги шляхом програмування цифрового резистора MCP41010 за допомогою SPI-інтерфейсу. Вимірювання сигналу зворотного зв'язку з дільником напруги дозволяє контролювати напругу п'єзоелектричного клапана напуску.

Список використаних джерел

- [1] J T Gudmundsson, Physics and technology of magnetron sputtering discharges, Plasma Sources Science and Technology, Volume 29, Number 11.
- [2] В. В. Бураніч, І. В. Шелест, О. А. Гончаров, А. М. Юнда, С. А. Гончарова, «Технологічні особливості DC та RF магнетронного розпорошення» Journal of Surface Physics and Engineering, т. 3, № 3, с. 89-99, 2018.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ШВИДКОСТІ ПРОДУКУВАННЯ ТОЧКОВИХ ДЕФЕКТІВ ТА ТЕМПЕРАТУРИ НА РАДІАЦІЙНО-ІНДУКОВАНУ СЕГРЕГАЦІЮ В СПЛАВАХ Fe-Cr-Ni МЕТОДОМ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Скороход Р. В., м.н.с.; Коропов О. В., к.ф.-м.н., с.н.с., доц.
Інститут прикладної фізики НАН України, Суми, Україна

За умов опромінення в матеріалах відбуваються різноманітні процеси та явища такі як: каскадне утворення точкових дефектів (ТД), їхня анігіляція, радіаційно-стимульована дифузія ТД, радіаційно-індукована сегрегація (РІС), зародження і ріст дислокаційних петель, пор, виділень нової фази та ін. [1]. Названі процеси та явища призводять до погіршення механічної міцності і корозійної стійкості матеріалу, радіаційного розпухання, радіаційної повзучості, радіаційного зміцнення, зміни температури в'язко-крихкого переходу, постійної ґратки та розміру зерен, тощо. Особливого значення мають дослідження впливу опромінення на конструкційні матеріали ядерних реакторів. Для прикладу зазначимо, що реактори на легкій воді можуть зазнавати доз опромінення до 70 зміщень на атом (зна) при постійній швидкості продукування ТД $K_0 = 10^{-8} - 10^{-7}$ зна/с та температури $265 < T < 350^\circ\text{C}$ [2].

Для оцінки радіаційних пошкоджень в матеріалах реакторобудування проводять симуляційні експерименти з електронами або іонами. Швидкості продукування ТД за умов електронного та іонного опромінення дорівнюють $K_0 = 10^{-6} - 10^{-5}$ зна/с і $K_0 = 10^{-4} - 10^{-2}$ зна/с відповідно. При порівнянні результатів, які отримані за різних умов опромінення, вплив швидкості продукування ТД компенсують впливом температури [1].

Метою даної роботи є дослідження впливу швидкості продукування ТД K_0 та температури T на РІС в сплавах Fe-Cr-Ni.

Явище РІС полягає в перерозподілі компонентів сплаву за умов опромінення [1]. У випадку пласкої геометрії зразків з постійною товщиною l ($0 \leq x \leq l$) просторово-часова еволюція концентрацій компонентів та ТД в трикомпонентних сплавах Fe-Cr-Ni описується системою чотирьох зв'язаних диференціальних рівнянь в частинних похідних

$$\begin{cases} \frac{\partial C_k}{\partial t} = -\nabla J_k, & (k = \text{Cr, Ni}) \\ \frac{\partial C_v}{\partial t} = -\nabla J_v + K_0 - R_{iv}C_vC_i - k_v^2D_vC_v, \\ \frac{\partial C_i}{\partial t} = -\nabla J_i + K_0 - R_{iv}C_vC_i - k_i^2D_iC_i, \end{cases} \quad (1)$$

де J_k – потоки атомів сорту k , J_v та J_i – потоки ТД (вакансій і міжвузельних атомів), K_0 – швидкість продукування ТД, R_{iv} – коефіцієнт рекомбінації ТД, k_v^2 та k_i^2 – потужність стоків ТД, D_v і D_i – коефіцієнти дифузії ТД. Систему рівнянь (1) з відповідними початковими та граничними умовами розв'язано чисельно. Алгоритм її розв'язання наведено в роботі [3].

На рис. 1 зображено залежності $C_{\text{Cr}} = C_{\text{Cr}}(x)$ (рис. 1.а) та $C_{\text{Ni}} = C_{\text{Ni}}(x)$ (рис. 1.б) при $K_0 = 10^{-8}$ зна/с, $T = 350^\circ\text{C}$ (суцільна крива), $K_0 = 10^{-4}$ зна/с, $T = 350^\circ\text{C}$ (штрихова крива) і $K_0 = 10^{-4}$ зна/с, $T = 580^\circ\text{C}$ (пунктирна крива). Як показують розрахунки, у випадках $K_0 = 10^{-8}$ зна/с, $T = 350^\circ\text{C}$ та $K_0 = 10^{-4}$ зна/с, $T = 580^\circ\text{C}$ при $x > 5$ нм криві концентрації Cr C_{Cr} та Ni C_{Ni} приймають близькі значення. Поблизу поверхні їхні значення в одних і тих самих точках сильно відрізняються. Тобто, поблизу поверхні зразка збільшення температури T не компенсує збільшення швидкості продукування ТД K_0 .

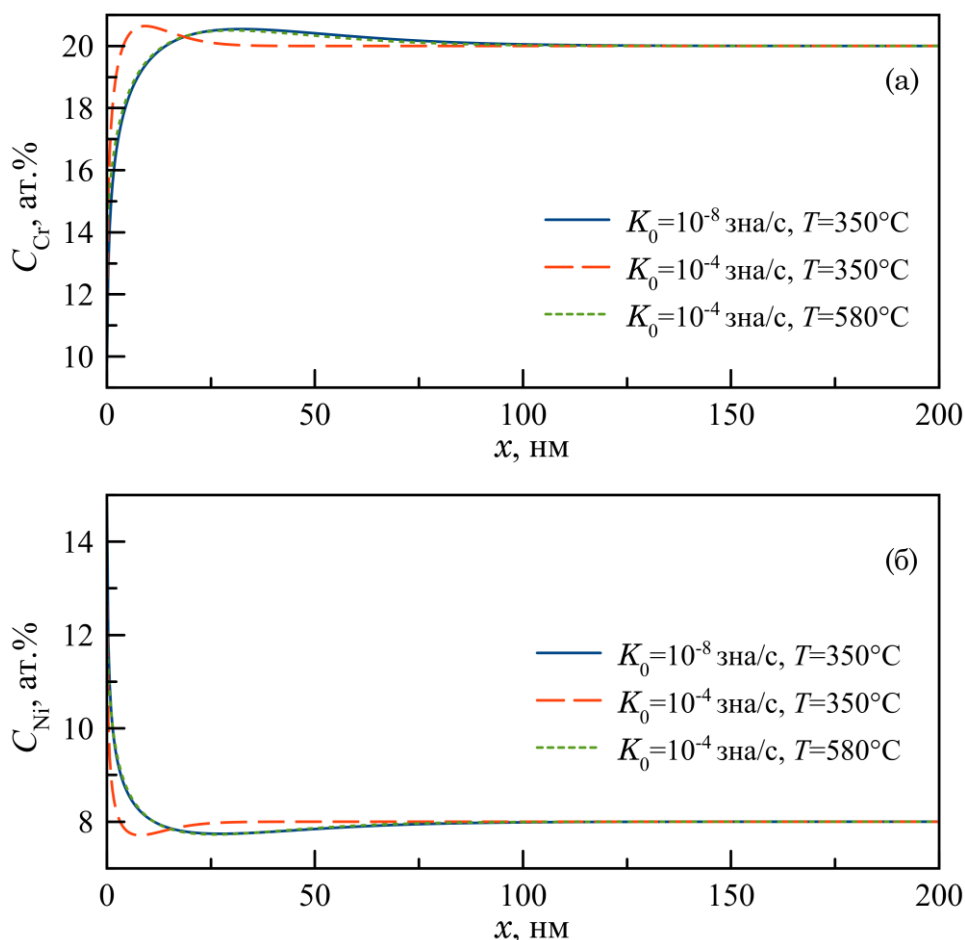


Рис. 1. Концентраційні профілі Cr та Ni.

Список використаних джерел

- [1] G. S. Was, Fundamentals of Radiation Materials Science. Metals and Alloys (2nd ed.), New York: Springer, 2017.
- [2] S. Zinkle and G. Was, «Materials challenges in nuclear energy,» Acta Mater., vol. 61, no. 3, pp. 735-758, 2013.
- [3] Р. Скороход, О. Бугай, В. Білик, В. Денисенко та О. Коропов, «Моделювання радіаційно-індукованої сегрегації в бінарних сплавах,» East Eur. J. Phys., т. 5, № 1, с. 61-69, 2018.

ВИКОРИСТАННЯ ДИНАМІЧНОГО ГРАФІЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ І ЯВИЩ ПІД ЧАС ВИВЧЕННЯ ПРИРОДНИЧИХ ДИСЦИПЛІН У ЗАКЛАДАХ ФАХОВОЇ ПЕРЕДВИЩОЇ ОСВІТИ

Стома В.М., доктор філософії (Професійна освіта. Комп'ютерні технології)
Відокремлений структурний підрозділ «Сумський фаховий коледж НУХТ», Суми, Україна

Застосування динамічного графічного моделювання під час вивчення природничих дисциплін дозволяє візуалізувати явища, процеси, динаміку об'єктів, важкодоступних для спостереження в реальному світі, представити рухомі елементи, показуючи найбільш важливі з погляду освітніх цілей і завдань характеристики досліджуваних об'єктів і процесів.

Існує велике різноманіття засобів динамічного графічного моделювання для вивчення природничих дисциплін: засоби для створення анімацій (графічні пакети 3D Studio, AutoCAD, Blender тощо, середовище розробки Flash, графічні бібліотеки Direct3D OpenGL, та ін.); готові динамічні графічні моделі з мережі Інтернет (PhET (Physics Education Technology), VirtuLab та інші); додатки та застосунки з Google Play та App Store.

Наведемо приклади застосування динамічних графічних моделей під час вивчення природничих дисциплін у закладах фахової передвищої освіти:

1) Використовуючи застосунок 3D Engineering Animations [1] (рисунк 1-2) під час вивчення теми «Теплові машини. Принцип дії теплових машин. Цикл теплових машин» дослідили принцип роботи чотиритактного дизельного двигуна внутрішнього згоряння (приховуючи частини його корпусу, досліджували зовнішній вигляд, призначення та функції його деталей, проводили ретельний аналіз складових частин пристрою, спостерігали за його роботою з різним масштабом та під різним кутом зору).

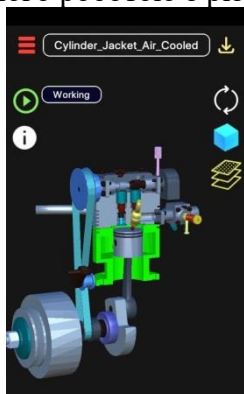


Рис.1 Інтерфейс «3D Engineering Animations»

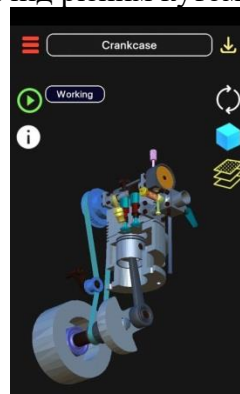


Рис.2 Інтерфейс «3D Engineering Animations»

2) Під час розгляду побудови атомного ядра застосовується стимуляція з PhET (Physics Education Technology) [2] (рисунк 3), за допомогою якої можна пояснити, як зміна числа нейтронів або протонів впливає на атомний номер і вид ізотопу; описати, як різні

розпади змінюють нуклони в ядрі, і чи це змінює символ показаного атома та впливає на такі параметри, як атомний номер/атомна маса.

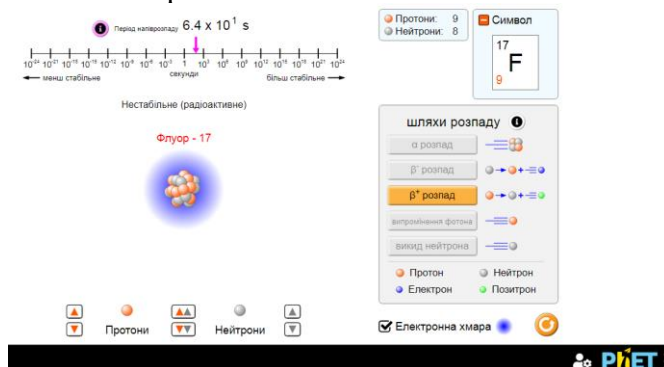


Рис.3 «Побудова атомного ядра» в PhET

3) Sky Map (рисунок 4-5) [3] — це портативний планетарій за допомогою якого можна визначити вигляд зоряного неба у довільний момент доби будь-якого дня року. На практичній роботі з астрономії «Рухомі карта зоряного неба» застосування цього додатку дозволяє ефективно розв'язувати практичні задачі щодо визначення умов видимості небесних світил для заданого пункту Землі, тобто моментів їх сходу над горизонтом, заходу за горизонт, кульмінації тощо.



Рис.4 Інтерфейс
«Sky Map»



Рис.4 Інтерфейс
«3D Sky Map»

Під час використання динамічних графічних моделей при вивченні природничих дисциплін у закладах фахової передвищої освіти дозволяє створити цілісний образ об'єкта, процесу явища яке моделюється. Динамічні графічні моделі дозволяють дослідити не тільки готові результати, але й розглядати процес їхнього одержання, дослідження, формують в здобувачів освіти здатність продукувати нестандартні ідеї й рішення, сприяють розвитку інтуїції.

Список використаних джерел:

- [1] 3D Engineering Animations [Електронний ресурс]. Available: <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.vaibhavkokare.thirddimension&hl=ru&gl=US> Accessed on: March 07, 2023.
- [2] PhET [Електронний ресурс]. Available: https://phet.colorado.edu/sims/html/build-a-nucleus/latest/build-a-nucleus_uk.html Accessed on: March 07, 2023.
- [3] Sky Map [Електронний ресурс]. Available: <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.google.android.stardroid>. Accessed on: March 07, 2023.

НАОЧНІ МЕТОДИ НАВЧАННЯ ПРИ ВИВЧЕННІ БІОФІЗИКИ

**Федів В.І., д. ф.-мат. н., проф., зав. каф., Олар О.І., к. ф.-мат. н., доц.,
Бірюкова Т.В., к. техн. н., доц.**

Буковинський державний медичний університет, Чернівці, Україна

Вивчення біофізики студентами-першокурсниками медичних ЗВО ускладнено недостатнім рівнем знань з природничих дисциплін отриманих у закладах середньої освіти. Один з напрямків якісного покращення вивчення дисципліни полягає у структурованому та доцільному використанні таких методів наочності, як спостереження, ілюстрування та демонстрування.

Метод спостереження ефективно використовувати при узагальненні протікання явищ та процесів. Ілюстративний метод дозволяє показати студентам різноманіття процесів, які відбуваються при вивченні тієї чи іншої теми, дозволяє зазирнути у структурні елементи досліджуваного об'єкта, тощо. Основою для демонстраційного методу можуть слугувати різноманітні пристрої, устаткування, відео та навчальні фільми, інтерактивна дошка, комп'ютерні симуляційні програми. Їх застосовують з метою підвищення інтересу до предмета, що вивчається; для підвищення мотивації навчання студентів; виконання практичних (лабораторних) робіт; розгляду проблемних ситуацій і т.ін.

На кафедрі біологічної фізики та медичної інформатики Буковинського державного медичного університету створено цифровий репозиторій матеріалів різноманітних наочних методів: плакати (в паперовому та цифровому форматі); відео (для пояснення нової теми та для виконання практичної частини заняття); презентації до кожного заняття; відеолекції.

Використовуючи вищевказані інструментарії викладацький склад кафедри дослідив, що з моменту початку застосування наочних методів навчання у повному обсязі підвищився інтерес до вивчення біофізики, зросла зацікавленість студентів до проведення практичної частини заняття, зросла кількість студентів, які із заохоченням стали брати участь у створенні навчальних відео до теми заняття. Все це, в цілому, сприяло підвищенню зацікавленості студентів навчальним матеріалом і його засвоєнню, покращення відвідуваності студентського наукового гуртка, і як результат підвищення мотивації до вивчення дисципліни і якісного показника успішності.

Таким чином, викладачі кафедри продовжують напрацювання у напрямку збільшення кількості якісного наочного матеріалу до практичних занять із залученням студентів, що, на нашу думку, сприятиме підвищенню рівня вмотивованості навчання та покращення успішності з біофізики.

Список використаних джерел

[1] Багрій К.Л. Наочність у викладанні та її значення у навчальному процесі. *Проблеми освіти та методика викладання у вищій школі*. Вип. І (61), с. 260-268, 2016.

ЕЛЕМЕНТИ ПРОБЛЕМНОГО НАВЧАННЯ В ЗМІСТОВИХ БЛОКАХ ЗАГАЛЬНОЇ ТА ПРИКЛАДНОЇ БІОФІЗИКИ ПРАКТИЧНИХ ЗАНЯТЬ ДЛЯ СТУДЕНТІВ МЕДИЧНИХ ЗВО

**Федів В.І., д. ф.-мат. н., проф., зав. каф., Олар О.І., к. ф.-мат. н., доц.,
Бірюкова Т.В., к. техн. н., доц.**

Буковинський державний медичний університет, Чернівці, Україна

Біофізика - наука, що вивчає особливості та фізичні закономірності функціонування живих систем на всіх рівнях їх організації, має власну теоретичну базу і вектор розвитку,

крім того, тісно пов'язана з рештою природничих наук. Вона є прихованою компонентою в складі медичних наук, і головним елементом зв'язку в комплексі «причина-наслідок», сприяє формуванню у здобувачів освіти навиків пошуку відповіді на запитання «Чому?», лежить в основі формування цілого ряду інтегральних, загальних і фахових компетентностей у здобувачів освіти напрямку «Охорона здоров'я».

Тому доцільним на практичних заняттях з дисциплін «Медична та біологічна фізика», «Біологічна фізика з фізичними методами аналізу» та в рамках семестрових індивідуальних проєктів є використання проблемних методів навчання. Проблемні методи базуються на цільовій настанові «Не від знання до проблеми, а від проблеми - до знання!». Це сприяє інкорпорації студентів в активну інтелектуальну та практичну діяльність, відбувається співтворчість студента і викладача. Викладач продумує не тільки систему запитань, а й передбачувані відповіді студентів і можливі «підказки», які направляють їх думку у потрібне русло при проведенні практичних занять і керує семестровим проєктом студента, який виявив бажання познайомитися глибше з конкретною проблемою. Розгляд проблемних ситуацій на заняттях і виконання власно обраного напрямку для семестрового індивідуального проєкту дозволяє підвищити інтерес студентів до вивчення біофізики, підвищує рівень навченості й уміння вирішувати проблеми, наближені до реальних ситуацій. Викладач підводить підсумок, допомагаючи студентам зробити правильні висновки. Під час розв'язання проблемних ситуацій формуються інтелектуальні вміння, навички найпростіших узагальнень, вміння формулювати питання, аргументувати відповідь, знайти причинно-наслідковий зв'язок, підвищується рівень компетентності студентів і готовність брати відповідальність за свої дії.

Звичайно, існують певні проблеми при виконанні семестрових індивідуальних проєктів студентами першого курсу (недостатня неінформативність, відсутність або недостатня структурованість матеріалу, розпливчастий висновок та ін.), оскільки їм бракує таких навиків на початку навчання. Але це дозволяє студентам набувати навиків навчатися, сприяє розвитку когнітивних та інших ключових компетенцій, які формуються під час вивчення фізично орієнтованих предметів. Це ефективний засіб навчання, який позитивно оцінюється зацікавленими студентами.

Таким чином, вважаємо, що розгляд проблемних ситуацій на заняттях, робить заняття більш значущим, так як це слідує логіці процесу наукового пізнання: Ф - Г - М - Е (факти - гіпотеза - модель - експеримент). Вміння висувати гіпотези, вирішувати проблеми дає можливість гармонійно співіснувати з навколишнім середовищем, відповідає вимогам сучасної підготовки спеціалістів закладів вищої медичної освіти.

Список використаних джерел

[1] В.В. Каплінський Методика викладання у вищій школі: Навчальний посібник /В. В Каплінський. Вінниця: ТОВ «Ніланд ЛТД», 2015, 224 с.

РАДІАЦІЙНЕ СЕРЕДОВИЩЕ І ЗАРЯДЖЕНІ ЧАСТИНКИ МАГНІТОСФЕРНОЇ ПЛАЗМИ ЮПІТЕРА

Фоміна А.П.^{1,2} Новак О.П.³, Маслов В.І.⁴, Хелемеля О.В.³, Холодов Р. І.³

¹Інститут теоретичної фізики ім.М.М.Боголюбова НАН України, Київ, Україна

²Університет Париж-Сакле, Орсе, Франція

³Інститут прикладної фізики НАН України, Суми, Україна

⁴ІНЦ Харківський фізико-технічний інститут, Харків, Україна

Дослідження впливу магнітосферної плазми, заряджених частинок та випромінювання на галілеєві супутники Юпітера є актуальною проблемою сучасної фізики. Гігантська магнітосфера Юпітера з її різноманітними частинками і потужними полями

суттєво впливає на супутники. Дія частинок магнітосфери на поверхню супутників створює їх атмосфери та хмари атомів на їх орбітах, призводить до радіаційних ефектів на поверхні та змінює їх склад[1-3]. В свою чергу, джерелами магнітосферної плазми є також вулканічна активність, вивільнення та іонізація атомів з поверхонь супутників. У роботі розглядається динаміка електронів та процеси, які можуть впливати на формування потоків електронів у подвійних плазмових шарах у рамках задачі про реалізацію ефекту циклотронного надвипромінювання(ЦНВ). Показано можливість утворення подвійних шарів із необхідними характеристиками внаслідок взаємодії електронних струмів із плазмою іоносфери Юпітера.

В попередніх роботах було запропоновано оригінальну модель генерації надпотужного радіовипромінювання Юпітера, яка заснована на ефекті когерентного ЦНВ Фоміна-Дікке для системи інвертованих електронів на високих рівнях Ландау в розрідженій плазмі замагніченої. Відповідно до моделі пучки електронів, прискорені від Іо до Юпітера, відбиваються від подвійних шарів, що виникають у плазмі іоносфери. Потім відбиті електронні пучки рухаються вгору та переходять у когерентний режим надвипромінювання. Критерій переходу в режим ЦНВ залежить від таких характеристик електронних пучків, як щільність і температура.

Розглянуто процеси, що можуть забезпечити умови для фазового поляризаційного переходу в режим ЦНВ в області основи токової трубки Іо. Висока потужність ЦНВ дозволяє розглядати його як основний механізм генерації декаметрових радіобурь S-типу, джерелом яких є система Юпітер-Іо. Було показано, що наявність подвійного плазмового шару в області підшови струмової трубки Іо забезпечує формування щільних висхідних електронних згустків, для яких можливий фазовий перехід до режиму ЦНВ.

За допомогою чисельного моделювання було показано утворення квазістаціонарного подвійного шару при взаємодії пучка електронів з плазмою[4,5]. При інжекції пучка електронів від Іо зі щільністю 10^4 см^{-3} в плазму іоносфери Юпітера утворюється подвійний шар в ділянці, де щільності пучка та плазми приблизно рівні. Знайдено фазовий портрет подвійного шару та розподіл вільної та захопленої компонент електронного пучка.

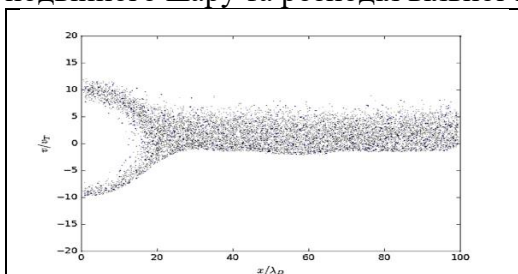


Рис.1. Типовий вид фазового портрета системи.

Також показано формування холодних електронних пучків, для яких можливий перехід в режим ЦНВ. У ділянці подвійного шару спостерігається характерне падіння потенціалу. Після інжекції в плазму пучка електронів протягом часу $\sim 30/\omega_p$ на фазовому портреті системи встановлюється квазістаціонарна картина з подвійним шаром, що відбиває частину пучка назад.

Список використаних джерел

1. B.H.Mauk, et al. Discrete and broadband electron acceleration in Jupiter's powerful aurora, Nature 549, 66, 2017.
2. N.Krupp, et al. Dynamics of the Jovian Magnetosphere, in Jupiter: Planet, satellites, magnetosphere, Cambridge Univ. Press, U.K., 2004.
3. J. E. P. Connerney, S. Timmins, A New model of Jupiter's magnetic field at the completion of Juno's prime mission, JGR Planets, V.127, 2, 2021.
4. O.P.Novak, R.I.Kholodov, A.P.Fomina, Role of Double Layers in the Formation of Conditions for a Polarization Phase Transition to the Superradiance state in the Io Flux Tube, Ukrainian Journal of Physics, 63(8), p.740, 2018.
5. V.I.Maslov, O.K.Chernykh, A.P.Fomina, R.I.Kholodov, O.P.Novak, R.T.Ovsiannikov, Vortex structures and electron beam dynamics in magnetized plasma, Ukrainian Journal of Physics, 66(4), p.310, 2021.

РЕАЛІЗАЦІЯ КОМПЕТЕНТНІСНОГО ПІДХОДУ В ОСВІТНЬОМУ ПРОЦЕСІ ЗАСОБАМИ ПРОЕКТНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

**Черв'яцов В.О.¹, магістрант; Черв'яцова Ю.О.², заступник директора з НВР, учитель
фізики**

¹Сумський державний педагогічний університет імені А. С. Макаренка, Суми, Україна

²Сумська ЗЗСО № 12 СМР

Стаття 12 Закону України «Про освіту» визначає мету повної загальної середньої освіти та пов'язує її з всебічним розвитком, вихованням і соціалізацією особистості, яка здатна жити у суспільстві та цивілізовано взаємодіяти з природою, має прагнення до самовдосконалення і навчання впродовж життя, проявляє готовність до свідомого життєвого вибору та самореалізації, відповідальності, трудової діяльності та громадянської активності [1].

Поставимо запитання: «Яким чином можна досягти даної мети?» У нашій країні прийнятий компетентнісний підхід. Освітній процес при цьому спрямований на досягнення результатів у навчанні, які є інтегральними та включають ключові і предметні компетентності здобувачів освіти. Серед освітніх технологій, на сьогодні, успішно реалізуються проектні технології. Їх використання як освітніх інновацій дає змогу не тільки оновити сам процес навчання, а й спонукає здобувачів освіти самостійно реалізовувати інноваційну діяльність, заохочує до продуктивної навчальної діяльності, розвиває в учнів творче мислення, актуалізує цінність пошуку нових шляхів для вирішення завдань, запровадження нових ідей тощо.

Проектна технологія припускає створення вчителем під час освітнього процесу таких умов, за яких його результатом є вдосконалення індивідуальності учня, розкриття його потенційних здібностей, виховання мотивації, особистісних та вольових якостей: самостійності, цілеспрямованості, організованості в роботі.

За групою результатів «Досліджує природу», вказаних у Державному стандарті базової освіти [2], система оцінювання навчальних досягнень учнів формулюється так: проводять практичну роботу/практичні роботи (спостереження, експеримент), тематика якої/яких означена модельною навчальною програмою. Одним з видів діяльності учня / учениці, що може оцінюватися підсумковим оцінюванням є проектна діяльність. Учнівські проекти оцінюються за відповідними критеріями, з якими учні / учениці ознайомлюються заздалегідь. Дослідницька діяльність є провідною в інтегрованих курсах природничої освітньої галузі: учнівство конструє знання у процесі дослідження природи індивідуально або в групі. До дослідницьких умінь належать уміння: бачити проблему, висувати гіпотези, визначати способи розв'язання проблеми й обирати оптимальний, визначати послідовність дій при проведенні дослідження, систематизувати інформацію, фіксувати дані/результати дослідження, інтерпретувати результати, робити висновки.

Як досягти формування елементів знань, умінь і навичок проектної діяльності?

Найвдалішими моментами для цього є практичні, лабораторні роботи, навчальні заняття з організацією групової взаємодії, ігрові або будь-які діяльнісні форми організації освітнього процесу. У такому разі з'являється можливість перевести учня з пасивної позиції в активну і дати йому необхідну свободу для виявлення себе, своєї самостійності. Без цієї свободи і можливості діяти проектні уміння формуватися не можуть. Роботу над проектом завжди спрямовано на розв'язання конкретної проблеми. Немає проблеми – тож немає і діяльності. Частіше теми проектів стосуються певного питання, актуального для практичного життя та потребують залучення знань учнів не з одного предмета, а з різних сфер, а також творчого мислення та дослідницьких навичок. Таким чином досягають природної інтеграції знань [3].

Для продуктивної проектно-навчальної діяльності у здобувачів освіти необхідно формувати вміння самостійно генерувати ідеї, залучаючи знання з різних галузей знань;

самостійно здійснювати пошук інформації, формувати правильно запитання, знаходити декілька варіантів вирішення проблеми; висувати власну гіпотезу, встановлювати причинно-наслідкових зв'язки та презентувати результат своєї праці.

Отже, сучасному вчителю необхідно працювати і над вирішенням задач компетентнісної освіти, і над формуванням в учнів навичок проєктування. Варто зробити лише крок до більшої самостійності і діяльнісного залучення учнів до освітнього процесу.

Список використаних джерел

- [1]. Закон України «Про освіту» зі змінами 2023 рік №2145-VIII від 05.09.2017.
- [2]. Постанови Кабінету Міністрів України “Про затвердження Державного стандарту базової середньої освіти ” від 30 вересня 2020 р. № 898
- [3]. Інноваційні технології навчання: Навч. посібн. для студ. вищих технічних навчальних закладів / [Кол. авторів; відп. ред. Бахтіярова Х.Ш.; наук. ред. Арістова А.В.; упорядн. словника Волобуєва С.В.]. – К. : НТУ, 2017. 172 с.

«ВИКОРИСТАННЯ MIND MAPPING ДЛЯ ВИВЧЕННЯ КЛЮЧОВИХ ПОНЯТЬ ТЕРМОДИНАМІКИ»

Шатова О. Д.¹; Каленик М. В.², к.п.н, доцент

¹ Сумський хіміко-технологічний центр професійно-технічної освіти, Суми, Україна

² Сумський державний педагогічний університет імені А. С. Макаренка, Суми, Україна



Рис. 1. Застосування термодинаміки елементами MINDLY

Вивчення термодинаміки може бути викликом для багатьох учнів, оскільки містить багато складних термінів та формул. Новітні дослідження показують, Mind Mapping - це потужний інструмент для візуалізації та структурування навчального матеріалу, що

допомагає опанувати складні концепції термодинаміки, встановлювати взаємозв'язки між термодинамічними концепціями та їх застосуванням у реальному світі, рис. 1

Метод ментальних карт можна використовувати для створення інтерактивних діаграм та моделей, які сприятимуть опануванню основних понять «термодинамічна система», «термодинамічні параметри», «термодинамічна рівновага», «закони та процеси термодинаміки» і т.і, [1]

Якщо, у процесі створення моделі, додати перелік означень : внутрішня енергія, температура, об'єм, тиск, робота тощо, то можна встановити зв'язки між ними, продемонструвавши метод вимірювання температури за зміною об'єму рідини та навести на думку про неоднозначність, оскільки різні тіла мають свої закони зміни об'єму від температури, [2]

Техніку ментальних карт можна використати як метод розв'язування задач та оформлення законів термодинаміки, рис. 2

Якщо, умова задачі передбачає знаходження роботи газу, то центральними гілками у мапі стануть параметри (об'єм, тиск та температура) та формули для розрахунку.

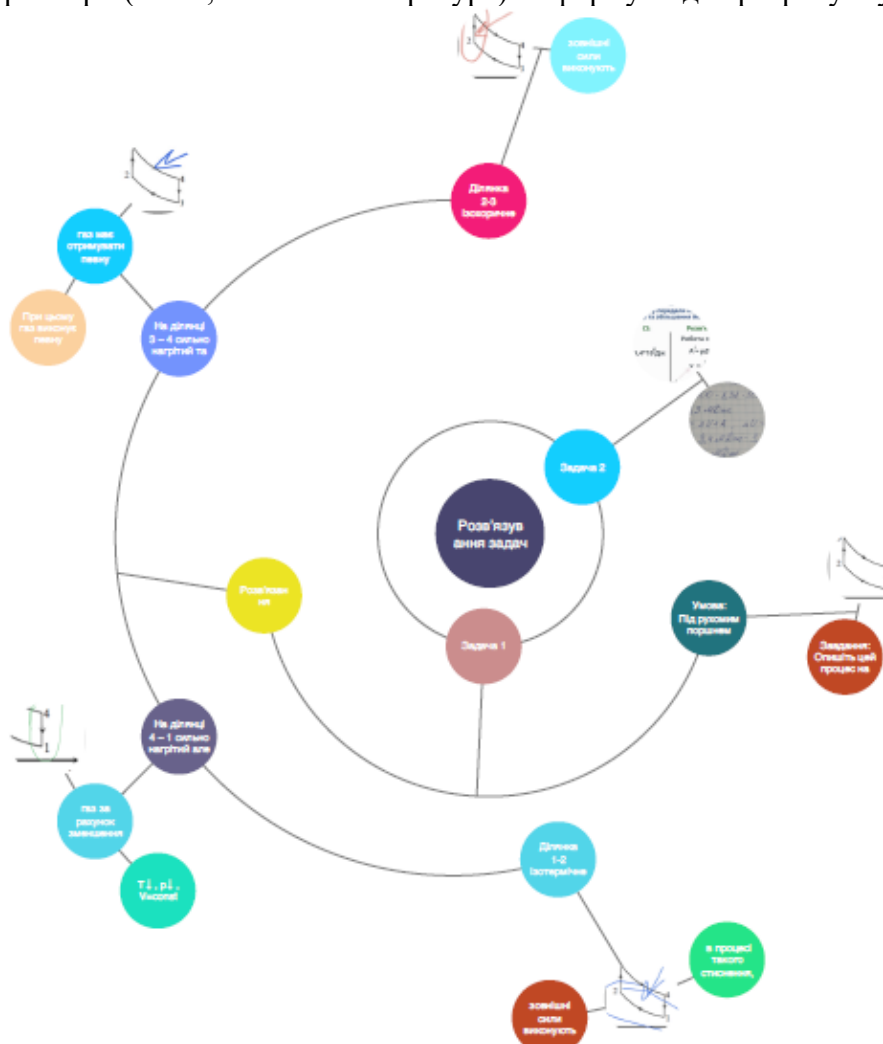


Рис. 2. Розв'язування задач елементами MINDLY

Наприклад, при введенні першого закону термодинаміки, як кількісну сторону процесів перетворення енергії, - створити гілки з видами енергії, такими як механічна, теплова, хімічна та інші і відтворити їх процес їх перетворення одна в іншу, на прикладі графіків термодинамічних процесів.

Також використання Mind Mapping можна поєднувати з іншими методами навчання, такими як відеоуроки, вправи та тестування. Наприклад, після ознайомлення з мапою, запропонувати учням виконати тестові завдання або вправи за темою.

В цілому, використання техніки ментальних карт є ефективним методом для організації та запам'ятовування ключових понять термодинаміки, а також для розв'язування задач і демонстрації основних понять та законів. Нарешті, таку техніку можна використовувати не тільки для вивчення теоретичних аспектів термодинаміки, але і для демонстрації таких процесів та залежностей.

Список використаних джерел

- [1] І. Є. Соколовська, А. Рижов, «Конспект лекцій для здобувачів вищої освіти першого рівня зі спеціальності 274 «Автомобільний транспорт»,» с. 125, 2016.
- [2] І. Є. Березняк, О. В. Ромашко, Методичні вказівки для проведення практичних занять, виконання курсової роботи та самостійної роботи з дисципліни «Термодинаміка»-, Харків, 2012.

ЧЕТВЕРТИЙ ПОСТУЛАТ МОЛЕКУЛЯРНО-КІНЕТИЧНОЇ ТЕОРІЇ ДЛЯ НАНОРОЗМІРНИХ КРИСТАЛІВ

Шірінян А. С., д.ф.-м.н, доц., зав.лаб.

Інститут прикладної фізики НАН України, Суми, Україна

Рентгенографічні дослідження металів нанодисперсних матеріалів демонструють зміну параметра решітки для багатьох металів (для Ag, Au, Bi, Pt, Fe, Cu, Cr параметр решітки в межах до 1-2% виявився зміненим). Цей експериментальний факт наводить на думку про можливі колективні ефекти самоорганізації атомів наноматеріалу і, як наслідок, існування розмірної залежності потенціальної енергії взаємодії атома з сусідніми атомами в об'ємі наноматеріалу. У рамках квантової механіки такий вплив пояснюють квантуванням енергії фононів, ангармонізмом коливання, що посилюється з підвищенням температури. Актуальною є перевірка гіпотези про розмірну залежність міжатомної взаємодії, яка зумовлена оптимізацією енергії кристалу й просторового розташування атомів в наносистемі при нульових температурах, коли коливання відсутні.

Мета дослідження полягає у аргументації постулату молекулярно-кінетичної теорії для нанокристалу, а саме, гіпотези залежності величини усередненої енергії взаємодії атома з найближчими сусідами в об'ємі нанокристалу за нульової температури від розміру кристалу, що зумовлено колективними ефектами взаємодії атомів [1].

Новий підхід дає змогу пояснити зміну умов фазової рівноваги, зміщення кривих фазових діаграм, зміну дифузійної рухливості атомів в нанодисперсних системах і дає нове розуміння базових понять науки про матеріали.

Проведені нами дослідження рівноважних станів суцільних металевих наноплівки методом молекулярної статистики з потенціалом Сатона-Чена підтверджують існування колективного ефекту, який приводить до перерозподілу положень всіх атомів, зміни щільності речовини плівки, анізотропії зміни міжатомної відстані (різні значення у різних напрямках) й наявності розмірної залежності для енергії міжатомної взаємодії. Молекулярно-статичні розрахунки виявляють, що розмірний ефект присутній як для поверхневих шарів, так і для об'ємних атомів нано-кристалічного матеріалу. Ефект зумовлений тим, що в наносистемі зменшення розмірів приводить до того, що обрізається частина далекодіючого «хвоста» потенціалу міжатомної взаємодії.

Список використаних джерел

- [1] A.S. Shirinyan Concept of size dependent atomic interaction energies for solid nanomaterials: thermodynamic and diffusion aspects, Metallofiz. Noveishie Tekhnol, vol. 37, p.475-486, 2015.

ІННОВАЦІЙНІ ПІДХОДИ ДО НАВЧАННЯ ФІЗИКИ У ЗАКЛАДАХ ЗАГАЛЬНОЇ СЕРЕДНЬОЇ ОСВІТИ

Щербак М.О. магістрантка

Сумський державний педагогічний університет імені А. С. Макаренка, м. Суми, Україна

Фізика – це фундаментальна наука про природу, весь навколишній світ від атомів і молекул до глибин Всесвіту. Успіх при вивченні цього предмету залежить від таких аспектів на уроці: творчості та активності учня, його вмінню критично мислити та обґрунтовувати свої думки, вести дискусію та відстоювати свою точку зору. В суспільстві існує думка, що найкращий учитель той, хто викликає в учнів бажання вчитися. Так, дійсно, щоб навчити дитину, потрібно не лише передавати їй знання та вміння, а й насамперед викликати зацікавленість до вивчення предмету. На практиці учитель більшу частину уроку пояснює, ілюструє, запитує і мало часу відводить на пізнавальну діяльність учнів. Проблемні, дослідницькі та практичні методи використовуються недостатньо, в результаті чого маємо недостатній розвиток самостійного мислення учнів, невміння вибирати ефективні прийоми при роботі з новим матеріалом та підручником [1].

Прискорення науково-технічного прогресу, інформаційна революція в сучасному суспільстві вимагає нових підходів до навчання й виховання молодого покоління. Традиційні педагогічні підходи до організації навчально-виховного процесу все частіше не задовольняють потреби і вчителів, і школярів в ефективному, інтенсивному пізнанні навколишнього світу, особливо з такого предмету, як фізика, у формуванні в результаті такого пізнання цілісної наукової картини світу [2].

На сьогодні урок залишається основною формою проведення навчання у закладах загальної середньої освіти. Але реалії сучасного життя потребують модернізації освітнього процесу. Впровадження нових інноваційних технологій навчання, окрім надання знань, повинні допомогти учням навчитися самостійно засвоювати знання, знаходити та опрацьовувати потрібну інформацію, адже творчі та енергійні діти стають активним учасниками суспільних відносин. Постійний пошук нового оригінального та нестандартного вирішення різноманітних завдань спонукає до оновлення та створення різних новаторських методів та прийомів для отримання очікуваних результатів.

При плануванні уроку фізики, в умовах технологічного розвитку сьогодення, вчитель може використовувати безліч інтернет ресурсів, презентацій, моделей розв'язків задач, дослідів та експериментів, навчальних відеороликів та різноманітних форм контролю вивченого матеріалу.

Отже, використання сучасних інноваційних технологій дозволяє створити комфортні умови для розвитку, враховуючи інтереси всіх здобувачів освіти. Їх застосування дозволяє розвивати не тільки інтелектуальні здібності а й духовні аспекти, що позитивно сприяє соціалізації учнів.

Список використаних джерел

- [1] Кіча Р.І. – Інноваційні технології – запорука успішного викладання фізики у сучасній школі: Генезум 2020
- [2] Захарчук Т.В. – Інноваційні технології навчання в сучасній школі: Освіта регіону: політологія, психологія, комунікації: Український науковий журнал – Гол. ред. В.М. Бебик. – 2011. – Т.3. – С.48.

3D ACOUSTIC METAMATERIALS WITH CONTROLLABLE BANDGAP GATES BASED ON MAGNETORHEOLOGICAL ELASTOMERS

**Kolupaiev V. O., student, subject area "104 Physics and Astronomy"; Gorshkov V. N., Dr.
Phys.-Math. Sc., prof.**

*National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv,
Ukraine*

Metamaterials are artificial media whose physical properties differ significantly from those of their constituents. Accordingly, acoustic metamaterials (AMMs) exhibit such emergent properties that allow controlling the mechanical waves propagating in them. For example, AMMs can have a negative refractive index, which can be used to control the direction of sound wave propagation and even direct the energy flow in the opposite direction to the wave vector without phase variations. AMMs have many practical applications, such as sound insulation, acoustic cloaking, and superlensing.

Among all applications, one can be separately distinguished - the creation of acoustic filters, which is associated with the ability of the metamaterial to prevent the propagation of acoustic waves in a certain frequency range, in other words, to form band gaps. This work aims to investigate the principles of controlled band gap formation in a three-dimensional acoustic metamaterial (3D-AMM) in real-time using an external magnetic field.

This study considers a 3D-AMM consisting of an elastic medium into which elementary cells/vibrators that form a symmetrical and ordered structure are immersed. The elementary cell, in turn, consists of an elastic core covered with a flexible shell. The cores can have either a cubic, "isotropic" shape or an elongated "anisotropic" shape.

The spring-mass model was used for creating a numerical model of the AMM described above. The wave vector changes along the trajectory connecting the singular points of the first Brillouin zone. The stiffness of the core springs is constant, and the stiffness of the shell springs and the external environment is variable and represents the change in the elasticity of a magnetorheological elastomer, a material whose elasticity changes under the induction of the magnetic field. On the basis of this approach, a mathematical model of the above-described 3D-AMM was created, which was used to study the mechanisms of the formation of the band gaps.

Both isotropic and anisotropic variants of elementary cells were studied, and the latter showed the ability to form not only general (isotropic) but also directional band gaps. As a result of the analysis of the numerical computations, it was possible to establish certain regularities. Namely, depending on the stiffness of the elastic environment and shell, the process of formation of band gaps can be divided into three stages. The first one is that at low stiffness, the number and width of the band gaps change rapidly. In the second stage when the number of band gaps is constant at a certain range of stiffnesses, their width and frequency range are slightly increasing, achieving a quasi-saturation effect. The third stage, at stiffnesses greater than in the second stage, is characterized by the fact that the acoustic surfaces between the supremum of the high-frequency and infimum of the low-frequency band gaps begin to degenerate, which reduces the energy transfer almost to zero and creates a complex band gap that isolates the energy transmission in its range. Also, the study revealed that increasing the complexity (number of masses) of the core gives a useful effect of increasing the width and number of band gaps only up to a certain limit, further increase in the size of the core only reduces the effective property of the metamaterial to create band gaps.

The approach that is used in this work and the results obtained are useful to improve the understanding of the formation and real-time control of band gaps in acoustic metamaterials and make it possible to design new types and forms of AMMs that can be used for sound insulation, creation of controlled frequency filters, and manipulation of the direction of wave propagation and energy flows.

ПЕРЕВАГИ І НЕДОЛІКИ «ЗМІШАНОГО НАВЧАННЯ» В ЗАКЛАДАХ ФАХОВОЇ ПЕРЕДВИЩОЇ ОСВІТИ ПРИ ВИКЛАДАННІ ФІЗИКИ.

Комар Наталія Дем'янівна, викладач фізики

ВСП «Машинобудівний фаховий коледж Сумського державного університету»

Останні три роки – роки викликів для освіти в Україні. Пандемія коронавірусу, а тепер повномасштабна війна, суттєво обмежили можливість здобувачів освіти фізично відвідувати заклад освіти і тим самим підштовхнули освітян до пошуку нових форм та форматів навчання. І коли під час пандемії основним завданням було обмежити фізичні контакти, щоб мінімізувати розповсюдження вірусу, то в умовах повномасштабної війни стоїть завдання зробити освітній процес безпечним, не втративши його якості.

Дистанційна освіта, безперечно, має свої переваги, та водночас, є і недоліки дистанційки, що впливають на результати навчання, педагоги назвали відсутність живого спілкування та невміння самостійно вчитися [1].

У загальному розумінні «змішане навчання» – це навчання, за якого частина пізнавальної діяльності відбувається на занятті під безпосереднім керівництвом викладача, а інша – у самостійній роботі з електронними ресурсами.

«Змішане навчання» є підходом, педагогічною й технологічною моделлю, методикою, що поруч із онлайн - технологіями спирається також і на безпосередню взаємодію між здобувачами фахової передвищої освіти та викладачами в аудиторії. «Змішане навчання» об'єднує очну й онлайн- освіту.

Еволюційний поступ суспільного розвитку–від цифрового до знаннєвого, передбачає, що основні здобутки цифрового суспільства будуть не тільки збережені, а й примножені–цифровізація суспільства суттєво поглиблюється, а її масштаби охоплюють всі сфери професійної, громадської і побутової діяльності людей, науку і освіту [2].

Метою впровадження «змішаного навчання» є:

- підвищення якості навчання за рахунок оновлення змісту навчання та застосування сучасних ІКТ- технологій;
- забезпечення вільного доступу здобувачів освіти різних форм навчання до освітніх ресурсів, сприяння подальшому самостійному навчанню протягом життя;
- забезпечення систематичного моніторингу якості освіти.

Безсумнівно, що у такої системи є значні переваги:

- *Інформативність.* З'являється можливість за допомогою комп'ютерних технологій розширити навчальний план і закласти в певний курс більше даних. Здобувачі освіти, яким особливо цікава якась тема, можуть вивчати матеріал поглиблено.
- *Мультисенсорність.* Завдяки використанню різних типів інформації вдається більш наочно та швидко пояснювати матеріал.
- *Інтерактивність.* За допомогою нових технологій вдається домогтися більшої залученості здобувачів освіти (наприклад, ігри і симулятори з фізики, інструменти для створення власних проєктів).
- *Усуваються прогалини в знаннях.* Часто при класичному навчанні виникає проблемна ситуація: здобувач освіти через відсутність на занятті або через замріяність не може зосередитися та пропускає важливу інформацію, тому не засвоює її належним чином. Спеціально структуровані онлайн-програми допомагають уникнути наслідків: здобувач освіти з легкістю може пройти тему самостійно або прочитати короткий конспект заняття.
- *Безперервність.* Змішане навчання передбачає постійний доступ до освітніх ресурсів. Здобувач фахової передвищої освіти може займатися ввечері, на вихідних або в будь-який зручний для нього час. Таким чином, він має свободу вибору.
- *Підходить для різних рівнів.* При роботі в аудиторії викладач зазвичай орієнтується на «середніх» студентів, через що страждають здобувачі освіти як із низьким рівнем успішності, так й обдаровані, оскільки перші не встигають за іншими, а другим, навпаки,

стає нудно. Цей розрив вдається нівелювати за рахунок комп'ютерних технологій і самонавчання.

- *Індивідуальність.* Використання електронних ресурсів дозволяє здобувачу освіти самостійно вибирати освітню траєкторію й слідувати своїм власним інтересам під час навчання, поглиблено вивчаючи теми, які йому подобаються.

Однак існують і певні недоліки, які супроводжують цей інноваційний метод навчання:

- *При низькій мотивації навчання неможливе.* Якщо здобувачі освіти просто не хочуть вчитися, то при аудиторній моделі освіти вони змушені відвідувати заняття, тому засвоюють хоча б частину матеріалу. Необхідно мотивувати студентів займатися самостійно.

- *Потрібно ретельно опрацьовувати електронні ресурси.* Онлайн платформи повинні постійно оновлюватися. Крім текстового матеріалу, важливо представляти матеріали в інших форматах: відео- й аудіозаписи, презентації, ігри, симулятори, інтерактивні вправи, фільми тощо.

Найбільш поширеною моделлю «змішаного навчання» є ротаційна модель, яка охоплює:

-роботу в невеликих групах(при виконанні лабораторних робіт з фізики, створенні тематичних презентацій, відео експеримента тощо);

-групові проєкти (здобувачі фахової передвищої освіти за бажанням обирають запропоновані викладачем теми проєктів, кінцевим етапом яких є продукт: відео, прилад, буклет тощо);

-індивідуальну роботу (індивідуальні проєкти, які зацікавили здобувачів фахової передвищої освіти, власні презентації);

-письмові завдання(при виконанні практичних та експериментальних задач з фізики);

-застосування симуляцій при закріпленні матеріалу(здобувачі освіти працюють на платформі Phet, складають, наприклад, електричні кола, досліджують способи з'єднання споживачів або джерел живлення, певні залежності в електричних колах тощо).

Модель «*Перевернутий клас*» із ротаційних моделей вважається найпростішою для реалізації. Вона поєднує навчання вдома (де здобувачі освіти в онлайн-форматі опрацьовують новий теоретичний матеріал: дивляться відеолекції, відео досліди, читають статті тощо) та в закладі освіти, де закріплюють вивчене та актуалізують отримані знання.

Отже, «змішане навчання» — перспективна технологія, яка при сумлінному підході допомагає досягти приголомшливих результатів і вирішити багато проблем очної освіти з фізики. За її допомогою можна досягти більшого залучення здобувачів освіти, закладати більше інформації, розвивати в здобувачів освіти самостійність і враховувати можливості й бажання різних типів людей.

Список використаних джерел

[1] С.П. Библик Словник іншомовних слів: тлумачення, словотворення та слововживання. Харків : Фоліо, 2020. – 623 с.

[2] В.Ю.Биков Сучасні завдання інформатизації освіти 2020. №1(15).–18с.

ЗБУДЖЕННЯ ВАЖКОГО ВОДНЕПОДІБНОГО ІОНУ ІНТЕНСИВНИМ РЕНТГЕНІВСЬКИМ ІМПУЛЬСОМ

*Новак О. П., к.ф.-м.н., с.н.с.; Холодов Р.І., д.ф.-м.н., чл.кор. НАН України
Інститут прикладної фізики НАН України, Суми, Україна*

Експерименти з важкими сильнозарядженими іонами дають можливість досліджувати широке коло фундаментальних проблем квантової електродинаміки в сильних полях. Внутрішній електрон важких елементів рухається в сильному кулонівському полі ядра, середнє значення якого наближається до критичного Швінгерівського значення $1.32 \cdot 10^{18}$ В/м [1]. Оптична спектроскопія нижніх енергетичних рівнів важких іонів, однак, утруднена великими значеннями відповідних частот переходів. Наприклад, для іону свинцю енергія переходу $1S_{1/2} \rightarrow 2P_{1/2}$ складає близько 75.5 кеВ. В більшості експериментів для збудження важких іонів застосовуються різноманітні процеси зіткнення. Наразі в CERN обговорюється амбіційний проєкт Gamma Factory [2], який може відкрити нові можливості дослідження важких іонів. Дана установка являтиме собою потужне джерело гама-випромінювання з можливістю налаштовувати частоту в діапазоні до ~400 кеВ, та потоком фотонів, який на багато порядків перевищує існуючі джерела синхротронного випромінювання.

В даній роботі проведено розрахунок імовірності збудження електрона з основного рівня на L -оболонку з урахуванням ефектів сильного електромагнітного поля. Імовірність була розрахована в рамках релятивістської теорії шляхом чисельного розв'язку нестационарного рівняння Дірака,

$$i \frac{\partial \Psi(\vec{r}, t)}{\partial t} = [\vec{\alpha}(\vec{p} - e\vec{A}) + \beta + V_C] \Psi(\vec{r}, t) \quad (1)$$

(в релятивістських одиницях) де $\vec{\alpha}$, β – матриці Дірака, V_C – потенціал рентгенівського імпульсу, V_C – потенціал ядра. Нестационарну хвильову функцію шукаємо у вигляді

$$\Psi(\vec{r}, t) = \sum_n a_n(t) \varphi_n(\vec{r}) \quad (2)$$

де n – сукупність квантових чисел, що характеризують функції φ_n .

В якості стаціонарних базисних функцій φ_n оберемо розв'язки рівняння Дірака для електрона в полі протяжного ядра в наближенні зарядженої сфери,

$$V_C(r) = -\alpha Z / \max(r, R_N) \quad (3)$$

де α – стала тонкої структури, Z – заряд ядра, а R_N – його радіус. Радіальні компоненти функцій φ_n були знайдені у формі розвинення за базисом В-сплайнів з використанням варіаційного методу, розробленого в роботах [3–5]. Електромагнітну хвилю враховано в дипольному наближенні як короткий імпульс тривалістю 3 оптичні періоди, з векторним потенціалом у формі

$$\vec{A}(t) = \frac{E}{\omega} \left(\sin \frac{\pi t}{3T} \right)^2 \sin \omega t, \quad (4)$$

де E – максимальна напруженість поля електромагнітної хвилі, ω – її частота.

Для амплітуд імовірності $a_n(t)$ одержимо систему диференціальних рівнянь :

$$i \dot{a} = M a, \quad (5)$$

$$M_{nk} = E_k \delta_{nk} - e A(t) \langle \varphi_n | \alpha_z | \varphi_k \rangle \quad (6)$$

Для обчислення амплітуд $a_n(t)$ розіб'ємо час на малі інтервали Δt . Вважаючи матрицю M постійною на інтервалі Δt , розв'язок системи (4) можна записати як

$$a(t + \Delta t) = e^{-iM\Delta t} a(t) \quad (7)$$

Щоб уникнути витратної операції прямого обчислення матричної експоненти, амплітуди $a_n(t)$ були розраховані за допомогою методу редукції Ланцоша [6].

Після розрахунку амплітуд $a_n(t)$ в момент закінчення рентгенівського імпульсу τ , можна знайти імовірність переходу як квадрат по модулю відповідної амплітуди,

$$w_n = |a_n(\tau)|^2 \quad (8)$$

В даній роботі розрахунки хвильових функцій φ_n були проведені з використанням 500 В-сплайнів в сферичній області простору розміром 300 рел. од. Для обчислення нестационарної хвильової функції було використано близько 3500 базисних функцій з енергіями в інтервалі $(-1.0, 2.5)$ та спин-орбітальними квантовими числами з $j \leq 15/2$.

На рис.1 зображено залежність імовірності переходів від напруженості поля імпульсу, для двох значень енергії гама квантів, що дорівнюють 101.5 та 406 кеВ. Як бачимо, в області низької інтенсивності домінують переходи $1S \rightarrow 2P$. Справді, в режимі теорії збурень та в дипольному наближенні виконуються правила відбору, які дозволяють лише переходи зі зміною азимутального квантового числа l на 1. Однак, при зростанні інтенсивності імпульсу імовірність заборонених переходів на рівні з $l = 0$ також зростає і домінує в режимі сильного поля.

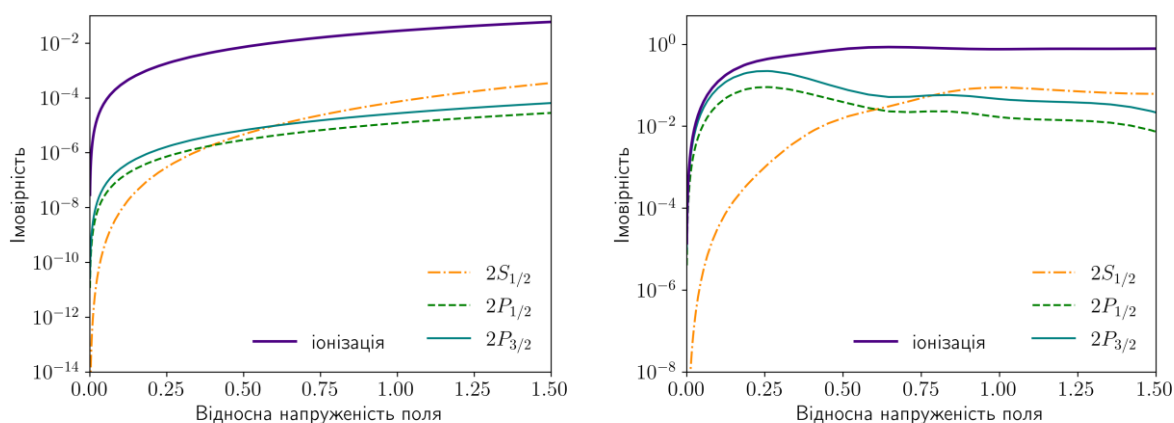


Рис. 1. Залежність імовірності переходів $1S_{1/2} \rightarrow 2S_{1/2}$ та $1S_{1/2} \rightarrow 2P_{1/2}, 2P_{3/2}$ від напруженості поля електромагнітної хвилі. а) частота 101.5 кеВ; б) частота 406 кеВ. Одиниця напруженості поля дорівнює ≈ 3.2 рел.од.

Список використаних джерел

- [1] W. Greiner, B. Müller, and J. Rafelski, *Quantum Electrodynamics of strong fields*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1985.
- [2] D. Budker et al. "Atomic Physics Studies at the Gamma Factory at CERN", *Ann. Phys.*, vol.532, 2000204, 2020.
- [3] W.R. Johnson, S.A. Blundell, J. Sapirstein, "Finite basis sets for Dirac equation constructed from B-splines", *Phys. Rev. A*, vol.37, no.2, p.307, 1988.
- [4] S.Selstø, E.Lindroth, and J.Bengtsson, "Solution of the Dirac equation for hydrogenlike systems exposed to intense electromagnetic pulses". *Phys. Rev. A*, vol.79, 043418, 2009.
- [5] S. R. McConnell, A. N. Artemyev, M. Mai, A. Surzhykov, "Solution of the two-center time-dependent Dirac equation in spherical coordinates: Application of the multipole expansion of the electron-nuclei interaction", *Phys. Rev. A*, vol.86, 052705, 2012.
- [6] T.J. Park and J.C. Light, "Unitary quantum time evolution by Iterative Lanczos reduction", *J. Chem. Phys.*, vol.85, p.5870, 1986.

Наукове видання

**СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ,
ТЕОРЕТИЧНОЇ ФІЗИКИ ТА
МЕТОДИКИ НАВЧАННЯ ФІЗИКИ**

МАТЕРІАЛИ

**IX Всеукраїнської науково-практичної конференції
з міжнародною участю (Суми, 10-12 квітня 2023 року)**

(електронне наукове видання)

ISSN 2521-6996

**Key title: Sučasni problemi eksperimental'noï, teoretičnoï fiziki ta metodiki
navčannâ fiziki**

Abbreviated key title: Sučas. probl. eksp. teor. fiz. metod. navčannâ fiz.

Відповідальний за випуск: **Ворошило О. І.**
Комп'ютерний набір і верстка: **Лебединський С. О.**