



ФИЗИКА

УДК 537.8

КОГЕРЕНТНОЕ РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ РЕЛЯТИВИСТСКОГО ЭЛЕКТРОНА В СТРУКТУРЕ «АМОРФНЫЙ СЛОЙ – ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СЛОИСТАЯ СРЕДА»

COHERENT X-RAY RADIATION BY RELATIVISTIC ELECTRON IN A STRUCTURE «AMORPHOUS LAYER – PERIODIC LAYERED MEDIUM»

**С.В. Блажевич, Н.А. Коренькова, А.В. Носков,
С.Н. Немцев, Т.Г. Романченко**

**S.V. Blazhevich, N.A. Korenkova A.V. Noskov,
S.N. Nemtsev, T.G. Romanchenko**

*² Белгородский национальный исследовательский университет, Россия, 308015, г.Белгород, ул. Победы, 85
Belgorod National Research University, 85 Pobedy St, Belgorod, 308015, Russia*

E-mail: noskov_a@bsu.edu.ru;

Аннотация. Развита динамическая теория когерентного рентгеновского излучения релятивистского электрона, пересекающего двухслойную структуру, состоящую из аморфного слоя и слоя из искусственной периодической структуры. Процесс излучения и распространения рентгеновских волн в искусственной периодической структуре рассмотрен на основе двухволнового приближения динамической теории дифракции в геометрии рассеяния Лауэ.

Resume. The dynamic theory of coherent X-ray radiation by relativistic electron crossing a two-layer structure consisting of an amorphous layer and a layer with artificial periodic structure has been developed. The process of radiation and propagation of X-ray waves in an artificial periodic structure has been considered based on two-wave approximation of dynamic diffraction theory in Laue scattering geometry.

Ключевые слова: релятивистский электрон, параметрическое рентгеновское излучение, дифрагированное переходное излучение, периодическая слоистая среда.

Key words: relativistic electron, parametric X-radiation, diffracted transition radiation, periodic layered medium.

Введение

При пересечении релятивистским электроном аморфной пластинки вблизи ее границ генерируется переходное излучение (ПИ), фотоны которого далее распространяются под малым углом к направлению вектора скорости электрона [1]. При пересечении релятивистским электроном кристаллической пластинки ПИ испытывает динамическую дифракцию, рассеиваясь на системе параллельных атомных плоскостей кристалла, в направлении рассеяния Брэгга порождая дифрагированное переходное излучение (ДПИ) [2-4]. По аналогии с ДПИ в кристалле, при пересечении релятивистским электроном периодической слоистой среды происходит такое же динамическое рассеяние переходного излучения на слоях мишени, при этом также в направлении рассеяния Брэгга генерируются фотоны ДПИ [5]. Необходимо отметить, что наряду с ДПИ в направлении рассеяния Брэгга генерируется параметрическое рентгеновское излучение (ПРИ) [6-7], которое является следствием



дифракции псевдо-фотонов кулоновского поля релятивистского электрона на системе параллельных атомных плоскостей кристалла или слоях периодической слоистой среды.

Традиционно излучение релятивистского электрона рассматривается при его пересечении кристаллической или аморфной пластинки либо периодической слоистой среды, при этом теоретическое описание когерентного рентгеновского излучения релятивистского электрона в составных мишенях ранее не рассматривалось. Проведенные экспериментальные исследования генерации когерентного рентгеновского излучения [8-13] в различных составных структурах показали возможность существенного увеличения интенсивности выхода ДПИ за счет увеличения числа границ в мишени.

В недавних работах [14-16] в рамках двухволнового приближения динамической теории дифракции развита теория когерентного рентгеновского излучения релятивистского электрона, пересекающего составные структуры «аморфный слой–кристаллический слой» и «аморфный слой–вакуум–кристаллический слой». Получены и исследованы выражения, описывающие ДПИ и ПРИ в этих структурах. Показана возможность существенного увеличения спектрально-угловой плотности ДПИ за счет увеличения границ, а так же за счет конструктивной интерференции волн ПИ на границах мишени.

В настоящей главе развита динамическая теория когерентного рентгеновского излучения релятивистского электрона, пересекающего составные структуры «аморфный слой–периодическая слоистая среда». Получены и исследованы выражения, описывающие ПРИ и ДПИ в рассматриваемых составных структурах.

Спектрально-угловая плотность ПРИ и ДПИ релятивистского электрона в двухслойной структуре

Рассматривается излучение релятивистского электрона пересекающего двухслойную структуру, состоящую из аморфного слоя толщины cz и диэлектрической восприимчивостью χ_a , и слоя состоящего из аморфных слоев толщиной l_1 и l_2 ($T = l_1 + l_2$ - период структуры), имеющих соответственно диэлектрические восприимчивости χ_1 и χ_2 (Рис.1). $\mu = \mathbf{k} - \omega \mathbf{V} / V^2$ – составляющая импульса виртуального фотона, перпендикулярная скорости частицы \mathbf{V} ($\mu = \omega \theta / V$, где $\theta \ll 1$ – угол между векторами \mathbf{k} и \mathbf{V}), θ_B – угол Брэгга, ϕ – азимутальный угол излучения, отсчитывается от плоскости, образованной векторами скорости \mathbf{V} и вектором \mathbf{g} , который перпендикулярен отражающим слоям. Длину вектора \mathbf{g} также можно выразить через угол Брэгга и частоту Брэгга ω_B : $g = 2\omega_B \sin \theta_B / V$. Вектор \mathbf{g} аналогичен вектору обратной решетки в кристалле, он перпендикулярен слоям и его длина равна $g = \frac{2\pi}{T} n$, $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ Угол между вектором $\frac{\omega \mathbf{V}}{V^2}$ и волновым вектором падающей волны \mathbf{k} обозначен θ , а угол между вектором $\frac{\omega \mathbf{V}}{V^2} + \mathbf{g}$ и волновым вектором дифрагированной волны \mathbf{k}_g обозначен θ' .



$$R_{\text{ДПИ}}^{(s)} = \frac{4\varepsilon^2}{\xi^{(s)}(\omega)^2 + \varepsilon} \sin^2 \left(\frac{B^{(s)} \sqrt{\xi^{(s)}(\omega)^2 + \varepsilon}}{\varepsilon} \right). \quad (2д)$$

$$\Omega_0^2 = \Omega^2 + \Gamma^2, \quad \Omega = \frac{\theta}{\sqrt{|\chi'_0|}}, \quad \Gamma = \frac{1}{\gamma \sqrt{|\chi'_0|}}, \quad \sigma^{(s)} = \frac{\pi n}{C^{(s)} |\chi'_2 - \chi'_1| \left| \sin \left(\frac{\pi n}{1+r} \right) \right|} (\theta^2 + \gamma^{-2} - \chi'_0),$$

$$B^{(s)} = \frac{1}{2 \sin(\delta - \theta_B)} \frac{b}{L_{\text{ext}}^{(s)}}, \quad \xi^{(s)}(\omega) = \frac{2\pi^2 n^2}{T^2 \omega_B} L_{\text{ext}}^{(s)} \left(1 - \frac{\omega}{\omega_B} \left(1 - \theta_{//} \sqrt{\frac{T^2 \omega_B^2}{\pi^2 n^2} - 1} \right) \right) + \frac{1 - \varepsilon}{2\nu^{(s)}},$$

$$L_{\text{ext}}^{(s)} = \frac{1}{C^{(s)} \omega} \frac{\pi n}{\left| \sin \left(\frac{\pi n}{1+r} \right) \right| |\chi'_2 - \chi'_1|} \varepsilon = \frac{\sin(\delta + \theta_B)}{\sin(\delta - \theta_B)}, \quad \nu^{(s)} = \frac{C^{(s)} \left| \sin \left(\frac{\pi n}{1+r} \right) \right|}{\pi n} \frac{|\chi'_2 - \chi'_1|}{|\chi'_1 + r\chi'_2|}, \quad \chi'_0 = \frac{l_1 \chi'_1 + l_2 \chi'_2}{T}, \quad r = \frac{l_2}{l_1}.$$

(3)

$L_{\text{ext}}^{(s)}$ - длина экстинкции рентгеновских волн в периодической слоистой среде, $\xi^{(s)}(\omega)$ - спектральная быстро меняющаяся с частотой функция, ε - параметр, определяющий степень асимметрии отражения поля электрона относительно поверхности мишени, r - параметр, определяющий соотношения толщин слоев в мишени.

Функции $T_1^{(s)}$ и $T_2^{(s)}$ описывают спектрально-угловые плотности ДПИ, соответствующие волнам переходных излучений, генерируемых на первой и второй границах соответственно, а функция $T_{\text{int}}^{(s)}$ описывает интерференцию этих волн. Выражения (1–2) при параметре $s=1$ описывают поля σ - поляризованные, а при $s=2$ π - поляризованные. $C^{(1)} = 1$, $C^{(2)} = \cos 2\theta_B$, $P^{(1)} = \sin \varphi$, $P^{(2)} = \cos \varphi$.

Численные расчеты спектрально-угловых характеристик ДПИ релятивистского электрона в двуслойной мишени

Выражения (1) и (2), полученные в настоящей работе, описывающие спектрально-угловые характеристики ПРИ, ДПИ релятивистского электрона, пересекающего тонкую непоглощающую двуслойную структуру и их интерференцию, являются главным результатом настоящей главы. Эти выражения можно использовать для анализа спектрально-угловых свойств и интерференционных эффектов в ПРИ и ДПИ в рассматриваемой двуслойной структуре. В частности, можно исследовать вклад в ДПИ рентгеновских волн переходного излучения от первой и второй границы в отдельности, а также интерференцию ПРИ и ДПИ.

Для примера продемонстрируем возможность генерации в рассматриваемой структуре волн мягкого рентгеновского диапазона. Пусть двуслойную структуру, состоящую из аморфного слоя вольфрама (W) толщиной $a = 1 \mu\text{m}$ и периодической слоистой структуры углерод-вольфрам (C-W) с периодом $T = 0.01 \mu\text{m}$, пересекает релятивистский электрон с энергией $E = 250 \text{ MeV}$. Угол между слоями периодической слоистой среды и поверхностью мишени выберем $\delta = 10^\circ$, а угол между скоростью электрона и отражающими слоями $\theta_B = 5^\circ$. Вычисления проведем для σ - поляризованных волн ($s=1$),

для случая $\varphi = \frac{\pi}{2}$, при этом номер гармоники $n=1$. На рис. 2 представлены кривые, построенные по формуле (2 а), описывающие спектральную плотность ДПИ при фиксированном угле наблюдения в максимуме угловой плотности ДПИ $\theta = 2 \text{ mrad}$. Кривые построены при различной толщине слоя b периодической слоистой среды, по сути дела показывают возможность генерации интенсивного пучка фотонов мягкого рентгеновского диапазона в рассматриваемой двуслойной мишени.

На рис. 3 представлены кривые, описывающие спектральную плотность ДПИ при фиксированной толщине $b = 1 \mu\text{m}$, и различных соотношениях слоев $\frac{l_2}{l_1}$. Рисунки демонстрируют изменения



спектральных свойств ДПИ при изменении соотношения $\frac{l_2}{l_1}$. Видно, что при увеличении соотношения $\frac{l_2}{l_1}$, то есть при увеличении толщины слоя тяжелого вольфрама и уменьшении слоя углерода, излучение становится более монохроматичным. На рис. 4 представлены кривые, демонстрирующие зависимость угловой плотности ДПИ в области мягкого рентгеновского диапазона от соотношения слоев периодической слоистой структуры. Кривые построены по проинтегрированному по переменной $\frac{d\omega}{\omega}$ выражению (2 а), они демонстрируют высокую угловую плотность фотонов ДПИ мягкого рентгеновского диапазона, излученных в рассматриваемой структуре.

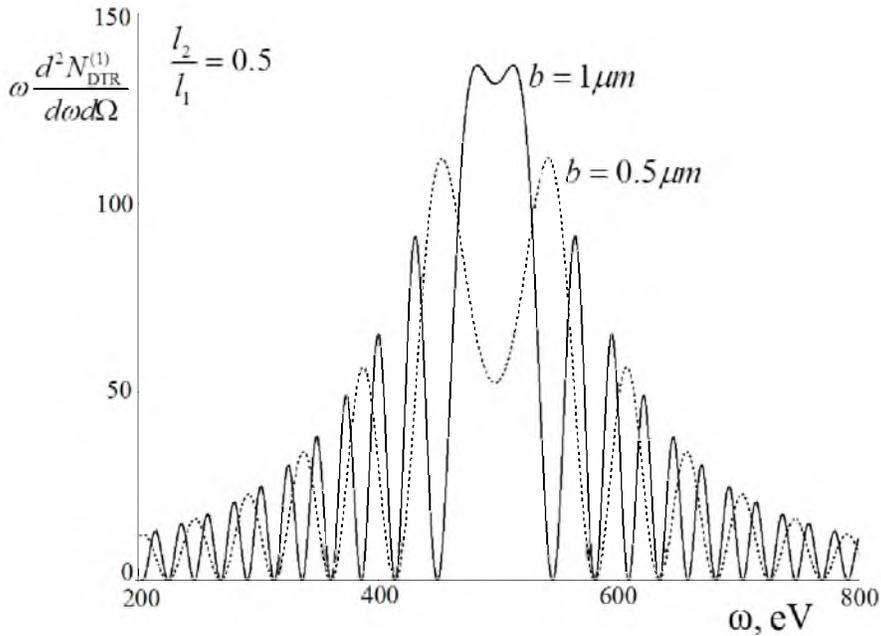


Рис. 2. Спектральная плотность ДПИ для разных толщин периодической слоистой среды; $\theta = 2 \text{ mrad}$

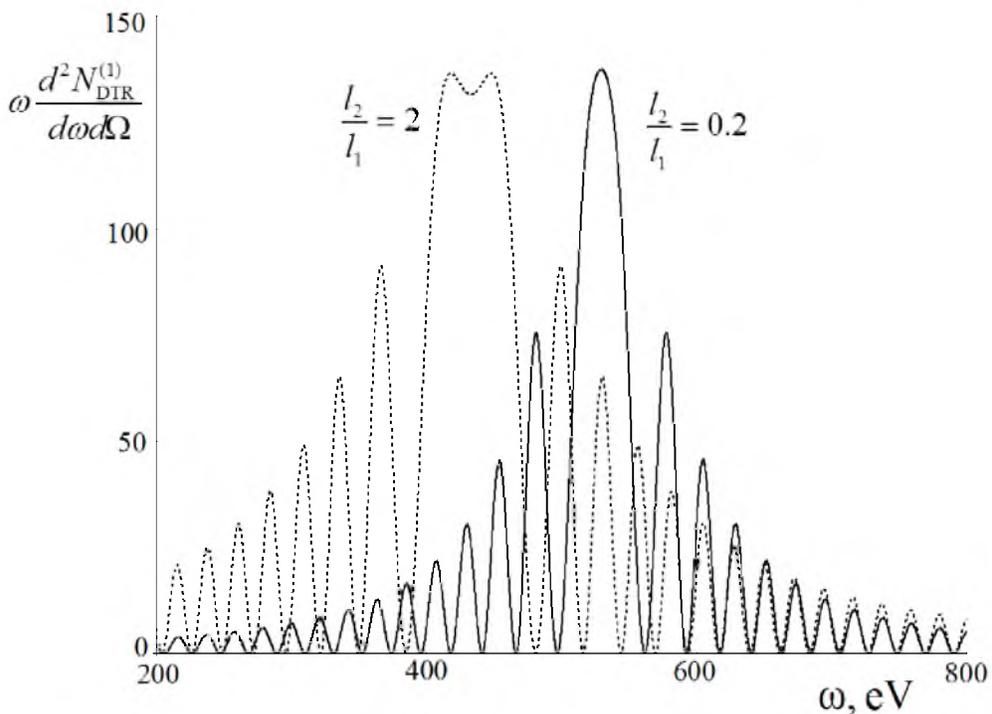


Рис. 3. Спектральная плотность ДПИ для разных соотношений толщин слоев периодической слоистой среды; $\theta = 2 \text{ mrad}$, $b = 1 \mu m$

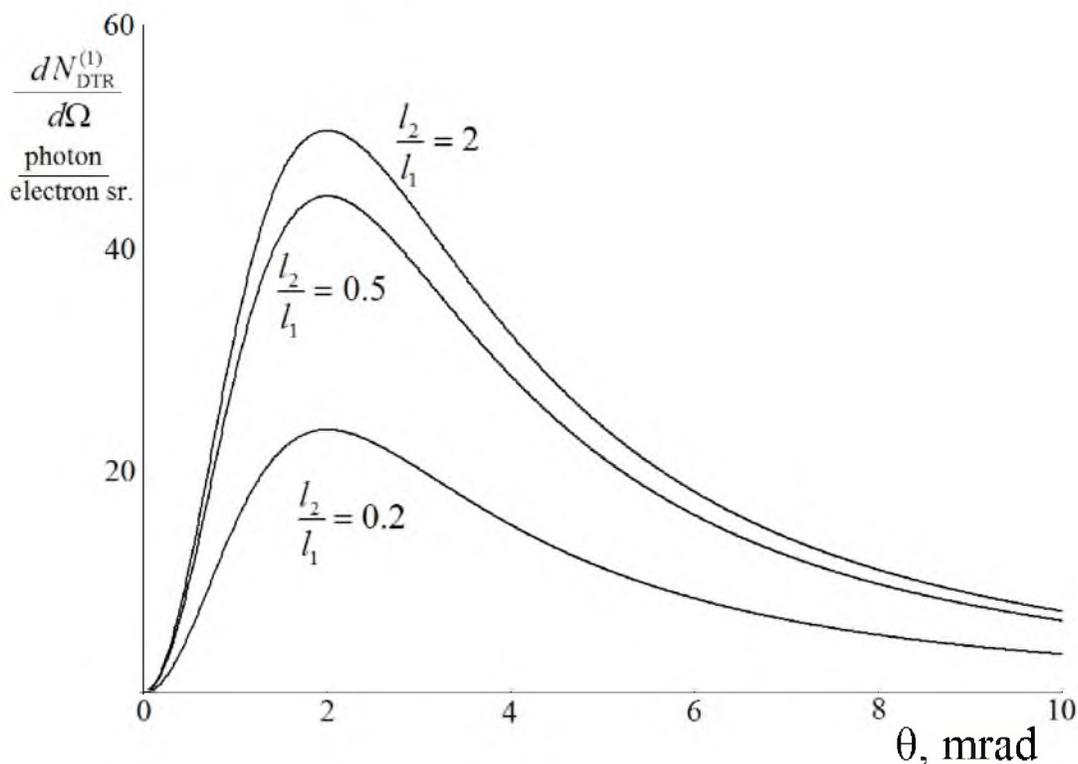


Рис. 4. Угловая плотность ДПИ для разных соотношений толщин периодической слоистой среды; $b = 1 \mu\text{m}$

Заключение

В настоящей работе развита динамическая теория когерентного рентгеновского излучения релятивистского электрона, пересекающего составную двуслойную структуру и состоящего из аморфного слоя и слоя периодической слоистой среды. Получены выражения, описывающие спектрально-угловые плотности ПРИ, ДПИ и их интерференции в такой структуре. Показана возможность генерации в рассматриваемой мишени интенсивного пучка фотонов ДПИ мягкого рентгеновского диапазона. Показано, что при изменении соотношений толщин слоев периодической слоистой структуры, меняются спектральные свойства ДПИ. Продемонстрирована высокая угловая плотность фотонов ДПИ мягкого рентгеновского диапазона, излученных в рассматриваемой структуре.

Работа поддержана Министерством образования и науки Российской Федерации (проектная часть государственного задания № 3.500.2014/К в сфере научной деятельности и государственное задание №2014/420).

Список литературы

1. Ginzburg V.L. Transition Radiation and Transition Scattering / V.L. Ginzburg, V.N. Tsytovich. – М.: Nauka, 1984.
2. Caticha A. Transition-diffracted radiation and the Čerenkov emission of x-rays/ A. Caticha // Phys. Rev. A.- 1983. – V. 40. – P. 4322.
3. Baryshevsky V. G. Parametric X-ray radiation at a small angle near the velocity direction of the relativistic particle/ V. G. Baryshevsky// Nucl. Instr. and Meth. A. – 1997. – V. 122. – P. 13.
4. Artru X. Parametric X-rays and diffracted transition radiation in perfect and mosaic crystals/ X. Artru, P. Rullhusen // Nucl. Instr. and Meth. B. – 1998. – V. 145. – P. 1.



5. Blazhevicha S.V. Coherent X-ray Radiation Generated by a Relativistic Electron in an Artificial Periodic Structure/ S.V. Blazhevich, I.V. Kolosova, A.V. Noskov // J. Exp. Theor. Phys. – 2012 . – V . 114. – № 4. – P. 547–554.

6. Garibian G.M. Quantum microscopic theory of radiation by a charged particle moving uniformly in a crystal/ G.M. Garibian, C. Yang// Sov. Phys. JETP. – 1971. – V. 34 (3). – P. 495.

7. Барышевский В.Г. О переходном излучении гамма-квантов / В.Г. Барышевский, И.Д. Феранчук // ЖЭТФ, 1971. – Т. 61. – С. 944.

Baryshevskii V. G. Transition radiation of γ - rays in a crystal/ V. G. Baryshevskii and I. D. Feranchuk // Sov. Phys. JETP. – 1971. – V. 34. – P. 502.

8. Andreyashkin M. Yu. X-ray source based on parametric and transition radiation of electrons/ M. Yu. Andreyashkin, V. N. Zabaev, K. Ioshida, V. V.Kaplin, E. I. Rozum, S. R. Uglov, I.Endo // JETP Letters. – 1995. – V. 62. – № 10. – P. 791–796.

9. Aramitsu K. Observation of monochromatic and tunable hard X radiation from stratified Si single crystals// K. Aramitsu, I. Endo, A. Fukumi et al. //Nucl. Instr. and Meth. B. – 1998. – V. 145. – P.25.

10. Andreyashkin M. Yu. Observation of coherent X-ray production by 800-MeV electrons in a periodic triple-crystal target/ M. Yu. Andreyashkin, V. N. Zabaev et al. // JETP Letters. – 1997. – V. 65. – № 10. – P. 625.

11. Nakayama K. Development of a periodically structured monocrystalline target of Si for X-ray emission/ K. Nakayama, M. Sekimura, I.Yanase, I.Endo, Y. Takashima, V.Kaplin, A.Potylitsin //Nucl. Instr. and Meth. B. – 1998. – V. 145. – P. 236.

12. Takashima Y. Observation of monochromatic and tunable hard X radiation from stratified Si single crystals/ Y. Takashima, K. Aramitsu, I. Endo, A. Fukumi et al. //Nucl. Instr. and Meth. B.– 1998. – V. 145. – P. 25.

13. Kaplin V.V. X-ray production by 500 MeV electron beam in a periodically structured monocrystalline target of GaAs/ V.V. Kaplin, S.I. Kuznetsov, N.A. Timchenko, S.R. Uglov, V.N. Zabaev // Nucl. Instr. and Meth. B.– 2001.–V. 173.–P. 238.

14. Blazhevich S.V. Interference effects in radiation by the relativistic electron in the structure of “amorphous matter layers–single crystal”/ S.V. Blazhevich, R.A. Zagorodnyuk, A.V. Noskov // Nucl. Instr. and Meth. B. – 2015. – V. 355. – P. 114–120

15. Blazhevich S. V. Diffracted Transition Radiation of a Relativistic Electron in a Three-Layer Structure/ S.V. Blazhevich, R.A. Zagorodnyuk, A.V. Noskov // J. Exp. Theor. Phys. – 2014. – V. 119. – № 4. – P. 641–650.

16. Blazhevich S.V. Coherent X-ray Radiation from a Relativistic Electron in a Combined Medium/ S.V.Blazhevich, A.V. Noskov // J. Exp. Theor. Phys.– 2014. – V. 118. – № 4. – P. 550–559.