Письма в ЖЭТФ, том 100, вып. 8, с. 561 – 565 © 2014 г. 25 октября

Наблюдение квазимонохроматического излучения в области вакуумного ультрафиолета, генерируемого 5.7 МэВ электронами в многослойном зеркале

С. Р. Углов[1], *В. В. Каплин, Л. Г. Сухих, А. В. Вуколов*

Национальный исследовательский томский политехнический университет, 634050 Томск, Россия

Поступила в редакцию 22 августа 2014 г.
После переработки 11 сентября 2014 г.

Исследованы угловые распределения излучения в области вакуумного ультрафиолета (ВУФ) с энергией фотонов около 70 эВ, измеренные для ряда значений углов падения электронов с энергией 5.7 МэВ на поверхность периодической Mo/Si наноструктуры многослойного зеркала. Экспериментально показано, что ВУФ-излучение в направлении обратного переходного излучения имеет квазимонохроматическую составляющую, связанную с когерентным излучением периодической структуры мишени.

DOI: 10.7868/S0370274X14200053

При взаимодействии релятивистских электронов с периодической структурой (ПС) многослойного зеркала происходят процессы, генерирующие квазимонохроматическое излучение в направлениях, определяемых законом дифракции Брэгга. В ряде теоретических работ [1–4] было показано, что основной вклад в излучение дают два механизма: дифракция фотонов переходного излучения, образовавшегося на входной поверхности мишени (ДПИ), и когерентное поляризационное излучение из ПС, механизм которого аналогичен известному механизму параметрического рентгеновского излучения (ПРИ) в кристаллах.

Ранее ПРИ и ДПИ, генерируемые в многослойных рентгеновских зеркалах электронами с энергией 500 МэВ [2–4] и 15–33 МэВ [5], исследовались в рентгеновском диапазоне энергий фотонов (5–15 кэВ). В работах [2, 3] было показано, что основной вклад в генерируемое излучение дает ДПИ.

В последнее время было проведено несколько экспериментов [6–8] с целью обнаружения в диапазоне вакуумного ультрафиолета (энергия фотонов от 50 до 1000 эВ) излучения от периодической структуры (ИПС) мишени, аналогичного ПРИ и ДПИ рентгеновского диапазона. Обнадеживающий результат был получен в работе [8]. В ней проводилось сравнение интенсивностей излучения, генерируемого однослойной мишенью (ОМ), состоящей из полированного слоя молибдена на кремниевой подложке, и периодической многослойной структурой, состоящей из 50 слоев Mo/Si. Излучение регистрировалось под углом $\theta_D = 135^\circ$ относительно направления падающего пучка в плоскости **VN** (где **V** – вектор скорости электронов, **N** – нормаль к поверхности мишени), при наклонном падении под углом $\theta_0 = 45^\circ$ на поверхности мишеней электронов с энергией 5.7 МэВ.

Наблюдаемое в эксперименте превышение выхода излучения из ПС над выходом излучения из ОМ было объяснено вкладом в спектр излучения дополнительной составляющей с энергией фотонов около 60 эВ, которая генерируется периодической структурой мишени.

Вместе с тем для наиболее убедительного установлений факта наблюдения эффекта ИПС необходимо исследовать спектральный состав дополнительной компоненты излучения.

В настоящей работе приводится экспериментальное доказательство эффекта ИПС, которое основано на наблюдении одного из фундаментальных свойств ИПС – зависимости энергии генерируемых фотонов E_γ от кинематических параметров процесса взаимодействия, таких, как угол взаимодействия электронов с поверхностью мишени θ_0 и угол выхода излучения из мишени θ_D:

$$E_\gamma = \hbar\omega = \frac{2\pi\hbar c}{d}\frac{\sin\theta_0}{\beta^{-1} - \sqrt{\varepsilon(\omega)}\cos\theta_D}, \qquad (1)$$

где $\beta = V/c$ – относительная скорость электронов, d – период структуры, $\varepsilon(\omega) = 1 - \{a[1 - \varepsilon(\omega)_A] + b[1 - \varepsilon(\omega)_B]\}/d$ – диэлектрическая проницаемость, усредненная по периоду структуры, $\varepsilon(\omega)_A$ и $\varepsilon(\omega)_B$ – диэлектрические проницаемости веществ A и B пе-

[1]e-mail: uglov@tpu.ru

риодической структуры, θ_0 – угол Брэгга, θ_D – угол наблюдения, отсчитываемый от направления электронного пучка.

Экспериментально квазимонохроматический характер спектра ИПС, описываемый формулой (1), можно установить, исследуя динамику изменения максимальной интенсивности и формы угловых распределений, измеренных для нескольких характерных ориентаций мишени θ_0, пропустив излучение через фильтр, край поглощения которого близок к ожидаемой энергии исследуемого излучения. В эксперименте мы использовали ПС с периодом $d = 113.2$ Å и алюминиевый фильтр толщиной 1 мкм. Период структуры d и энергия L-края поглощения излучения в алюминиевом фильтре $E_L = 72.6$ эВ определяли области изменения основных кинематических параметров взаимодействия электронов со структурой, θ_0 и θ_D, актуальные для исследования спектральных свойств излучения. Нами были исследованы угловые распределения излучения в диапазоне $50° < \theta_D < 160°$ для нескольких значений угла между вектором $\mathbf{V}$ и поверхностью мишени в диапазоне $40° < \theta_0 < 60°$.

Для регистрации излучения использовался вторичный электронный умножитель ВЭУ-6, который не позволяет измерить спектр излучения [9]. Поэтому основной трудностью в идентификации механизма ИПС, основанной на анализе угловых распределений излучения, являлось выделение квазимонохроматического вклада ИПС на фоне "белого" спектра обратного переходного излучения (ОПИ), образующегося на входной поверхности мишени и испускаемого в том же направлении, что и ИПС.

Для обоснования метода идентификации квазимонохроматического вклада от ПС на фоне ОПИ и выбора оптимальной геометрии взаимодействия электронного пучка с мишенью рассмотрим динамику изменения интенсивности углового распределения фотонов ОПИ, генерируемых на интервале $E_\gamma = (30-150)$ эВ при значениях угла $\theta_0 = 42.5°$, $47.5°$, $52.5°$ и $57.5°$. На рис. 1 представлены рассчитанные по теории [10] угловые распределения ОПИ, испущенного в плоскости $\mathbf{VN}$ (рис. 1a) и под углом $\theta_{Dv} = 1/\gamma$ (где $\gamma = 11.15$ – лоренц-фактор 5.7 МэВ электронов) к этой плоскости (рис. 1b). Расчеты проводились для поверхности, состоящей из оксида кремния SiO_2 (верхнего слоя Mo/Si ПС). Видно, что для излучения в плоскости $\mathbf{VN}$ наблюдается сложная эволюция формы углового распределения с изменением θ_0. В то же время угловые распределения излучения, испускаемого под углом $1/\gamma$ к плоскости $\mathbf{VN}$, имеют более простую форму и явную

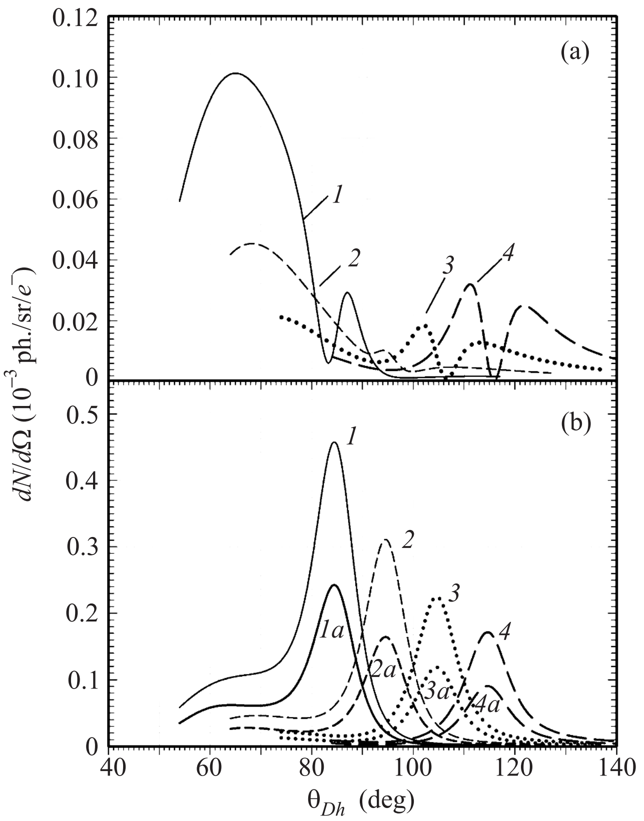

Рис. 1. Угловые распределения ВУФ ОПИ, рассчитанные для SiO_2 и 5.7 МэВ электронов для излучения, испускаемого в плоскости $\mathbf{VN}$ (a) и под углом $\theta_{Dv} = 1/\gamma$ к ней (b). Кривые *1–4* рассчитаны для $\theta_0 = 42.5°$, $47.5°$, $52.5°$ и $57.5°$ соответственно. Кривые *1a–4a* – угловые распределения ОПИ с учетом поглощения в Al фильтре, умноженные на *5*

тенденцию к увеличению интенсивности излучения с увеличением θ_0. Различие в динамике изменения угловых распределений, представленных на рис. 1a и b, связано с поляризационными свойствами излучения. Для того чтобы упростить интерпретацию экспериментальных результатов, нами предлагается исследовать угловые распределения излучения, генерируемого под углом $1/\gamma$ к плоскости $\mathbf{VN}$. На рис. 1b кривыми *1a*, *2a*, *3a* и *4a* представлены умноженные на 5 угловые распределения ОПИ после прохождения через микронный Al фильтр. Видно, что после прохождения фильтра общая тенденция изменения угловых распределений ОПИ, т.е. увеличение интенсивности с увеличением θ_0, по-прежнему сохраняется.

Возвращаясь к многослойной мишени, рассмотрим угловые распределения ДПИ, рассчитанные на основе работы [3]. Отметим, что тенденция изменения угловых свойств ПРИ в зависимости от θ_0 в общем совпадает со свойствами ДПИ. На рис. 2a приведены угловые распределения ДПИ, испускае-

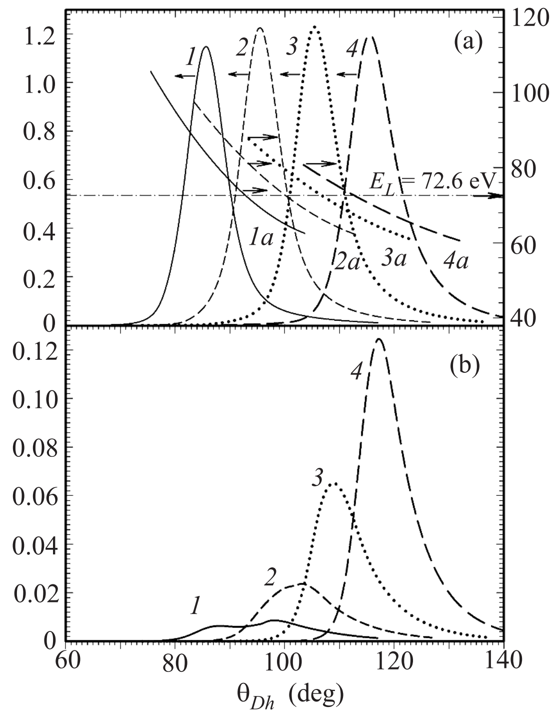

Рис. 2. (a) – Рассчитанные для ПС и 5.7 МэВ электронов угловые распределения ДПИ, излучаемого под углом $\theta_{Dv} = 1/\gamma$ к плоскости **VN**. Кривые *1a*–*4a* – зависимости энергии фотонов в максимуме спектра ДТИ от θ_D. Кривые *1*–*4* и *1a*–*4a* рассчитаны для $\theta_0 = 42.5°$, $47.5°$, $52.5°$ и $57.5°$ соответственно. Штрихпунктирная линия – энергия *L*-края поглощения излучения в алюминии: (b) – То же, что и на рис. 2a, но с учетом поглощения излучения в Al фильтре толщиной 1 мкм

мого под углом $\theta_{Dv} = 1/\gamma$ к плоскости **VN**, рассчитанные для многослойного рентгеновского зеркала, состоящего из 50 пар слоев Mo/Si с периодом $d = 113.2$ Å. Каждая пара слоев состоит из слоя Si толщиной $a = 79.2$ Å и слоя Mo толщиной $b = 34$ Å. Модельные расчеты ДПИ, как и ОПИ, были выполнены с использованием базы данных оптических констант Henke [11]. Кривые *1*–*4* рассчитаны для $\theta_0 = 42.5°$, $47.5°$, $52.5°$ и 57.5^o соответственно. Согласно формуле (1) положение пика в спектре излучения внутри конуса ДПИ зависит от θ_D и θ_0. На рис. 2a кривыми *1a*–*4a* представлены зависимости энергии фотонов ДПИ в максимуме спектра от угла θ_D вблизи $\theta_D = 2\theta_0$. Штрихпунктирной линией отмечена энергия $E_L = 72.6$ эВ *L*-края поглощения излучения в Al. После прохождения ДПИ через Al фильтр выход излучения для фотонов с энергией $E_\gamma > E_L$ будет подавлен. Поэтому следует ожидать, что в отличие от ОПИ с уменьшением θ_0 будет иметь место общее уменьшение выхода ДПИ. Рассчитанные для углов $\theta_0 = 42.5°, 47.5°, 52.5°$ и $57.5°$ угловые распределения ДПИ после прохождения через Al фильтр толщиной 1 мкм представлены на рис. 2b кривыми *1*–*4* соответственно. В расчетах учтено поглощение излучения на поверхности Al фольги в окисной пленке Al_2O_3 толщиной 150 Å [12]. Сравнение тенденций изменения интенсивностей угловых распределений ОПИ и ДПИ в зависимости от θ_0 (рис. 1b и 2b) показывает их контрнаправленность, что может быть использовано в эксперименте для идентификации типа наблюдаемого излучения.

Эксперимент проводился на выведенном пучке 5.7 МэВ электронов микротрона М-5 Томского политехнического университета. Схема эксперимента представлена на рис. 3. Частота работы ускорите-

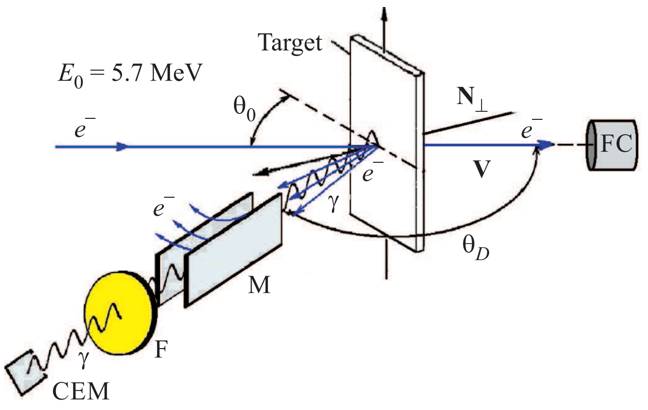

Рис. 3. Схема измерения угловых распределений ВУФ-излучения $dN/d\Omega(\theta_D)$: CEM – детектор излучения, FC – цилиндр Фарадея, F – Al фильтр, M – пара постоянных магнитов для очистки пучка ВУФ-излучения от рассеянных электронов

ля 25 Гц. Длительность выведенного пучка электронов 0.4 мкс. Ток ускоренных электронов измерялся цилиндром Фарадея (FC), расположенным за мишенью. Выход излучения в ВУФ-диапазоне измерялся вторичным электронным умножителем ВЭУ-6 (CEM). Детектор располагался под углом $\theta_{Dv} = 1/\gamma$ к горизонтальной плоскости на расстоянии 140 мм от мишени на поворотной платформе, позволяющей сканировать угловое распределение излучения из мишени в пределах $50° < \theta_D < 160°$ относительно направления пучка электронов. На поворотной платформе вдоль направления регистрации ВУФ между мишенью и детектором были установлены постоянные магниты (M) и диафрагмы для очистки фотонного тракта от электронов, рассеянных мишенью на большие углы. Умножитель ВЭУ-6 работал в счетном режиме. Спектральный диапазон регистрируемого излучения определялся спектральной чувствительностью ВЭУ-6 [9] и поглощающим фильтром (F). В эксперименте размер входного окна ВЭУ был ограничен диафрагмами диаметром $\varnothing = 8$ мм в измерениях с фильтром и диаметром $\varnothing = 2.5$ мм в измерениях без фильтра. В качестве периодической мишени использовалось ПС, состоящее из 50 пар слоев Mo/Si, находящихся на кремниевой пластине с размерами $20 \times 20 \times 0.32$ мм^3. Толщины слоев Si и Mo составляли 79.2 и 34 Å соответственно. В дополнительных измерениях в качестве мишени использовалась полированная пластина кремния толщиной 0.2 мм.

На рис. 4 приведены угловые распределения ВУФ, полученные для мишени с многослойным

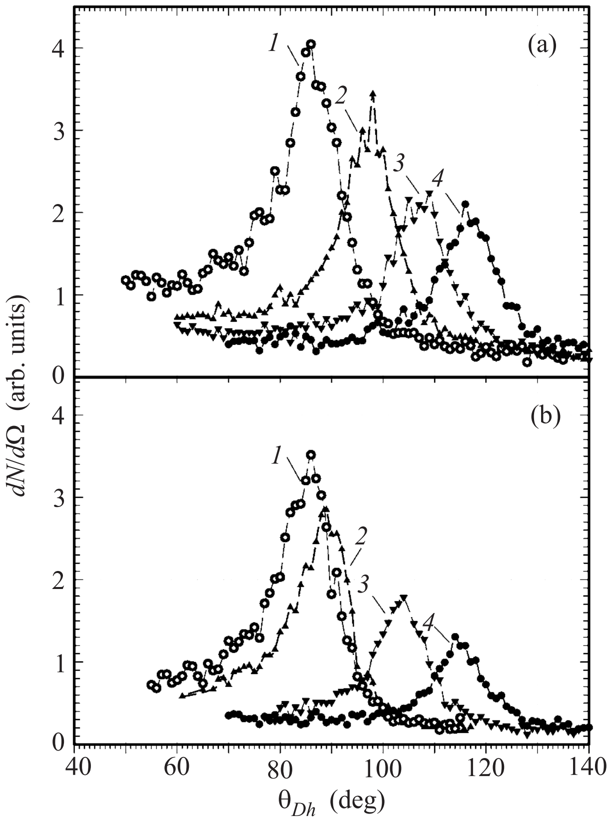

Рис. 4. Угловые распределения ВУФ-излучения, измеренные под углом $\theta_{Dv} = 1/\gamma$ ниже плоскости **VN** для Mo/Si ПС (a) (кривые *1–4* получены при $\theta_0 = 42.5°$, $47.5°$, $52.5°$ и $57.5°$ соответственно) и для однородной Si пластины (b) (кривые *1–4* получены при $\theta_0 = 42.5°$, $45.0°$, $52.5°$ и $57.5°$ соответственно)

покрытием Mo/Si при $\theta_0 = 42.5°$, $47.5°$, $52.5°$ и $57.5°$ (рис. 4a), а также для полированной Si пластины толщиной 200 мкм при $\theta_0 = 42.5°$, $45.0°$, $52.5°$ и $57.5°$ (рис. 4b). Обе серии угловых распределений были измерены открытым ВЭУ-6 с использованием диафрагмы диаметром $\varnothing = 2.5$ мм. Как следует из рис. 4, общая тенденция изменения интенсивности генерируемого ВУФ с увеличением угла θ_0 согласуется с расчетами для ОПИ (см. рис. 1b). Хорошее согласие расчетов и эксперимента для мишеней Mo/Si и Si свидетельствует об адекватности модельных расчетов ОПИ в области ВУФ.

На рис. 5a представлены измеренные угловые распределения ВУФ, испущенного из структуры Mo/Si

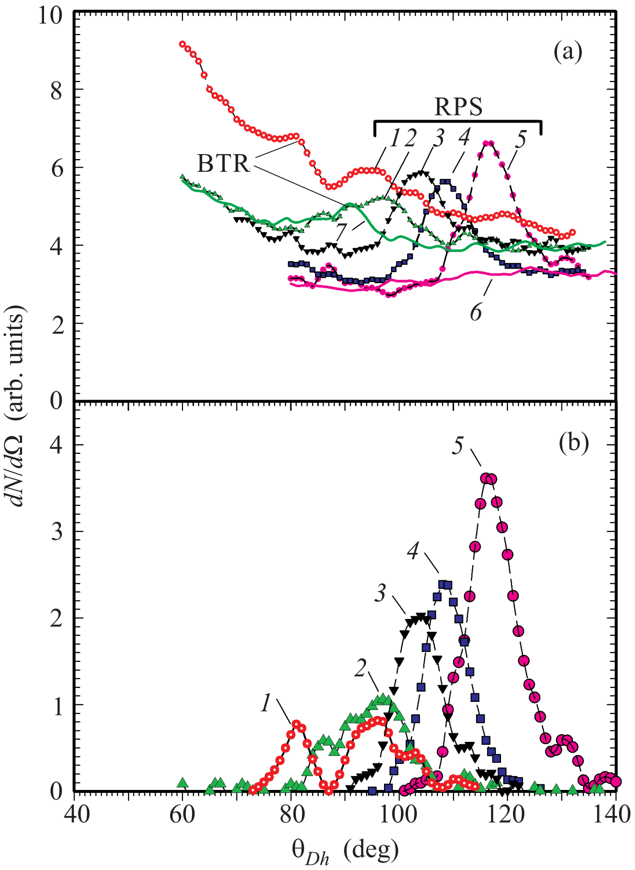

Рис. 5. (a) – Угловые распределения ВУФ излучения, измеренные с использованием Al фильтра под углом $\theta_{Dv} = 1/\gamma$ к плоскости **VN** для Mo/Si ПС (кривые *1–5*) и для мишени из однородной Si пластины (кривые *6* и *7*). Кривые *1–5* измерены при $\theta_0 = 40°$, $45°$, $50°$, $52.5°$ и $57.5°$ соответственно, а *6* и *7* – при $\theta_0 = 45°$ и $57.5°$. (b) – Те же угловые распределения, что и на рис. 5a, после вычитания фона подложки

под углом $\theta_{Dv} = 1/\gamma$ к плоскости **VN** и прошедшего Al фильтр. Кривые *1–5* получены при $\theta_0 = 40°$, $45°$, $50°$, $52.5°$ и $57.5°$ соответственно. Кривые *6* и *7* приведены для сравнения с целью показать, что регистрируемое от Si пластины излучение сильно поглощается при прохождении Al фильтра, в отличие от излучения, генерируемого ПС. Как видно из рис. 5b, на котором представлены угловые распределения для Mo/Si ПС, после вычитания фона подложки наблюдается общий рост интенсивности излучения с увеличением угла θ_0. Положения максимумов угловых распределений смещены от $\theta_D = 2\theta_0$ в сторону больших значений θ_D. Величина смещения $\Delta\theta_D$ стремится к $\Delta\theta_D = 0°$ при увеличении угла θ_0. Общая тенденция изменения угловых распределений совпадает с тенденцией, имеющей место в модельных расчетах для ДПИ (см. рис. 2b). Это доказывает квазимонохроматический характер спектра наблюдаемого излучения и позволяет сделать вывод о наблюдении эффекта ИПС.

Детальный анализ кривых, представленных на рис. 5, показывает, что угловые распределения, кроме пиков ИПС, содержат пики, соответствующие ОПИ. Например, для $\theta_0 = 40°$ на кривой *1* первый пик отвечает ослабленному Al фильтром ОПИ с максимумом при $\theta_D = 80°$. Второй пик на этой кривой, смещенный относительно зеркального направления $\theta_D = 2\theta_0 = 80°$, является частью ИПС с энергией фотонов, меньшей $E_L = 72.6$ эВ. Сравнение кривых *2* и *7*, представленных на рис. 5a, также свидетельствует об одновременном наблюдении вкладов ОПИ и ИПС на кривой *2*. Сравнение кривых *6* и *7* показывает, что вклад ОПИ резко уменьшается с ростом θ_0, как это и ожидалось (см. рис. 1b). Таким образом, излучение при $\theta_0 = 57.5°$ (кривая *5*) в основном состоит из ИПС (ДПИ + ПРИ), образовавшихся благодаря периодической структуре мишени. Оценка парциальных вкладов ДПИ и ПРИ в суммарный выход ИПС в настоящей работе не проводилась.

Вывод о наблюдении эффекта ИПС позволяет с помощью формулы (1) оценить среднее значение энергии квантов в каждой точке углового распределения и, следовательно, угловую плотность излучения, рассчитав коэффициент поглощения излучения Al фильтром и определив эффективность регистрации ВЭУ-6, используя материалы работы [9]. Оценка угловой плотности излучения в максимуме углового распределения для $\theta_0 = 57.5°$ дает величину $1.36 \cdot 10^{-3}$ фотон/стер/электрон. Полученное значение угловой плотности излучения отличается от рассчитанного (рис. 2a, кривая *4*) на $\sim 15\,\%$.

Заключение. В результате проведения экспериментальных исследований ВУФ-излучения, генерируемого пучком релятивистских электронов в многослойной периодической структуре вблизи направления брэгговского отражения, было впервые показано, что спектр излучения содержит дополнительную квазимонохроматическую составляющую. Энергия фотонов дополнительной составляющей сосредоточена вблизи значения, определяемого законом дифракции Брэгга. Расчеты, выполненные по динамической модели излучения, представленную в работе [3], хорошо согласуются с результатами эксперимента.

Спектральным составом генерируемого излучения можно управлять, изменяя угол наклона мишени θ_0 и/или угол наблюдения излучения θ_D. Поэтому полученные результаты являются экспериментальным подтверждением возможности создания на базе пучка быстрых электронов и многослойного рентгеновского зеркала источника ВУФ-излучения с регулируемой энергией фотонов. Кроме того, наблюдаемый эффект генерации квазимонохроматического ВУФ-излучения может быть использован для развития на его основе новых методов диагностики и измерения субмикронных поперечных размеров пучков современных ускорителей электронов [13].

Работа выполнена при частичной поддержке ГЗ НИР МОН # 2456 и гранта РФФИ # 14-02-01032.

---

1. J.-M. Andre, B. Pardo, and C. Bonnelle1, Phys. Rev. E **99**, 968 (1999).
2. V. V. Kaplin, S. R. Uglov, V. N. Zabaev, M. A. Piestrup, C. K. Gary, N. N. Nasonov, and M. K. Fuller, Appl. Phys. Lett. **76**, 3647 (2000).
3. N. N. Nasonov, V. V. Kaplin, S. R. Uglov, M. A. Piestrup, and C. K. Gary, Phys. Rev. E **68**, 036504 (2003).
4. N. N. Nasonov, V. V. Kaplin, S. R. Uglov, V. N. Zabaev, M. A. Piestrup, and C. K. Gary, Nucl. Instrum. Meth. B **227**, 41 (2005).
5. V. V. Kaplin, S. R. Uglov, V. V. Sohoreva, O. F. Bulaev, A. A. Voronin, M. Piestrup, C. Gary, and M. Fuller, Nucl. Instrum. Meth. B **276**, 777 (2009).
6. S. R. Uglov, V. N. Zabaev, V. V. Kaplin, and S. I. Kuznetsov, J. Phys.: Conf. Ser. **357**, 012012 (2012).
7. S. R. Uglov, V. N. Zabaev, and V. V. Kaplin, Nucl. Instrum. Meth. B **309**, 79 (2013).
8. S. R. Uglov, V. V. Kaplin, A. P. Potylitsyn, L. G. Sukhikh, A. V. Vukolov, and G. Kube, J. Phys.: Conf. Ser. **517**, 012009 (2014).
9. M. R. Einbund and B. V. Polenov, *Secondary Electron Multiplyers and their Application*, Energoatomizdat, M. (1981), p. 140.
10. V. E. Pafomov, *Proceedings P.N. Lebedev Physics Institute*, Consultants Bureau, N.Y. (1971) v. 44, p. 25.
11. http://www.esrf.fr/computing/expg/subgroups/theory/DABAX/dabax.html.
12. R. P. Forbes, F. L. Joakim, F. P. Stephen, and W. V. Peter, Opt. Eng. **29**(6), 614 (1990).
13. L. G. Sukhikh, D. Krambrich, G. Kube, W. Lauth, Yu. A. Popov, and A. P. Potylitsyn, in *Proc. DIPAC '11, WEOA02*, Hamburg, Germany (2011), p. 544.