

ния. Этот факт вытекает из того, что в случае упругого рассеяния (см. [4, 5]) законы сохранения энергии и импульса при рассеянии на непрерывном потенциале плоскости допускают только рассеяние на нулевой угол и зеркальное отражение частиц от плоскости, в то время как в случае излучения фотона вследствие перераспределения энергии и импульса между конечными частицами законы сохранения допускают любой угол рассеяния электрона (позитрона).

Выбирая потенциал отдельного атома в виде экранированного потенциала Кулона (15) и подставляя фурье-компоненты непрерывного потенциала атомной плоскости в (11), получаем следующее выражение для сечения излучения:

$$d\sigma = Z^2 \alpha^3 16\pi \frac{N}{a_y a_z} \frac{\varepsilon'}{\varepsilon} \frac{\delta}{m^2} \frac{d\omega}{\omega} \frac{dg_x}{\theta^2} \times \left[ \left[ 1 + \frac{\omega^2}{2\varepsilon\varepsilon'} - 2 \frac{\delta}{g_x \theta} \left( 1 - \frac{\delta}{g_x \theta} \right) \right] \frac{1}{(g_x^2 + R^{-2})^2} + \frac{e}{|e|} \frac{2Z\alpha}{\varepsilon a_y a_z} \frac{1}{g_x^2 + R^{-2}} \left[ 1 + \frac{\omega^2}{2\varepsilon\varepsilon'} + \frac{\omega}{\varepsilon'} - 2 \left( 1 + 2 \frac{\omega}{\varepsilon'} \right) \frac{\delta}{g_{||}} \left( 1 - \frac{\delta}{g_{||}} \right) + \frac{\omega^3}{2\varepsilon\varepsilon'^2} \left( 1 - \frac{\delta}{g_{||}} \right) \right] \frac{1}{\theta^2} \frac{2\pi R}{g_x^2 + 4R^{-2}} \right], \quad (16)$$

где  $\theta$  – угол падения частиц на плоскость. При выводе мы учли, что  $g_{||} = g_x \theta$ , так как  $g_y = g_z = 0$  в непрерывном потенциале плоскости. В пределе малых частот сечение излучения будет иметь вид:

$$d\sigma = Z^2 \alpha^3 16\pi \frac{N}{a_y a_z} \frac{\varepsilon'}{\varepsilon} \frac{\delta}{m^2} \frac{d\omega}{\omega} \frac{1}{\theta^2} \times$$

$$\times \int_{\delta/\theta}^{\infty} \frac{dg_x}{(g_x^2 + R^{-2})^2} \left( 1 + \frac{\omega^2}{2\varepsilon\varepsilon'} - 2 \frac{\delta}{g_x \theta} \left( 1 - \frac{\delta}{g_x \theta} \right) \right) \times \left\{ 1 + \frac{e}{|e|} \frac{4\pi Z\alpha R}{\varepsilon a_y a_z} \frac{1}{\theta^2} \frac{g_x^2 + R^{-2}}{g_x^2 + 4R^{-2}} \right\}.$$

Последний результат согласуется с результатом работы [6], где впервые было рассмотрено излучение электронов и позитронов в поле кристаллографической плоскости с учетом второго борновского приближения при  $\omega \ll \varepsilon$ .

Зависимость сечения излучения в поле плоскости от знака заряда частицы допускает наглядную интерпретацию: электрон, притягиваясь к плоскости, в отличие от позитрона, проводит меньше времени в области с большим градиентом потенциала, чем позитрон, что приводит к различию в величине сечения излучения.

#### Библиографический список

1. Тер-Микаелян М.Л. Влияние среды на электромагнитные процессы при высоких энергиях. – Ереван: Изд-во АН Арм ССР, 1969. – 457 с.
2. Ахиезер А.И., Шульга Н.Ф. Электродинамика высоких энергий в веществе. – М.: Наука, 1993. – 344 с.
3. Ахиезер А.И., Берестецкий В.Б. Квантовая электродинамика. – М.: Наука, 1981. – 432 с.
4. Сыщенко В.В., Шульга Н.Ф. // Укр. физ. журн. – 1995. – Т. 40. – № 1, 2. – С. 15.
5. Ахиезер А.И., Шульга Н.Ф., Трутень В.И., Гриненко А.А., Сыщенко В.В. // УФН. – 1995. – Т. 165. – № 10. – С. 1165.
6. Ахиезер А.И., Фомин П.И., Шульга Н.Ф. // Письма в ЖЭТФ. – 1971. – Т. 13. – Вып. 12. – С. 713.

Работа частично поддержана грантом РФФИ (проект 00-02-16337).

УДК 539.12

### ОБ ИДЕНТИФИКАЦИИ СПЕКТРАЛЬНЫХ ПИКОВ, НАБЛЮДАВШИХСЯ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ В ХИРОСИМЕ, И СПЕКТРАЛЬНЫХ ПИКОВ ПРИ ИЗ ПОЛИКРИСТАЛЛА

А.В. Шагин

г. Харьков, ННЦ «Харьковский физико-технический институт»

В работе предложено объяснение происхождения наблюдавшихся в эксперименте в REFER и ранее не идентифицированных спектральных пиков в рентгеновском диапазоне. Показано,

*что эти пики могут быть результатом дифракции Брэгга на поликристаллической фольге излучения в направлении вперед релятивистских электронов в радиаторе. Обсуждаются противоречивые экспериментальные данные из литературы по наблюдению параметрического рентгеновского излучения (ПРИ) из поликристалла и отмечается желательность постановки эксперимента с возможностью более однозначной идентификации спектральных пиков.*

**Введение.** Недавно в работе [1], выполненной в Японии, авторы исследовали параметрическое рентгеновское излучение (ПРИ) и дифрагированное переходное излучение, генерируемое электронами с энергией 150 МэВ в радиаторах, выполненных из монокристаллического кремния различных конфигураций. В эксперименте использовались толстые радиаторы, а также слоистые радиаторы с такой же эквивалентной толщиной. ПРИ генерировалось в монокристалле, а переходное излучение генерировалось на поверхностях кристалла и отклонялось в направлении спектрометрического детектора благодаря дифракции Брэгга теми же кристаллографическими плоскостями, на которых генерировалось ПРИ. Для измерения тока пучка электронов позади радиатора была установлена молибденовая фольга толщиной 10 мкм. Измерение тока пучка осуществлялось путем счета числа квантов в спектральных пиках К-линий характеристического излучения молибдена, возбуждаемого электронами пучка. С помощью Si(Li) детектора в работе [1] были получены отчетливые спектры рентгеновского излучения, содержащие спектральные пики ПРИ и ДПИ, имеющие практически одинаковую энергию и перестраиваемые в диапазоне 9-45 кэВ, и характеристического излучения молибдена при энергиях  $E_{K\alpha}=17,45$  кэВ и  $E_{K\beta}=19,6$  кэВ. Кроме того, авторы работы [1] наблюдали спектральные пики с энергиями 12,5 кэВ и 25,0 кэВ. Происхождение этих пиков не было определено в работе [1], где они были названы как "unidentified peaks" – неидентифицированные пики (НП). В настоящей работе мы обсуждаем экспериментальные данные из [1], касающиеся этих пиков, и предлагаем объяснение происхождения этих пиков.

В экспериментах [1, 2] измерялись спектры рентгеновского излучения, возбуждаемые релятивистскими электронами в поликристаллах (поликристаллическая молибденовая фольга, использованная в [1],

установлена в настоящей работе). В работе [1] ПРИ из поликристалла не наблюдалось, а в работе [2] наблюдались спектральные пики, интерпретированные как проявление ПРИ из поликристалла. В настоящей работе обсуждаются данные из [1, 2] и возможные причины рассогласования результатов, касающихся наблюдений ПРИ из поликристалла.

**1. Идентификация спектральных пиков, наблюдавшихся в эксперименте в Хиросиме.** В работе [1] отмечается, что молибденовая фольга, использованная в эксперименте, была аморфная. Чтобы понять происхождение НП, давайте предположим, что молибденовая фольга была поликристаллическая. В такой поликристаллической фольге возможна дифракция излучения, которое генерируется в радиаторе релятивистскими электронами пучка в направлении вперед. Вычислим энергию Брэгга излучения, подвергающегося дифракции, по формуле из [3]:

$$E_B = \frac{ch\bar{g}^2}{2|\bar{g}\bar{\Omega}|}, \quad (1)$$

где  $\bar{\Omega}$  есть единичный вектор в направлении наблюдения при угле наблюдения  $\theta$  относительно вектора скорости частиц  $\vec{V}$  и направления распространения излучения вперед,

$$|\bar{g}\bar{\Omega}| = g \sin \frac{\theta}{2}, \quad g = |\bar{g}| = \frac{2\pi\sqrt{l^2 + m^2 + n^2}}{a},$$

$a$  - постоянная решетки,  $l, m, n$  есть индексы Миллера для кристаллографических плоскостей с ненулевым структурным фактором. Энергии Брэгга, вычисленные по формуле (1) для кристаллографических плоскостей (110), (220), (200) кристалла молибдена [4] при  $a=3,15$  ангстрем и  $\theta=25,8^\circ$ , составляют  $E_B^{(110)} = 12,5$  кэВ,  $E_B^{(220)} = 25,0$  кэВ,  $E_B^{(200)} = 17,6$  кэВ, соответственно. Вычисленные энергии  $E_B^{(110)}$  и  $E_B^{(220)}$  практиче-

ски совпадают с энергиями спектральных пиков, наблюдавшихся в работе [1]. Энергия  $E_B^{(200)}$  близка к энергии  $E_{K\alpha}$  характеристического пика молибдена, но эти пики не могли быть разрешены в экспериментальных спектрах работы [1] из-за недостаточного энергетического разрешения спектрометрического детектора.

Рассмотрим некоторые другие экспериментальные данные из работы [1], касающиеся НП, с точки зрения нашего объяснения их происхождения.

1. НП пропадают, если радиатор убран. Это происходит потому, что излучение в направлении вперед из радиатора отсутствует. Поэтому только пики характеристического излучения, возбуждаемого электронами пучка в фольге, видны в спектре, изображенном на рис. 11b работы [1].

2. НП пропадают, если молибденовая фольга убрана (см. рис. 5, 6 в [1]). Это происходит потому, что дифракция без поликристалла невозможна.

3. Энергии НП не изменяются при значительных изменениях ориентации кристалла-радиатора (см. рис. 12 в [1]). Это происходит потому, что излучение вперед распространяется вдоль фиксированного вектора скорости электронов пучка  $\vec{V}$  независимо от ориентации кристалла-радиатора.

4. Энергии НП остаются неизменными при изменениях ориентации молибденовой фольги. Это происходит потому, что дифракция осуществляется теми кристаллическими зернами молибдена, которые оказываются в подходящей для дифракции в направлении детектора ориентации, независимо от ориентации фольги в целом.

5. НП с энергией 12,5 кэВ сильно ослабляется (почти исчезает) при ориентации кристаллографической оси  $\langle 100 \rangle$  кристалла-радиатора вблизи вектора  $\vec{V}$  (см. рис. 12с в [1]). Это возможно вследствие значительного уширения этого пика из-за возрастающей расходимости излучения вперед. Возрастание расходимости в направлении вперед возможно в результате увеличения расходимости электронного пучка при использовании конфигурации кристалла радиатора, описанного в работе [1]. Кроме того, возрастание расходимости пучка электро-

нов возможно вследствие увеличения рассеяния электронов при их движении вдоль  $\langle 100 \rangle$  цепочек кристалла-радиатора.

Таким образом, все рассмотренные выше экспериментальные данные из работы [1] согласуются с нашим объяснением происхождения НП как результата дифракции Брэгга в поликристаллической молибденовой фольге излучения в направлении вперед релятивистских электронов пучка в радиаторе [5].

**2. Об идентификации спектральных пиков ПРИ из поликристалла.** Интересно отметить, что электронный пучок может генерировать ПРИ в случайно ориентированных кристаллических зернах поликристаллов. При этом только малая доля кристаллических зерен имеет ориентацию, подходящую для производства рефлекса ПРИ в фиксированном направлении наблюдения. Поэтому дифференциальный выход ПРИ из поликристалла должен быть существенно меньше по сравнению с дифференциальным выходом ПРИ вблизи максимума из монокристалла той же толщины.

Результаты измерения спектра излучения, возбуждаемого электронами с энергией 150 МэВ в молибденовой фольге толщиной 10 мкм, показаны на рис. 11b работы [1]. Поскольку в настоящей работе показано, что эта фольга должна иметь поликристаллическую структуру, это измерение можно интерпретировать как попытку наблюдения ПРИ из поликристалла. Энергии пиков ПРИ должны быть практически равны вычисленным выше энергиям Брэгга 12,5 и 25,0 кэВ для кристаллографических плоскостей (110) и (200) соответственно. Спектральные пики с такими энергиями в спектре на рис. 11b отсутствуют. Это свидетельствует об относительно низком выходе ПРИ из поликристалла (ниже экспериментального фона). С уменьшением энергии налетающих электронов выход ПРИ должен еще более снижаться.

Однако в работе [2] при облучении поликристаллической алюминиевой фольги толщиной 2 мкм электронами с энергией 2,4 МэВ в спектре излучения были обнаружены пики, которые авторы интерпретировали как проявление ПРИ из поликристалла. Ввиду отсутствия ПРИ из поликристалла в

работе [1] при значительно большей энергии электронов, результаты работ [1, 2] по ПРИ из поликристалла, по-видимому, следует рассматривать как противоречивые. Поэтому возникает вопрос о более строгой идентификации происхождения спектральных пиков, наблюдавшихся в [2].

**3. Результаты и обсуждение.** 1. В настоящей работе предложено объяснение происхождения НП (unidentified peaks), наблюдавшихся в эксперименте [1], как результата дифракции Брэгга в поликристалле излучения в направлении вперед релятивистских электронов пучка в радиаторе.

2. В заключение обсуждения наблюдаемости ПРИ из поликристалла отметим, что с одной стороны пока нет прямого экспериментального подтверждения поликристаллической структуры молибденовой фольги в эксперименте [1], а с другой стороны в работе [2] нет экспериментального доказательства того, что наблюдаемые спектральные пики обусловлены ПРИ из поликристалла. В любом случае для решения вопроса о наблюдаемости ПРИ из поликристалла желательна постановка эксперимента с воз-

можностью более однозначной идентификации происхождения спектральных пиков в измеряемых рентгеновских спектрах. Для этого можно, например, провести измерения зависимости энергий спектральных пиков от угла наблюдения  $\theta$  и сопоставить эту зависимость с вычисленной по закону Брэгга.

#### Библиографический список

1. Chouffani K., Andreyashkin M.Yu., Endo I., Masuda J., Takahashi T. and Takashima Y. // Nucl. Instrum. and Meth. B. – 2001. - V.173. - P. 241 - 252.
2. Блажевич С.В., Гришин В.К., Ишханов Б.С., Насонов Н.Н., Петухов В.П., Челурнов А.С., Шведун В.И. // Известия Высших Учебных Заведений, Физика, - 2001. - Т.44. - №3. - С. 66 - 70.
3. Shchagin A.V. and Khizhnyak N.A. // Nucl. Instr. and Meth. B. – 1996. - V.119. - P. 115 - 122.
4. Кителъ Ч., Введение в физику твердого тела: Пер. с англ. – М.: Наука, 1978.
5. Shchagin A.V. // E-preprint. – 2001. - <http://arXiv.org/abs/physics/0105071>.

---

*Работа выполнена при частичной поддержке гранта STCU №1031 от научно-технологического центра в Украине.*

УДК 539.26

## ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ ИОНАМИ ИНЕРТНЫХ И АКТИВНЫХ ГАЗОВ НА СТРУКТУРУ ТОНКИХ ПЛЕНОК ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ

**С.В. Блажевич, Н.В. Камышанченко, И.С. Мартынов**  
г. Белгород, Белгородский государственный университет

**И.М. Неклюдов, В.Ф. Рыбалко**  
г. Харьков, ННЦ “Харьковский физико-технический институт”

*Представлены результаты экспериментального исследования воздействия облучения ионами инертных (He, Ne, Ar, Kr, Xe) и активных (O, N) газов на структуру переходных металлов. В эксперименте использовались тонкие пленки никеля, хрома и железа высокой (99,999 ат. %) чистоты. Облучение проводилось при комнатной температуре в условиях высокого вакуума ( $P < 1 \cdot 10^{-7}$  Pa) на сепарированном пучке ионов. Облучение проводилось в диапазоне энергий падающих частиц  $10 \div 10^3$  кэВ. В качестве основного результата проведенных исследований установлен факт полного отсутствия изменений кристаллической решетки переходных металлов, облученных ионами инертных газов. Установлено также, что наблюдаемые в эксперименте кристаллографические структурные изменения в переходных металлах облученных ионами активных газов определяются их химической природой ионов.*

**1. Изменение микроструктуры пленок никеля при облучении ионами He<sup>+</sup> средних энергий.** Исследование микро-

структуры металла включает в себя изучение зеренной структуры, преимущественной кристаллографической ориентации зе-