

# Транспортировка флуоресцентного рентгеновского излучения микроканальными пластинами

М. И. Мазурицкий

Ростовский государственный университет, 344090 Ростов-на-Дону, Россия

Поступила в редакцию 4 сентября 2006 г.

Исследованы рентгеновские спектры поглощения, полученные при скользящих углах падения излучения на стеки каналов микроканальных пластин (МКП). Обнаружены отличия тонкой структуры Si *L*-спектров XANES при углах падения, меньших критического. Для объяснения экспериментальных данных предложен механизм избирательной транспортировки флуоресцентного излучения внутри микроканалов, основанный на аномальной дисперсии в окрестности *L*-края поглощения кремния.

PACS: 07.85.Fv, 41.50.+h, 61.85.+p, 71.23.Cq, 78.70.Ck, 78.70.Dm

Как известно, при рентгеноспектральных исследованиях большой интерес представляют методики скользящего падения возбуждающего излучения. Спектроскопические методы основаны на измерении различных вторичных (неупругих) излучений – отклика твердого тела на поглощение части падающего рентгеновского излучения. При углах падения, меньших критического, регистрация вторичного излучения (флуоресценция, фото- и оже-электроны), имеющего малую глубину выхода, позволяет анализировать электронную структуру и оптические характеристики приповерхностных слоев вещества [1–3].

В настоящей работе исследованы длинноволновые рентгеновские спектры микроканальных пластин (МКП) при скользящих углах падения излучения на стенки каналов. МКП представляют собой тонкие (0.4 мм) пластины, состоящие преимущественно из силикатного стекла, специальным образом технологически обработанного. Сквозные отверстия диаметром 10 мкм расположены почти перпендикулярно торцевой поверхности. МКП широко используются в качестве отражателей и элементов фокусировки рентгеновского излучения [4].

Образец WG – это белая микроканальная пластина, в которой отверстия являются “заготовками” для каналов электронного умножителя. Черная пластина BG1 получена из WG в результате термодородного восстановления. Эта технологическая обработка предназначена для модификации физико-химических свойств стекла. Образец BG2 представляет собой черную пластину BG1, на торцевые поверхности которой нанесен слой металлического хрома, толщиной примерно 1 мкм. Существенным отличием белых и черных МКП является значительная разница их диэлектрических свойств.

Рентгеновские спектры (см. рис.1,2) получены с разрешением 0.1 эВ на рентгеновском спектромет-

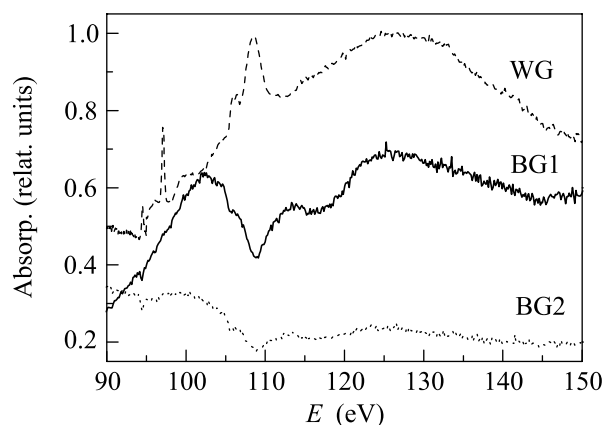


Рис.1. Спектры FY микроканальных пластин в окрестности *L*-края поглощения кремния. WG, BG1, BG2 – белая и черные микроканальные пластины, соответственно

ре Mark IV Grasshopper в канадском синхротронном центре университета Висконсин (Мэдисон, США). Из рис.1 видно, что в спектрах BG *L*-край кремния “инверсно” отображает ближнюю тонкую структуру края поглощения спектра белой пластины. Методики съемки спектров и позиционирования образцов WG и BG были идентичны. Вместе с тем, тонкая структура *L*-спектра XANES для образца WG (см. рис.1), а также спектры TEY (рис.2) полностью соответствуют спектрам окиси кремния, известным из работ [5–7].

Спектры FY (fluorescence yield) и TEY (total electron yield) возбуждались монохроматическим излучением, сканируя по энергии в окрестности соответствующих краев поглощения (SiL, BK и т.д.).

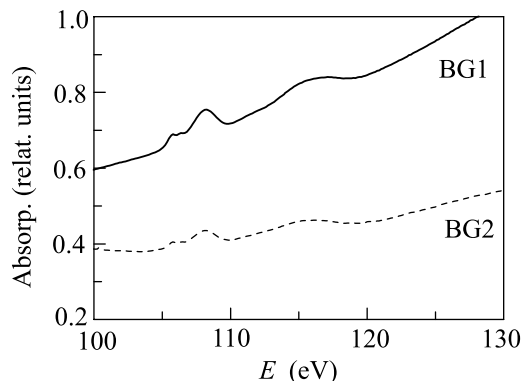


Рис.2. Спектры выхода фотоэффекта ТЕУ черных микроканальных пластин BG1, BG2

В случае FУ регистрировалась интегральная интенсивность флуоресцентного излучения, вышедшего из образца. На рис.3 схематично изображен луч, падающий под скользящим углом на стенки микроканалов. Флуоресцентное излучение, испущенное поверхностью МКП, регистрировалось в направлении (близком) нормали к поверхности пластины. Аналогичная и стандартная для таких исследований схема расположения образца и детектора флуоресцентного излучения приведена в [1]. Спектры ТЕУ получены тоже при монохроматическом возбуждении с одновременной регистрацией всех фотоэлектронов, покинувших поверхность образца под действием кулоновского поля.

В работе [8] были исследованы рентгенооптические свойства МКП. Показано, что для образца BG значение критического угла больше, чем для WG. С учетом того, что большая часть излучения падает на внутренние стенки микроканалов, сделан вывод, что для образца BG возбуждение флуоресценции происходит при углах падения первичного пучка, меньших критического, то есть в условиях полного внешнего отражения. Это не противоречит тому, что при малой глубине проникновения излучения происходит не только зеркальное отражение, но и возбуждение вторичного излучения. В работах [2, 9] показано, что при малых углах скольжения можно получать одновременно спектры отражения и флуоресценции, возможна также регистрация угловых зависимостей этих спектров.

Спектроскопия аномального отражения ультрамягкого рентгеновского излучения является одним из методов исследования неглубоких остовных уровней (энергия связи – десятки-сотни эВ). При углах скольжения, меньших критического, происходит одновременно с когерентным рассеянием в зеркальном направлении некогерентное, которое определяется

поглощением в отражающем слое. Спектры отражения в окрестности  $L$ -края кремния, полученные при зеркальном отражении от поверхности системы Si-SiO<sub>2</sub>, при углах скользящего падения, меньших (и больших) критического, представлены в работах [3, 10, 11]. Здесь важно отметить, что тонкая структура спектров отражения аналогична спектру выхода флуоресценции, полученного нами от образца BG (спектр FУ, рис.1). Выше отмечено, что известны спектры стекол [5–7], тонкая структура которых практически совпадает со спектром FУ образца WG, а также спектрами ТЕУ. Из рис.1 также видно, что “инверсия” тонкой структуры наблюдается не только для спектра кремния, но и для других, более длинноволновых краев поглощения. Поскольку спектры образцов BG1 и BG2 в этом смысле идентичны, то речь идет о возбуждении флуоресценции внутри микроканалов. На это также указывают спектры ТЕУ, приведенные на рис.2. Рентгеновское флуоресцентное излучение может возникать и транспортироваться внутри каналов при выполнении двух обязательных условий: глубина выхода флуоресценции должна быть сравнима с толщиной отражающего слоя; внутри микроканалов должны выполняться условия, необходимые для транспортировки длинноволнового излучения.

Распространение рентгеновского излучения в капиллярных системах в основном зависит от взаимодействия излучения с внутренними стенками каналов. В рамках полуклассического подхода достаточно легко описываются процессы диполь-дипольного рассеяния фотонов. С одной стороны, электромагнитная волна рассматривается как классическое электромагнитное поле, которое своей электрической составляющей действует на электроны в атоме, описываемые на основе квантовых принципов. Электрическое поле электромагнитной волны поляризует атом, что приводит к появлению переменного во времени дипольного момента атома, осциллирующего на частоте падающей волны. С другой стороны, в соответствии с волновой теорией каналирования отражение электромагнитной волны при скользящих углах падения происходит на протяженном участке поверхности, в связи с чем полагают, что рассеяние происходит в макрополе, которое характеризуется макроскопической диэлектрической проницаемостью  $\epsilon \approx 1 - \delta + i\beta$  [12, 13]. При идеальном рассмотрении пучок разделяется на два: зеркально отраженный и преломленный, который может избирательно поглощаться атомами. Зеркальное отражение в отсутствие поглощения определяется слоем толщиной  $\Delta d_{\perp} = 2\pi c/\omega_0 \approx 50 \text{ \AA}$  [14]. Глубины проникновения излучения при



Рис.3. Схематичное изображение взаимодействия излучения с микроканальной пластиной

аномальном рассеянии в окрестности  $L$ -края кремния (100 эВ) в стекле составляют также примерно 50–100 Å [10]. Важно подчеркнуть, что по порядку величины толщина отражающего слоя совпадает с глубиной выхода флуоресценции.

При рассмотрении транспортировки излучения полым волноводом имеет место сильная угловая зависимость. Фотон, испытывая многократное отражение от стенок канала, может свободно распространяться при условии  $\theta < \theta_c = \omega_0/\omega$ ,  $\omega_0$  – плазменная частота материала поверхности,  $\omega$  – частота рентгеновского излучения. Коэффициент отражения приближается к 1 при углах, меньших критического угла полного внешнего отражения  $\theta_c$ . Для стекла в диапазоне энергий флуоресцентного излучения кремния  $\theta_c \approx \sqrt{\delta} \approx 8^\circ$  [3]. При этом траектории рентгеновских фотонов в канале при многократном отражении представляют собой спиралеобразные кривые. Поперечная длина волны  $\lambda_\perp = \lambda/\theta$  намного превосходит длину волны падающего излучения. В результате возникают предпосылки для поверхностно-связанного распространения излучения [14] в микроканалах при длинах волн порядка 100 Å.

Распространению флуоресцентного излучения внутри каналов способствует наличие аномальной дисперсии, поскольку эффективное значение диэлектрической проницаемости испытывает скачок. Согласно экспериментальным данным [3], в окрестности  $L$ -края поглощения кремния декремент показателя преломления испытывает значительный скачок ( $\delta = 2 \cdot 10^{-3}$ ,  $\delta = -9 \cdot 10^{-3}$ ). Теоретические оценки этого параметра с использованием атомных факторов рассеяния [15] оказываются близкими к экспериментальным. Возрастание по модулю декремента показателя преломления приводит к полному внутреннему отражению флуоресцентного излучения с возрастанием коэффициента отражения

лучей при аномальном рассеянии от стенок канала. При этом микроканалы могут избирательно транспортировать характеристическое излучение как полые рентгеновские волноводы. Преимущественное распространение  $CK_\alpha$ -излучения вдоль углеродных нанотрубок было также обнаружено в [16].

В пользу механизма транспортировки флуоресцентного излучения говорит также тот факт, что для черной МКП  $L$ -спектр кремния, повторяя “инверсно” форму, наблюдаемую в спектре белой пластины, сдвинут на 0.6 эВ (см. рис.1). Тонкая структура спектра, включая главный резонансный максимум, несколько расширена. Это относится также и к FУ спектру BG2, для которого длинноволновое излучение способно возбуждать флуоресценцию кремния только внутри каналов. При поглощении и частичном отражении от стенок каналов под скользящими углами происходит суперпозиция флуоресцентного излучения. В регистрируемом спектре наблюдается несколько  $L$ -спектров поглощения кремния, полученных от разных участков поверхности. Сдвиги спектров объясняются тем, что поверхность стекла содержит кремний в различном окисном состоянии  $SiO_x$ , где  $1 < x < 2$ .

Таким образом, проведенный анализ и оценки указывают на возможность избирательного распространения флуоресцентного излучения, возникающего в результате возбуждения  $L$ -края поглощения кремния, внутри каналов силикатных микроканальных пластин.

1. М. К. Tiwari, В. Gowrishankar, V. K. Raghuvanshi et al., Bull. Mater. Sci. **25**, 435 (2002).
2. А. П. Ковтун, В. П. Краснолуцкий, И. В. Ситник, Электронный научный журнал “Исследовано в России”, <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2002/190.pdf>.

3. E. Filatova, A. Stepanov, C. Blessing et al., *J. Phys. Condens. Matter* **7**, 2731 (1995).
4. A. P. Martin, A. N. Brunton, G. W. Fraser et al., *Nucl. Instr. Meth. A* **460**, 316 (2001).
5. И. А. Брытов, Ю. Н. Ромашенко, *ФТТ* **20**, 664 (1978).
6. Dien li, G. M. Bancroft, M. Kasrai et al., *American Mineralogist* **79**, 785 (1994).
7. B. Gilbert, V. H. Frazer, F. Naab et al., *American Mineralogist* **88**, 763 (2003).
8. М. И. Мазурицкий, А. В. Солдатов, М. Касрай, Письма в *ЖТФ* **31**, 20 (2005); M. I. Mazuritskiy, A. V. Soldatov, and M. Kasrai, *Techn. Phys. Lett.* **31**, 277 (2005).
9. М. В. Ковальчук, В. Г. Кон, *УФН* **149**, 69 (1986).
10. Е. О. Филатова, А. С. Шулаков, В. А. Лукьянов, *ФТТ* **40**, 1360 (1998).
11. А. С. Виноградов, Е. О. Филатова, Т. М. Зимкина, *ФТТ* **25**, 1120 (1983).
12. В. А. Аркадьев, М. А. Кумахов, *Поверхность* **10**, 25 (1986).
13. А. В. Виноградов, И. В. Кожевников, *Труды ФИАН*, под ред. А. Н. Ораевского, М.: Наука, 1989, т. **196**, с. 18.
14. С. Б. Дабагов, *УФН* **173**, 1083 (2003); S. B. Dabagov, *Physics Uspekhi* **46**, 1053 (2003).
15. Berkley National Laboratory, Center for X-Ray Optics, X-Ray Interactions with Matter [http://www.cxro.lbl.gov/optical\\_constants](http://www.cxro.lbl.gov/optical_constants).
16. А. В. Окотруб, С. Б. Дабагов, А. Г. Кудашов и др., Письма в *ЖЭТФ* **81**, 37 (2005).