

02

Исследование рентгенооптических характеристик микроканальных пластин методом спектроскопии поглощения

© М.И. Мазурицкий, А.В. Солдатов, М. Касрай

Ростовский государственный университет, Ростов-на-Дону
E-mail: mazurmik@aaanet.ru

Поступило в Редакцию 2 июня 2004 г.
В окончательной редакции 12 октября 2004 г.

Получены и исследованы в диапазоне 80–250 eV экспериментальные рентгеновские спектры поглощения для различных образцов микроканальных пластин (МКП). Представлены результаты анализа тонкой структуры XANES спектров, а также новый подход к исследованию влияния технологической обработки на рентгенооптические свойства микроканалов. Установлено, что для длинноволнового рентгеновского излучения термоводородное восстановление МКП повышает критический угол отражения каналов.

Известно, что МКП широко используются в качестве отражателей и элементов фокусировки, а также для фильтрации рентгеновского излучения [1–3]. В связи с этим чрезвычайно важным свойством является отражающая способность каналов, в том числе в области малых энергий излучения. В настоящей работе впервые описан новый подход, представлены результаты исследования экспериментальных рентгеновских спектров поглощения, позволяющие анализировать изменение критического угла отражения для МКП, подвергнутых специальной технологической обработке.

Рентгеновские спектры поглощения белых (WG) и черных (BG) МКП были получены нами с разрешением 0.1 eV на рентгеновском спектрометре Mark IV Grasshopper, работающем на канале ускорителя в канадском синхротронном центре университета Висконсин (Мэдисон, США). Представленные результаты подтверждены в трех сериях измерений, причем в каждом случае экспериментальные спектры получались от различных партий белых и черных образцов.

Как известно, классическая методика получения рентгеновских спектров поглощения состоит в том, что на исследуемый образец направляется первичное излучение, интенсивность которого в заданном диапазоне энергий известна. Измеряется спектральное распределение излучения, прошедшего сквозь образец. Спектром поглощения является зависимость от энергии (длины волны) отношения интенсивностей излучений: прошедшего сквозь образец к первичному излучению, т.е. падающему потоку. Поскольку в принципе далеко не всегда возможно приготовление образцов требуемой толщины, в настоящее время используют другие методики, позволяющие получать спектральные зависимости, аналогичные спектрам поглощения. Спектры *FY* (fluorescence yield) и *TEY* (total electron yield) получены при возбуждении образца монохроматическим излучением, сканируя по энергии в окрестности соответствующих краев поглощения (например, ВК или SiL). В первом случае (*FY*) регистрировалась интегральная (суммарная) интенсивность флуоресцентного излучения, вышедшего из образца. Спектры *TEY* тоже получены при монохроматическом возбуждении с одновременной регистрацией всех фотоэлектронов (включая Оже-электроны), покинувших поверхность образца под действием кулоновского поля. Очевидно, что спектры *TEY* более чувствительны к составу и строению вещества, находящемуся в тонком поверхностном слое (до 500 Å), в то время как спектры *FY* несут с большей глубины информацию об электронном строении вещества.

На рис. 1, 2 представлены обзорные рентгеновские спектры соответственно белой (*WG*) и черной (*BG*) МКП. Образец *WG* — это пластина, в которой отверстия являются „заготовками“ для каналов электронного умножителя. При этом свинцово-силикатное стекло составляет каркас, а боросиликатное — до химического травления заполняло отверстия, предназначенные для электронных каналов. Отметим, что присутствие в спектрах *K*-края поглощения бора (194.4 eV) свидетельствует о том, что следы боросиликатного стекла остаются на поверхности свинцово-силикатного стекла. Черная пластина *BG* получена из *WG* в результате термоводородного восстановления. Эта процедура модифицирует физико-химические свойства стекла. Анализ структуры поверхности указывает (см. [4–6]) на то, что при этом изменяется окисное состояние кремния SiO_x , где $1 < x < 2$. Известно также, что у черной МКП величина диэлектрической проницаемости значительно меньше, чем была

до отжига в водороде. Ниже приведены экспериментально измеренные энергии основных краев поглощения.

Электронные уровни	Pb O _{III} (5p _{3/2})	Si L _{III} (2p _{3/2})	Pb O _{II} (5p _{1/2})	Pb N _{VII} (4f _{7/2})	Si L _I (2s _{1/2})	БК (1s _{1/2})
Эксперим. значения энергий, eV	97.1	108.5 (WG) 109.1 (BG)	115	144.7	157.2	194.4

Из сопоставления структур *FY* на рис. 1, 2 видно, что в диапазоне энергий примерно до 120 eV спектр черной МКП (на рис. 2) выглядит инверсно по сравнению с аналогичным спектром белой пластины. Иными словами, в мягкой рентгеновской области структура спектра *FY* черной МКП напоминает классические спектры поглощения, которые обычно получают по методике, когда падающее излучение проходит насквозь. В то же время в спектрах *TEY* вышеназванных различий

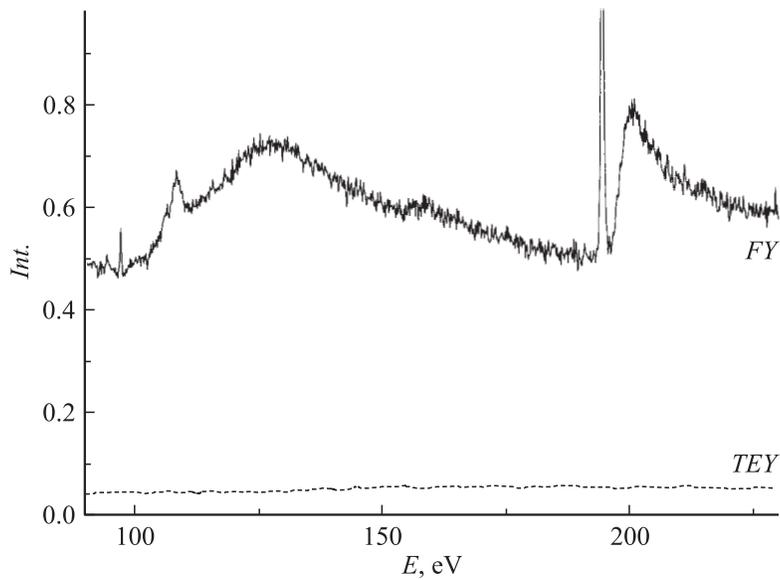


Рис. 1. Обзорный спектр рентгеновского поглощения микроканальной пластины *WG*.

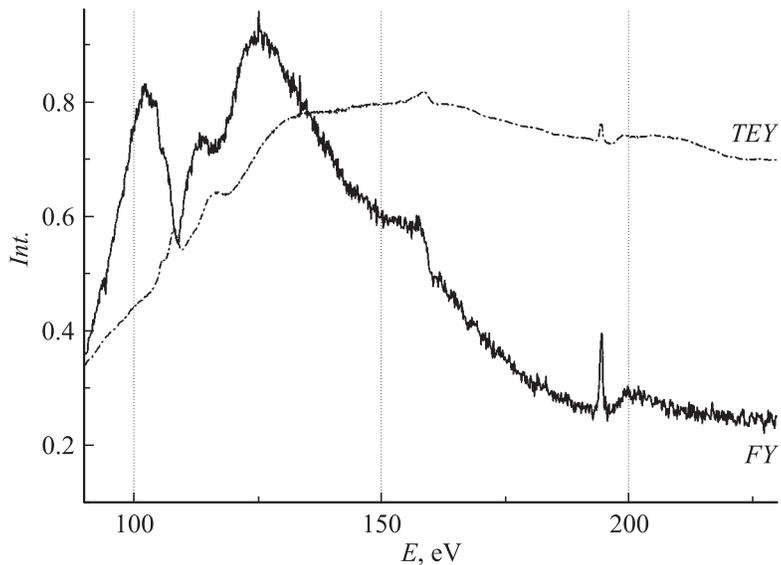


Рис. 2. Обзорный спектр рентгеновского поглощения микроканальной пластины *BG*.

не обнаружено. Рассмотрим подробнее механизм формирования тонкой структуры $\text{Si L}_{\text{II,III}}$ — спектров поглощения в наших образцах.

Экспериментальные условия, при которых получены спектры *FY* и *TEY*, таковы: монохроматическое излучение направлялось под неизменным углом (почти перпендикулярно) к поверхности образца. Как известно, наибольшая интенсивность флуоресценции излучается под прямым углом к падающему потоку. В обоих образцах (*WG* и *BG*) есть сквозные отверстия — каналы, которые занимают до 80% от общей площади поверхности пластины. Очевидно, что лучи, входящие в каналы, падают на внутренние поверхности под малыми углами. По сравнению с плоским образцом регистрируемая интенсивность снижается из-за поглощения флуоресцентного излучения внутри МКП. Спектр *TEY*, полученный от образца *BG*, по интенсивности существенно превосходит соответствующий спектр, полученный от *WG*. В нем видны основные края поглощения кремния, свинца и бора. Очевидно, что в *BG* фотоэлектроны способны выходить даже изнутри каналов под действием приложенного электрического поля.

Как известно, условие скользящего падения выполняется лишь тогда, когда угол θ между падающим лучом и поверхностью (угол скольжения) меньше характерного для данного вещества критического угла θ_c полного внешнего отражения. Напомним, что в рентгеновском диапазоне оптические свойства вещества задаются диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 1 - \delta + i\gamma$ (где $\delta, \gamma \ll 1$). В частности, ею определяется и величина критического угла $\theta_c = \sqrt{\delta}$, которая возрастает с увеличением длины волны излучения. Для исследуемого диапазона значение критического угла, согласно [7], составляет 7–10°.

Очевидно, что белая микроканальная пластина (*WG*) не отличается элементарным составом от черной (*BG*). Если не учитывать рассеяния, то падающее излучение либо отражается, либо проникает внутрь вещества, поглощаясь электронными оболочками атомов. Для черных МКП отсутствие флуоресцентного излучения вблизи *L*-края поглощения кремния означает резкое уменьшение глубины проникновения лучей, падающих на стенки каналов. Это как раз соответствует полному внешнему отражению и распространению рентгеновского излучения вдоль поверхности цилиндрического канала почти без затухания. В работах [8,9] этот процесс теоретически подробно рассмотрен.

Значение коэффициента отражения может существенно возрасти, поскольку определяется величиной $\exp(-\gamma/\delta^{3/2})$. Вспомним, что наиболее существенным отличием белых от черных МКП является значительная разница их диэлектрических свойств. Последние обладают на несколько порядков большей проводимостью. Иными словами, для черной МКП излучение способно выйти наружу, многократно отразившись внутри канала и испытав при этом поглощение вблизи *L*-края кремния. В пользу этого суждения говорит также тот факт, что в спектре черной МКП *L*-край кремния, повторяя „инверсно“ форму спектра (наблюдаемую в белой пластине), сдвинут на 0.6 V в сторону больших энергий. Видно также, что в спектре черной МКП главный резонансный максимум несколько расширен. Объясняется это тем, что после технологических обработок поверхность стекла содержит кремний в различном окисном состоянии SiO_x , где $1 < x < 2$. При многократном отражении и частичном поглощении излучения в регистрируемом спектре наблюдается суперпозиция нескольких *L*-спектров поглощения кремния.

В коротковолновой области уменьшение коэффициента отражения рентгеновского излучения может происходить по двум причинами:

во-первых, за счет уменьшения критического угла полного внешнего отражения, во-вторых, за счет резкого уменьшения отражения на скачке коэффициента поглощения материала. Этим объясняется отсутствие „инверсной“ структуры спектров черных МКП, например, в окрестности *K*-края поглощения бора (194 eV).

Для окончательного выяснения природы инверсного вида спектров черных МКП необходимо повторить эксперимент для разных углов падения излучения. Используя широкий рентгеноспектральный диапазон, можно анализировать влияние технологии обработки МКП на величину критического угла отражения.

В заключение следует отметить, что термоводородное восстановление увеличивает предельный угол полного внешнего отражения и таким образом повышает эффективность рентгеновских волноводов, изготовленных из кремний-силикатного стекла. Эта модификация МКП делает их особенно привлекательными для использования в длинноволновом рентгеновском диапазоне в качестве фильтров и отражающих элементов.

Список литературы

- [1] *Yamaguchi N., Aoki S., Miyoshi S.* // Review of Scientific Instrumentation. 1987. V. 58. P. 43–44.
- [2] *Chapman H.N., Rode A., Nugent K.A., Wilkins S.W.* // Appl. Opt. 1993. V. 32. P. 6333–6340.
- [3] *Martin A.P., Brunton A.N., Fraser G.W.* et al. // NIM. A. 2001. V. 460. P. 316–325.
- [4] *Козаков А.Т., Никольский А.В., Мазурицкий М.И.* и др. // Письма в ЖТФ. 1991. Т. 17. В. 12, С. 9–14.
- [5] *Козаков А.Т., Никольский А.В., Мазурицкий М.И.* // Физика и химия стекла. 1991. № 6. С. 225–231.
- [6] *Солдатов А.В., Иванченко Т.С., Мазурицкий М.И.* // ФТТ. 1994. Т. 36. № 3. С. 836–839.
- [7] *Виноградов А.В., Кожевников И.В.* // Рентгеновская оптика. Наука. 1989. Т. 196. С. 18–46.
- [8] *Кожевников И.В.* // Рентгеновская оптика. Наука. 1989. Т. 196. С. 143–167.
- [9] *Dabagov S.B., Marcelli A., Murashoval V.A.* et al. Coherent and incoherent components of a synchrotron radiation spot produced by separate capillaries. Report Laboratori Nazionali di Frascati (Italy, Frascati). LNF-99/033 (P), Nov., 10. 1999. 12 p.
- [10] *Аркадьев В.А., Кумахов М.А.* // Поверхность. 1986. В. 10. С. 25–32.