

Кремниевый фотодиод для экстремального ультрафиолетового диапазона спектра с селективным Zr/Si-покрытием

П.Н.Аруев, М.М.Барышева, Б.Я.Бер, Н.В.Забродская, В.В.Забродский, А.Я.Лопатин, А.Е.Пестов, М.В.Петренко, В.Н.Полковников, Н.Н.Салашенко, **В.Л.Суханов**, Н.И.Чхало

Разработана методика создания кремниевого фотодиода с интегрированным узкополосным Zr/Si фильтром для экстремального ультрафиолетового (ЭУФ) спектрального диапазона. Создана установка для измерения профиля чувствительности детекторов с пространственным разрешением лучше 100 мкм. Исследованы оптические свойства кремниевых фотодиодов в ЭУФ и видимом спектральных диапазонах. Проведено сравнение ряда характеристик диодов SPD-100UV с Zr/Si-покрытием и без покрытия и AXUV-100. У всех типов детекторов обнаружена узкая область вне рабочей апертуры, чувствительная к видимому свету.

Ключевые слова: ЭУФ-излучение, кремниевый фотодиод, детектор, ЭУФ-фильтр.

1. Введение

В процессе развития проекционной литографии экстремального ультрафиолетового (ЭУФ) диапазона на рабочей длине волны 13.5 нм [1], диагностики высокотемпературной плазмы, управляемого термоядерного синтеза [2], рентгеновской микроскопии [3] и астрономии [4] повышаются требования к детекторам ЭУФ излучения.

Кремниевые фотодиоды AXUV (IRD Inc., США) на основе p–r-структур широко известны и давно применяются для регистрации мягкого рентгеновского и ЭУФ излучения [5]. Противоположные по структуре p–n-фотодиоды SPD-100UV (ФТИ им. А.Ф.Иоффе, Санкт-Петербург), разработаны для использования в этих же областях спектра [6, 7]. В русскоязычной литературе за фотодиодами SPD исторически закрепилась аббревиатура ФДУК. В работе [8] приведены экспериментальные данные, полученные на синхротроне ВЭПП-4, об однородности чувствительности по апертуре и радиационной стойкости этих детекторов в мягком рентгеновском и ЭУФ диапазонах. Радиационная стойкость фотодиодов SPD-100UV к ЭУФ излучению оказалась выше, чем у фотодиодов серии AXUV, что делает детекторы SPD-100UV перспективными для регистрации больших доз ЭУФ излучения.

В некоторых случаях применения кремниевых фотодиодов серьезным недостатком является их высокая чувствительность к ближнему ИК, УФ и видимому излучениям. В таких случаях детекторы приходится комплекто-

вать специальными внешними тонкопленочными фильтрами. В рентгеновской области спектра подбором соответствующих внешних фильтров удается обеспечить высокую селективность фотодиода с подавлением чувствительности к длинноволновому излучению на несколько порядков. Однако изготовление таких фильтров для ЭУФ диапазона затруднено, т.к. для сохранения высокой квантовой эффективности прибора толщины пленок должны составлять десятки и сотни нанометров [9]. Из-за низкой механической прочности таких фильтров возникают проблемы при их эксплуатации, в частности при вакуумной откачке приборов, в случае акустических и локальных термических воздействий. Удобным вариантом решения этой проблемы является нанесение тонких фильтрующих пленок непосредственно на чувствительную поверхность фотодиода [5].

В представленной работе изучаются свойства фотодиодов SPD-100UVZr/Si с нанесенными непосредственно на активную область многослойными Zr/Si-фильтрами, оптимизированных для регистрации излучения в окрестности длины волны 13.5 нм. Пленки наносились методом магнетронного распыления в ИФМ РАН (Ниžний Новгород) на пластины с уже изготовленными диодными структурами. Перед напылением на кремниевую пластину был нанесен фоторезист, последующая операция фотолитографии вскрывала в фоторезисте окна размером 10.1 × 10.1 мм. Эта операция обеспечивала напыление слоев фильтра на всю активную область детектора. В дальнейшем метод взрывной литографии освобождал периферийную область фотодиода от слоев фильтра. Таким образом, слои фильтра оставались только в активной области фотодиода, заходя лишь на 0.05 мм на его токосъемный электрод.

Также в работе описывается установка, разработанная для изучения квантовой эффективности детекторов в мягком рентгеновском и ЭУФ диапазонах по всей чувствительной области фотодиода с пространственным разрешением лучше 100 мкм. Приведены результаты сравнения основных характеристик кремниевых фотодиодов SPD-100UVZr/Si и AXUV-100.

П.Н.Аруев, Б.Я.Бер, Н.В.Забродская, В.В.Забродский, М.В.Петренко, В.Л.Суханов. Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН, Россия, 194021 С.-Петербург, ул. Политехническая, 26; e-mail: sildet@mail.ioffe.ru

М.М.Барышева, А.Я.Лопатин, А.Е.Пестов, В.Н.Полковников, Н.Н.Салашенко, Н.И.Чхало. Институт физики микроструктур РАН, Россия, Нижегородская обл., 603950 Афонинo, ул. Академическая, 7; e-mail: chkhalo@ipm.sci-nnov.ru, aepestov@ipm.sci-nnov.ru

Поступила в редакцию 24 июля 2012 г., после доработки – 6 августа 2012 г.

2. Описание фотодиода с абсорбционным фильтром

На рис.1 представлены структуры кремниевого фотодиода SPD-100UVZr/Si с нанесенным на его поверхность Zr/Si-фильтром и фотодиода AXUV-100. Размеры активной области фотодиодов обоих типов составляли 10 × 10 мм. Для выделения области спектра в окрестности длины волны 13.5 нм путем подавления длинноволновой (ИК, видимый и УФ диапазоны) и коротковолновой частей спектра на поверхность фотодиода наносилось фильтрующее покрытие на основе пары материалов Zr и Si. Исследуемый спектральный диапазон лежит вблизи $L_{II,III}$ края поглощения кремния (12.3 нм), при этом кремний является прозрачным для излучения с длиной волны 13.5 нм. Для повышения блокирующей способности фильтра в длинноволновых областях спектра необходимо в состав структуры включить металл с высокой прозрачностью на рабочей длине волны. Одним из наиболее прозрачных вблизи 13.5 нм металлов является цирконий. Таким образом, в качестве защитного покрытия была выбрана многослойная структура Zr/Si. Поскольку исследуемые объекты имеют сильно различающиеся эмиссионные характеристики, а детектор предполагается использовать для решения широкого круга задач (универсальный), то общая толщина фильтра и доля каждого материала в многослойной структуре были взяты теми же, что и у свободновисящих Zr/Si-фильтров, зарекомендовавших себя с наилучшей стороны в составе различных приборов при исследованиях Солнца и мощных лазерно-плазменных и газоразрядных источников рентгеновского излучения [9, 10]. Фильтр состоял из $N = 47$ периодов (бислоев), каждый из которых содержал слой циркония толщиной $d_{Zr} = 4.15$ нм и слой кремния толщиной $d_{Si} = 1.96$ нм. На рис.2 сплошная кривая – расчетная зависимость коэффициента пропускания фильтра в мягком рентгеновском и ЭУФ диапазонах. Видно, что пропускание на длине волны 13.5 нм достигает 44%. Согласно расчетам подавление УФ, видимого и ИК излучений вплоть до длинноволновой гра-

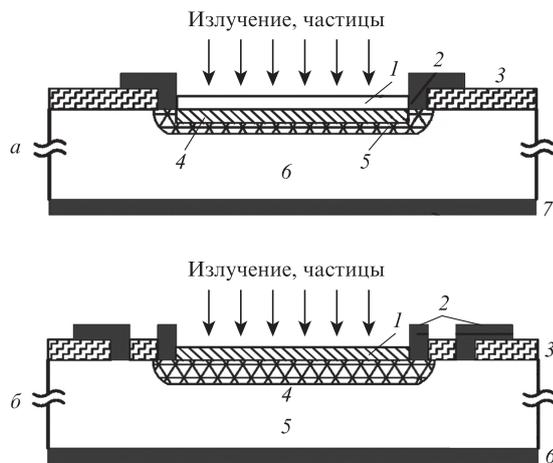


Рис.1. Структуры фотодиодов SPD-100UVZr/Si (a) и AXUV-100 (б): a: 1 – многослойный Zr/Si-фильтр; 2 – металлизация; 3 – защитный термический окисел; 4 – пассивирующий слой из компаунда кремний-бор; 5 – легированная область р-типа; 6 – подложка n-типа; 7 – металлизация; б: 1 – пассивирующий слой из диоксида кремния; 2 – металлизация; 3 – защитный термический окисел; 4 – легированная область n-типа; 5 – подложка р-типа; 6 – металлизация.

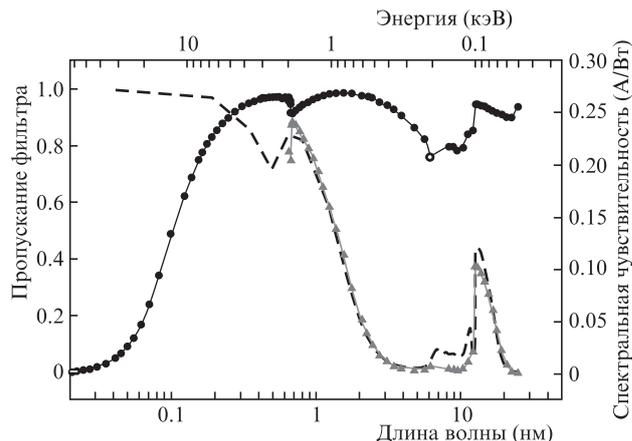


Рис.2. Спектральные зависимости чувствительности детекторов SPD-100UVZr/Si с Zr/Si-фильтром (Δ) и SPD-100UV без фильтра (○), измеренные в Метрологическом центре РТВ (Берлин, Германия), и теоретический спектр пропускания Zr/Si-фильтра с числом периодов $N = 47$, каждый из которых содержит слой Zr и Si с толщинами $d_{Zr} = 4.15$ нм и $d_{Si} = 1.96$ нм (сплошная кривая).

ницы чувствительности детектора (~ 1 мкм) превышает 10^{10} (100 дБ).

Пленки наносились методом магнетронного распыления на оборудовании и по технологии, описанных в [11]. Однородность толщины покрытия по площади детектора определялась по положению брэгговских пиков отражения на рентгеновском дифрактометре X'Pert Pro MRD (PANalytical), оснащенный шестиосным гониометром, и была не хуже 0.2%.

3. Результаты измерений

3.1. Измерение чувствительности фотодиода PD-100UVZr/Si в области ЭУФ

Исследование чувствительности детекторов в ЭУФ диапазоне проводилось с помощью специально разработанного многофункционального лабораторного рефлектометра, схема которого приведена на рис.3. Оптическая схема построена на базе двухзеркального объектива-монокроматора Шварцшильда, который был образован двумя сферическими многослойными зеркалами, оптимизированными на соответствующую длину волны (параметры объектива-монокроматора представлены ниже).

Длина всей системы l (от источника до изображения) (мм)	1143.17
Расстояние l_1 от источника до центра кривизны зеркал (мм)	1036.16
Расстояние l_2 от второго зеркала (вогнутого) до изображения (мм)	534
Радиус кривизны R_1 первого (выпуклого) зеркала (мм)	133.38
Радиус кривизны R_2 второго (вогнутого) зеркала (мм)	427.0
Размер изображения (расчет без учета дифракции) при «нулевом» источнике (нм)	20
Размер изображения (расчет) при размере источника 0.5 мм (мм)	0.05

Уменьшение системы	9.86
Диаметр вогнутого зеркала (мм)	115
Диаметр отверстия в вогнутом зеркале (мм)	40
Диаметр выпуклого зеркала (мм)	20
Рабочая длина волны монохроматора (нм)	13.5
Полоса пропускания (нм)	0.41
Коэффициент пропускания объектива.	0.36
Коэффициент пропускания фильтра на выходе рентгеновской трубки.	0.41

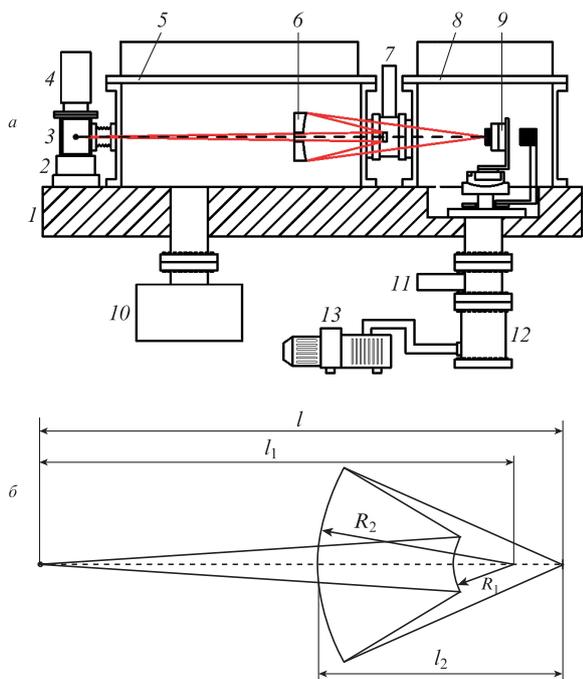


Рис.3. Схема рефлектометра (а) и оптическая схема объектива-монохроматора (б):

1 – базовая плита; 2 – юстировочный элемент рентгеновской трубки; 3 – рентгеновская трубка; 4 – ионный источник; 5 – камера монохроматора; 6 – монохроматор; 7, 11 – вакуумные затворы; 8 – камера образцов; 9 – гониометр; 10–13 – магнетронный, турбомолекулярный и форвакуумный насосы соответственно.

Основными преимуществами многослойных интерференционных зеркал нормального падения перед традиционными дифракционными решетками являются большие геометрическая светосила и коэффициенты отражения зеркал, а также совмещение функций монохроматора и формирователя геометрических характеристик зондового пучка. В частности в работе [12] использование таких зеркал позволило увеличить интенсивность зондового сигнала в 800 раз по сравнению со случаем традиционного решетчатого монохроматора [13]. Формирование спектральной полосы пропускания прибора происходит за счет оптимизации доли сильнопоглощающего вещества в периоде многослойной структуры [14], нанесения аперодических структур (достигается максимум интенсивности зондового пучка) [15] либо сдвига резонансных длин волн зеркал (достигается минимум спектральной ширины зондового пучка). Если требуется тестирование на нескольких длинах волн, то многослойные отражающие структуры, оптимизированные на требуемые длины волн, можно нанести на различные секторы подложек. В процессе работы ненужные секторы просто закрываются металлической заслонкой. В данной работе применялись многослой-

ные Mo/Si-зеркала, оптимизированные на длину волны 13.5 нм. Коэффициенты отражения зеркал составили 60% при общей спектральной полосе пропускания 0.41 нм. Для уменьшения рассеянного света в приборе на входе камеры монохроматора на расстоянии ~ 90 мм от объектива устанавливался свободновисящий Zr/Si-фильтр с параметрами слоев, аналогичными использованным при напылении фильтров на фотодиоды. Рабочая апертура фильтра составляла 30 мм.

Источником излучения служила рентгеновская трубка с кремниевой мишенью, максимум интенсивности L-линии флуоресценции которой приходился на длину волны 13.5 нм [16]. Энергия электронов составляла 7 кэВ, ток пучка был равен 1.5 мА. Регистрируемый ток детектора составлял 0.4 нА, что с учетом квантовой эффективности детектора и пропускания фильтров соответствовало (см. рис.2) ЭУФ мощности излучения зондового пучка 8.2 нВт (4.8×10^8 фотон/с). Диаметр электронного пучка (размер источника) был равен 0.5 мм. С учетом уменьшения можно было ожидать на исследуемом образце пятно диаметром ~ 50 мкм (по уровню 50%). На рис.4 приведен профиль пучка рентгеновского излучения в плоскости образца, полученный пересечением пучка с помощью «ножа» в плоскости, перпендикулярной оптической оси (метод Фуко). Видно, что истинный размер пучка (по уровню 50%) составляет около 54 мкм, что близко к теоретическому значению.

В настоящей работе была изучена относительная чувствительность трех детекторов SPD-100UVZr/Si с нанесенными на поверхность многослойными абсорбционными Zr/Si-фильтрами толщиной ~ 300 нм для выделения рабочей спектральной области вблизи 13.5 нм и подавления длинноволнового фона. Эталонном, по отношению к которому оценивалась чувствительность детектора, являлся фотодиод AXUV-100 без покрытия, прокалиброванный в Метрологическом центре РТВ (Берлин, Германия).

Исследуемые детекторы закреплялись на столе гониометра и затем сканировались в плоскости, перпендикулярной оси пучка, с шагом 0.5 мм. Аналогичная процедура была проделана с диодом AXUV-100. На рис.5 представлены типичные профили чувствительности детекторов SPD-100UVZr/Si и AXUV-100, чувствительность которых в максимуме была принята за единицу, измеренные вдоль линий, параллельных граням детекторов.

Измеренная неоднородность чувствительности (корень квадратный из среднеквадратичного отклонения) в обла-

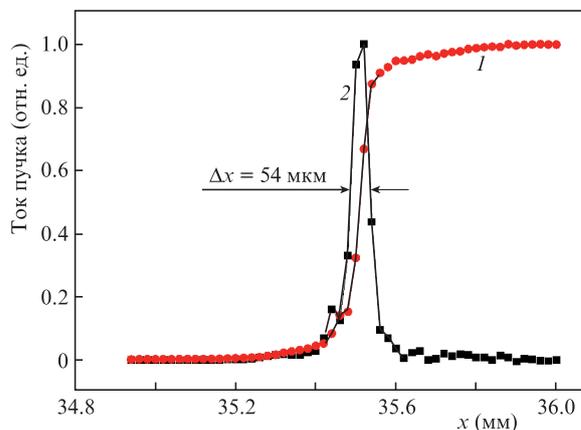


Рис.4. Зависимость тока детектора от положения x «ножа» (1) и распределение интенсивности ЭУФ излучения в пучке (2).

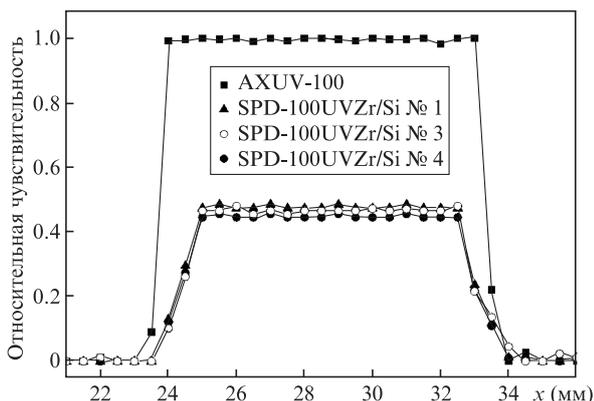


Рис.5. Профили чувствительности детекторов SPD-100UVZr/Si по отношению к чувствительности детектора AXUV-100 в зависимости от координаты x точки поверхности детектора, на которую падает излучение, измеренные вдоль линий, параллельных граням детектора.

ти «плато» составила $\sim 1\%$. При определении чувствительности детекторов по отношению к AXUV-100 для минимизации статистической погрешности экспериментальные данные усреднялись по большой серии измерений.

Относительная чувствительность детекторов S вычислялась по формуле

$$S = \frac{I_{SPD} - I_{SPD}^d}{I_{AXUV} - I_{AXUV}^d}, \quad (1)$$

где I_{SPD} и I_{SPD}^d – ток и темновой ток тестируемого детектора; I_{AXUV} и I_{AXUV}^d – ток и темновой ток «эталонного» детектора. Относительные чувствительности для трех образцов фотодиода SPD-100UVZr/Si (в центре чувствительной поверхности) на длине волны 13.5 нм оказались равными $47.7 \pm 0.1\%$, $46.7 \pm 0.1\%$ и $44.8 \pm 0.1\%$. Расчетное пропускание нанесенных на поверхность детекторов Zr/Si-фильтров на длине волны 13.5 нм составило $\sim 44\%$.

В отличие от AXUV-100, у SPD-100UVZr/Si обнаружены переходные зоны у краев чувствительной площадки, где чувствительность детектора к ЭУФ излучению плавно изменяется от нуля до максимума. Протяженность этих зон составляет ~ 1 мм, тем самым ограничивая апертуру однородной чувствительности детектора областью 8×8 мм. Причина наличия столь широких переходных зон требует дальнейших исследований.

Помимо оценки чувствительности SPD-100UVZr/Si относительно AXUV-100, в Метрологическом центре РТВ были проведены измерения абсолютной чувствительности фотодиодов SPD-100UVZr/Si и SPD-100UV [17]. Один детектор SPD-100UVZr/Si прошел калибровку в диапазоне 50–1900 эВ, три детектора SPD-100UV были прокалиброваны в диапазонах 50–1900, 1750–10000 и 8000–60000 эВ. На основе этих измерений были построены типичные спектральные зависимости чувствительности детекторов SPD-100UV и SPD-100UVZr/Si, приведенные на рис.2.

3.2. Оценка подавления чувствительности детектора к видимому свету

Измерение чувствительности диода в видимом диапазоне спектра проводилось на длине волны 633 нм с помощью He–Ne-лазера. Сигнал с детектора подавался на усилитель на основе операционного усилителя OPA827AP,

коэффициент передачи которого задавался внешним резистором номиналом до 1 ГОм. Предварительно с использованием калиброванных светофильтров была проверена линейность зависимости выходного сигнала от номинала резистора и от интенсивности падающего на детектор лазерного излучения.

На рис.6 приведены профили чувствительности детекторов SPD-100UVZr/Si к излучению с длиной волны 633 нм относительно аналогичного диода SPD-100UV без покрытия. Диаметр лазерного пучка на полувысоте составлял 0.6 мм, сканирование проводилось с шагом 0.7 мм. Поскольку в ходе исследований чувствительность к видимому свету вне рабочей апертуры (10×10 мм) была обнаружена как у детекторов SPD-100UVZr/Si, так и у детектора AXUV-100 (см. ниже), то для адекватной оценки пропускания Zr/Si-фильтра перед исследуемым детектором устанавливался металлический экран с окошком размером 10×10 мм. В центральной части диода средняя относительная чувствительность в видимом диапазоне составила $\sim 2 \times 10^{-6}$ и имела заметную неоднородность по апертуре детектора. Наблюдаемые неоднородности, а также недостаточно большое для пленки толщиной 300 нм подавление видимого света связаны с наличием микропроколов в фильтрующем покрытии. В работе [18] было экспериментально показано, что для аналогичных сводновисящих пленок Zr/Si толщиной 210 нм пропускание видимого света составляло 8×10^{-7} , при этом у пленок отсутствовали сквозные дефекты.

В нашем случае перед нанесением пленок на пластину с уже готовыми фотодиодными структурами пластина подвергалась обработке струей сухого воздуха с целью очистки от пылинок, попавших на поверхность при упаковке, транспортировке и вскрытии контейнера. Выбор «мягкого» способа очистки поверхности связан с толщиной пассивирующего покрытия активной области фотодиода, которая составляет ~ 10 нм. Механическая и химическая очистки поверхности пассивирующего покрытия могут привести к его повреждению и тем самым к необратимому увеличению темнового тока фотодиода, поэтому в данном случае они не применялись. Возможно, процедуры очистки поверхности под струей сухого воздуха недостаточно для удаления всех загрязнений. Таким образом, при обеспечении условий для бездефектного нанесения покрытия можно рассчитывать на существенное улучшение блокирующих свойств фильтра. Тем не менее полученный для фотодиода SPD-100UVZr/Si интегральный коэффи-

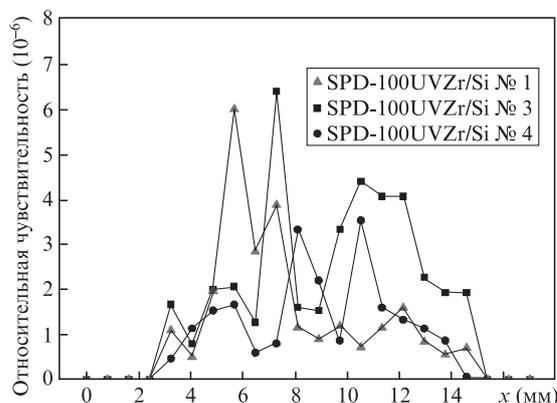


Рис.6. Профили чувствительности детекторов SPD-100UVZr/Si на длине волны 633 нм по отношению к чувствительности аналогичного детектора SPD-100UV.

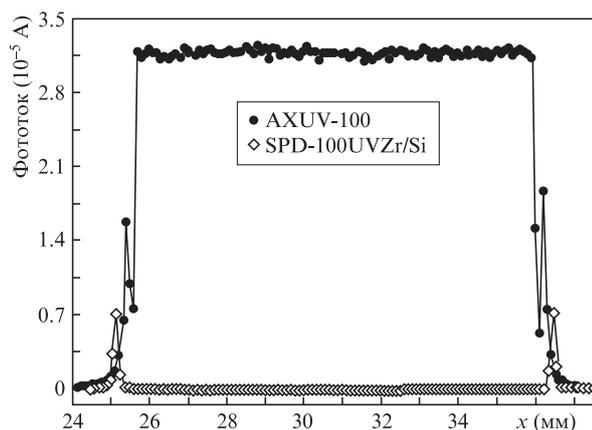


Рис. 7. Профили фототока детекторов SPD-100UVZr/Si и AXUV-100 при сканировании их поверхностей пучком излучения диаметром 50 мкм на длине волны 633 нм.

коэффициент подавления чувствительности к видимому свету $\sim 5 \times 10^5$ не хуже, чем у известных детекторов AXUV-100 с аналогичным Zr/Si-фильтром, и вполне достаточен для большинства применений [5].

Следует отметить существование на поверхности кремниевых детекторов с фильтром и без узкой области, чувствительной к видимому свету. Это связано с тем, что носители заряда генерируются излучением, которое попадает на область, прилегающую к внешней границе p–p-перехода (в случае AXUV-100) и к внешней границе токо-съемного электрода (в случае SPD-100UVZr/Si). На рис. 7 приведен результат сканирования поверхностей AXUV-100 и SPD-100UVZr/Si лазерным пучком на длине волны 633 нм. Диаметр пучка был ~ 50 мкм, сканирование проводилось с шагом 100 мкм, включая периферию активной области. Площадь чувствительной к видимому свету области составляет $\sim 1\%$ от общей поверхности фотодиода, таким образом, без использования специальных диафрагм коэффициент подавления чувствительности детектора к видимому излучению ограничен величиной 10^{-2} . Этот эффект показывает необходимость применения качественных коллиматоров и диафрагм при использовании кремниевых детекторов с фильтрами в ЭУФ области спектра.

4. Обсуждение результатов

Основным результатом работы является создание технологии изготовления узкополосных кремниевых фотодиодов для регистрации мягкого рентгеновского и ЭУФ излучений, а также определение спектральных свойств этих фотодиодов. По основным техническим характеристикам, таким как квантовая эффективность, величина темнового тока, уровень подавления видимого света, радиационная стойкость, эти p–n-детекторы не уступают аналогичным приборам на основе p–p-структур. Используя разработанную технологию и другие покрытия, можно оптимизировать полосу чувствительности детекторов для решения конкретных задач. В итоге появился альтернативный вариант детектора ЭУФ излучения с подавлением длинноволнового фона, обладающий большей радиационной стойкостью к этому излучению [8].

Дальнейшее совершенствование детекторов рассматриваемого типа включает, в первую очередь, поиск путей уменьшения ширины области с пониженной чувствительностью к коротковолновому излучению у краев чув-

ствительной зоны. Кроме того, улучшением однородности фильтрующих пленок, по всей видимости, можно добиться дополнительного подавления чувствительности детектора к видимому излучению. Однако уже на данном этапе достигнутый уровень пропускания видимого света (2×10^{-6}) меньше, чем у AXUV-100 с аналогичным Zr/Si-покрытием (10^{-5}) [5]. Достигнуто подавление чувствительности к красному свету ($\lambda = 633$ нм) в центральной области чувствительной зоны фотодиодов более чем на пять порядков. Показано, что с определенными ограничениями по апертуре данные детекторы могут успешно использоваться в научных и технических приложениях, требующих высокоселективной чувствительности фотоприемников в ЭУФ области.

Важным результатом работы стало создание светосильного лабораторного стенда для измерения профиля чувствительности детекторов с пространственным разрешением лучше 100 мкм. В настоящей работе источником рентгеновского излучения служила рентгеновская трубка с кремниевым анодом, мощностью электронного пучка на уровне 10 Вт и эффективностью конверсии энергии электронов в ЭУФ излучение в спектральной полосе монохроматора в телесном угле 2π ср на уровне 3×10^{-6} . В случае оснащения рефлектометра лазерно-плазменным источником (ЛПИ) излучения можно существенно, на несколько порядков, увеличить мощность зондирующего ЭУФ пучка. Так как размер ЛПИ излучения составляет десятки микрометров, то объектив Шварцшильда можно использовать в обратной геометрии и работать с увеличением, что автоматически приведет к увеличению мощности ЭУФ пучка на два порядка. Оценки с учетом данных о спектральной плотности мощности излучения [19] и эффективности отражения зеркал [11] для коммерчески доступного Nd:YAG-лазера с энергией в импульсе 500 мДж и частотой их следования 10 Гц показывают, что в спектральной полосе монохроматора в окрестности длины волны 13.5 нм можно получить на образце поток фотонов $\sim 10^{13}$ фотон/с. При размере зондового пучка на исследуемом образце 300 мкм и характерной длине поглощения кремния ~ 1 мкм поглощенная доза составит 10^8 рад/с. Например, для обеспечения дозы 6×10^{10} рад, при которой наблюдалась деградация чувствительности полупроводниковых детекторов [8], в нашем случае потребуется время экспозиции около 10 мин. Таким образом, разработанный прибор, оснащенный лазерно-плазменным источником, позволит изучать радиационную стойкость большого класса материалов, в том числе и полупроводниковых детекторов. В настоящее время ведется разработка такого источника.

В заключение необходимо отметить еще один важный результат, который, по данным авторов, никем ранее количественно не демонстрировался, — наличие узкой, менее 100 мкм, области вне рабочей апертуры детекторов, чувствительной к видимому свету и обнаруженной как у SPD-100UVZr/Si, так и у AXUV-100. Данный эффект надо учитывать при проектировании систем регистрации ЭУФ излучения на основе кремниевых детекторов с интегрированными фильтрами в активной области.

Работа поддержана РФФИ (гранты № 09-02-00912, 10-02-00935, 10-08-00837, 11-02-00597, 11-02-00589, 11-02-00961, 11-02-97109), ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 годы» при частичной поддержке Северо-Западного ЦКП «Материаловедение и диагностика в передовых технологиях»

(госконтракт № 16.552.11.7002) и Минобрнауки РФ (госконтракт № 16.552.11.7007).

1. Wagner Ch., Harned N. *Nature Photon.*, **4**, 24 (2010).
2. Басов Н. Г., ахаренков Ю.А., Рупасов А.А., Склизков Г.В., Шиканов А.С. *Диагностика плотной плазмы* (М.: Наука, 1989).
3. Kirz J., Jacobsen C., Howells M. *Q. Rev. Biophys.*, **28**, 33 (1995).
4. Мандельштам С.Л., Тиндо И.П., Воронько Ю.К. *Исследование рентгеновского излучения Солнца. I: Измерения при помощи геофизических ракет. Искусственные спутники Земли* (М.: Изд-во АН СССР, Вып. 10, 1961).
5. Seely J.F., Korde R., Hanser F., Wise J., Holland G.E., Weaver J., Rife J.C.. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **3764**, 103 (1999).
6. Aruev P.N., Zabrodskaia N.V., Zabrodsky V.V., Suhanov V.L. *Proc. IWRFR12000* (St.Petersburg, Russia, p. 52).
7. Scholze F., Klein R., Müller R. *Metrologia*, **43**, S6 (2006).
8. Aruev P.N., Kolokolnikov Yu.M., Kovalenko N.V., Legkodymov A.A., Lyakh V.V., Nikolenko A.D., Pindyurin V.F., Sukhanov V.L., Zabrodsky V.V. *Nucl. Instrum. Meth. A*, **603**, 58 (2009).
9. Bibishkin M.S., Chkhalo N.I., Gusev S.A., Kluev E.B., Lopatin A.Y., Luchin V.I., Pestov A.E., Salashchenko N.N., Shmaenok L.A., Tsybin N.N., Zuev S.Y. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **7025**, 702502 (2008).
10. Водопьянов А.В., Голубев С.В., Мансфельд Д.А., Николаев А.Г., Савкин К.П., Салашенко Н.Н., Чхало Н.И., Юшков Г.Ю. *Письма в ЖЭТФ*, **88**, 103 (2008).
11. Andreev S.S., Akhsakhalyan A.D., Bibishkin M.S., Chkhalo N.I., Gaponov S.V., Gusev S.A., Kluev E.B., Prokhorov K.A., Salashchenko N.N., Schafers F., Zuev S.Yu.. *Centr. Europ. J. Phys.*, **1**, 191 (2003).
12. Бибишкин М.С., Забродин И.Г., Касьяков И.А., Клюенков Е.Б., Пестов А.Е., Салашенко Н.Н., Чехонадских Д.П., Чхало Н.И., Шмаенок Л.А. *Изв. РАН. Сер. физич.*, **68** (4), 560 (2004).
13. Бибишкин М.С., Вайнер Ю.А., Пестов А.Е., Прохоров К.А., Салашенко Н.Н., Фраерман А.А., Чхало Н.И. *Изв. РАН. Сер. физич.*, **69** (2), 199 (2005).
14. Виноградов А.В., Зельдович Б.Я. *Оптика и спектроскопия*, **42** (4), 709 (1977).
15. Kozhevnikov I.V., Bukreeva I.N., Ziegler E. *Nucl. Instrum. Meth. A*, **460**, 424 (2001).
16. Бибишкин М.С., Забродин И.Г., Клюенков Е.Б., Салашенко Н.Н., Чехонадских Д.П., Чхало Н.И. *Поверхность*, **2**, 41 (2003).
17. Gottwald A., Kroth U., Krumrey M., Richter M., Scholze F., Ulm G. *Metrologia*, **43**, S125 (2006).
18. Володин Б.А., Гусев С.А., Дроздов М.Н., Зуев С.Ю., Клюенков Е.Б., Лопатин А.Я., Лучин В.И., Пестов А.Е., Салашенко Н.Н., Цыбин Н.Н., Чхало Н.И. *Изв. РАН. Сер. физич.*, **74** (1), 53 (2010).
19. Loyer L., Boettger T., Braun S., Mai H., Leson A., Scholze F., Tuemmler J., Ulm G., Legall H., Nickles P.V., Sandner W., Stiel H., Rempel C.E., Schulze M., Brutscher J., Maccio F., Muellender S. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **5038**, 12 (2003).