

Восстановление фотоответа кремниевых фотодиодов после облучения в вакуумном ультрафиолете

© В.В. Забродский^{*†}, П.Н. Аруев^{*+}, В.П. Белик^{*}, Б.Я. Бер^{*}, Д.Ю. Казанцев^{*}, М.В. Дроздова^{*},
Н.В. Забродская^{*}, М.С. Лазеева^{*}, А.Д. Николенко^{*}, В.Л. Суханов^{*}, В.В. Филимонов^{*}, Е.В. Шерстнев^{*}

^{*} Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

⁺ Санкт-Петербургский государственный политехнический университет,
195251 Санкт-Петербург, Россия

^{*} Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук,
630090 Новосибирск, Россия

(Получена 17 июля 2012 г. Принята к печати 20 июля 2012 г.)

Проведено исследование пространственной однородности фотоответа кремниевых фотодиодов на основе p - n - и n - p -переходов через год после облучения на длине волны 121.6 нм, а также n - p -переходов через четыре года после облучения в области мягкого рентгена. Показано, что исследуемые кремниевые фотодиоды на основе p - n -переходов демонстрируют эффект восстановления фотоответа после облучения на длине волны 121.6 нм. У кремниевых фотодиодов на основе n - p -структур эффект восстановления фотоответа не был обнаружен.

1. Введение

Потребность в детекторах вакуумного ультрафиолета (ВУФ), экстремального ультрафиолета (ЭУФ) и мягкого рентгеновского излучения (МРИ) обусловлена развитием литографии, астрофизики и исследованиями в области физики плазмы. Кремниевые фотодиоды используются в качестве детекторов как вторичные стандарты чувствительности для диапазонов ВУФ, ЭУФ и МРИ. Для метрологического применения фотодиодов важно знать их чувствительность, а также стойкость фотодиодов к воздействию излучения. Абсолютная калибровка фотодиодов проводится в метрологических центрах, где в качестве источника излучения используется синхротронное излучение, а первичным эталоном служат криогенные болометры [1–3].

Кремниевые фотодиоды значительно проще в использовании, чем криогенные болометры, и позволяют проводить измерения в широком спектральном диапазоне излучений от ближнего инфракрасного диапазона до рентгена. Однако при длительном облучении высокоэнергетичными квантами у фотодиодов наблюдается значительное изменение квантовой эффективности, которое вызвано генерацией дефектов под действием излучения в активной области детектора [4].

В данной работе представлено сравнение пространственной однородности фотоответа двух вариантов кремниевых фотодиодов, выполненных на подложках противоположного типа проводимости.

Исследованные n - p -фотодиоды обладали „мертвым“ слоем из диоксида и оксинитрида кремния [5]. Термин „мертвый“ слой связан с ядерной физикой, под „мертвым“ слоем принято считать поверхностный слой активной области детектора, который поглощает часть энергии регистрируемых излучения или частиц, но не дает вклад в фототок.

В более ранних работах [6] коллективом ФТИ им. А.Ф. Иоффе было показано влияние толщины „мертвого“ слоя на предельное энергетическое разрешение детекторов короткопробежных частиц на основе p - n -структуры и сделана оценка толщины „мертвого“ слоя, которая составила величину 20 нм. Дальнейшее развитие технологии изготовления p - n -фотодиодов в ФТИ им. А.Ф. Иоффе было направлено на уменьшение толщины мертвого слоя. Современные методики исследования позволили более точно оценить параметры перехода представленных в данной работе p - n -фотодиодов, „мертвый“ слой которых состоит преимущественно из компаунда бор–кремний. Глубина залегания перехода составляет 30 нм (включая „мертвый“ слой) при поверхностной концентрации бора $N_A > 10^{22} \text{ см}^{-3}$ [7,8].

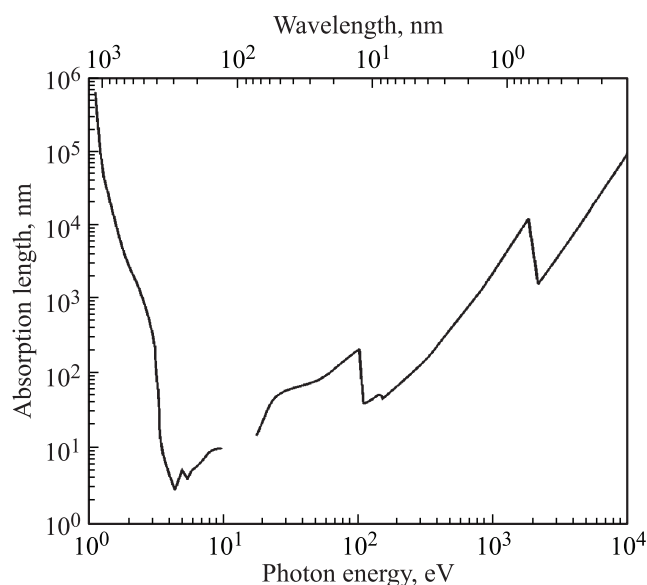


Рис. 1. Спектральная зависимость коэффициента поглощения в кремнии.

[†] E-mail: sildet@mail.ioffe.ru

Требование к минимальной толщине „мертвого слоя“ связано с минимальной глубиной поглощения ВУФ излучения. На рис. 1 представлена спектральная зависимость коэффициента поглощения в кремнии [9]. Толщина „мертвого“ слоя исследованных $p-n$ - и $n-p$ -фотодиодов оценивалась в пределах 10 нм, что подтверждается уровнем чувствительности исследуемых фотодиодов на длине волны 121.6 нм, которая соответствует энергии квантов 10.2 эВ [10].

2. Экспериментальные результаты

В ранее опубликованных работах проводились сравнительные тесты фотодиодов на основе $p-n$ - и $n-p$ -структур [10,11]. Следует отметить, что в представленной работе исследовались свойства тех же самых фотодиодов, что и в работах [10,11]. Все фотодиоды хранились в обычных лабораторных условиях, без применения специальных мер, таких как вакуум, инертная или сухая атмосфера.

2.1. Исследования на длине волны 121.6 нм

В работе [10] $n-p$ -фотодиод с „мертвым“ слоем из оксинитрида кремния, а также $p-n$ -фотодиод с „мертвым“ слоем, состоящим преимущественно из компаунда бор–кремний, подвергались сканированию поверхности пучком ВУФ до и после облучения ВУФ на длине волны 121.6 нм. Результат измерения фототовета в зависимости от координаты x активной области показан на рис. 2.

В рамках представленной работы на длине волны 121.6 нм было проведено сканирование поверхности фотодиодов, облученных в работе [10]. Сканирование проводилось на установке, описанной в работе [10]. Размер пучка составлял 1×1 мм. Результат сканирования приведен на рис. 3. Видно, что для фотодиода на основе $p-n$ -перехода следов облучения не наблюдается после 17 месяцев хранения. В случае фотодиода на основе $n-p$ -перехода поврежденная зона облучения заметна после 11 месяцев хранения.

3. Исследования в мягком рентгене

В работе [11] $n-p$ -фотодиод с „мертвым“ слоем из диоксида кремния, а также $p-n$ -фотодиод с „мертвым“ слоем, состоящим преимущественно из компаунда бор–кремний, подвергались облучению мягким рентгеновским излучением (МРИ). Для обоих фотодиодов проводилось сканирование поверхности до и после облучения. Фотодиод на основе $p-n$ -перехода набрал поглощенную дозу МРИ 75.5 Дж/см². Следов деградации фотодиода на основе $p-n$ -структуры не было обнаружено, поэтому он не исследовался в представленной работе. Фотодиод на основе $n-p$ -перехода деградировал примерно на 70%, накопленная доза составила 3.5 Дж/см². В рамках представленной работы

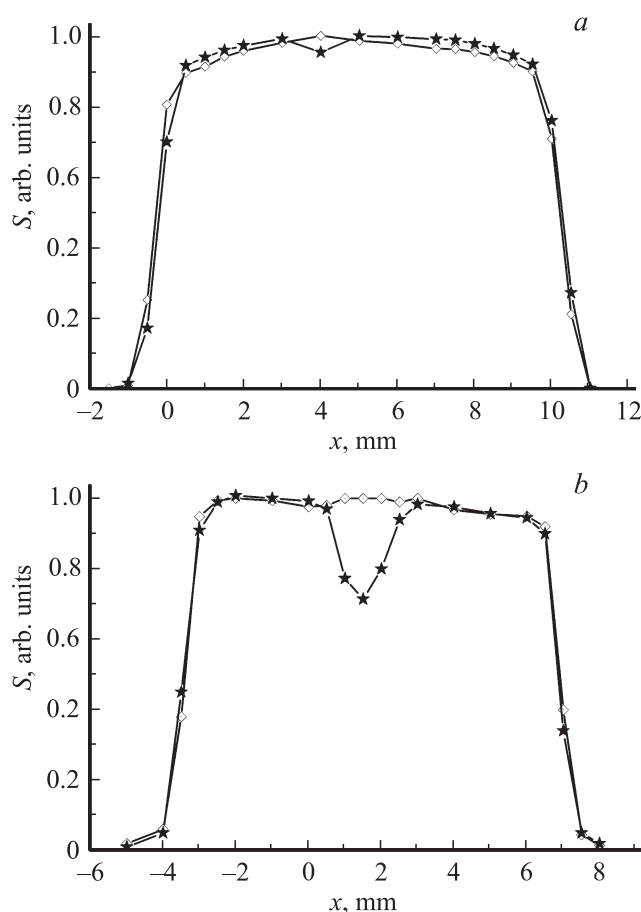


Рис. 2. Зависимости от координаты x фототовета S фотодиодов: a — $p-n$, b — $n-p$. \diamond — до облучения, \star — после облучения [10].

было проведено повторное сканирование поверхности на длине волны 6.05 нм (энергия кванта 205 эВ) только для $n-p$ -фотодиода после 49 месяцев его хранения. Методика сканирования была аналогична примененной в работе [11]. Результаты сканирования поверхности $n-p$ -фотодиода, полученные в рамках работы [11], и результат сканирования того же самого фотодиода после 49 месяцев хранения представлены на рис. 4. Из экспериментальных данных на рис. 4 видно, что явных признаков восстановления $n-p$ -фотодиода с „мертвым“ слоем из диоксида кремния не наблюдается.

4. Обсуждение результатов

В результате проведенных исследований зафиксирован факт восстановления фототовета $p-n$ -фотодиода с „мертвым“ слоем на основе компаунда бор–кремний, ранее облученного в ВУФ. После 11 месяцев хранения этого фотодиода в обычных условиях не удалось обнаружить поврежденную зону активной области при сканировании фотодиода на длине волны 121.6 нм. За 17 месяцев хранения в обычных условиях область $p-n$ -фотодиода, поврежденная в ВУФ диапазоне на 5%

от исходного уровня фотоответа, восстановила свой уровень фотоответа.

В случае $n-p$ -фотодиода с „мертвым“ слоем на основе оксинитрида, хранившегося в аналогичных условиях, не удалось обнаружить заметного восстановления области, ранее облученной в ВУФ. Уровень потери фотоответа порядка 28% в поврежденной зоне не изменился за время хранения.

Для $n-p$ -фотодиода с „мертвым“ слоем на основе диоксида кремния [11] не было обнаружено значительного эффекта восстановления после облучения в МРИ даже после 49 месяцев хранения в обычных условиях.

Факт восстановления фотоответа $p-n$ -фотодиода требует дополнительных исследований. Необходимо обеспечить значительно большую поглощенную дозу в ВУФ

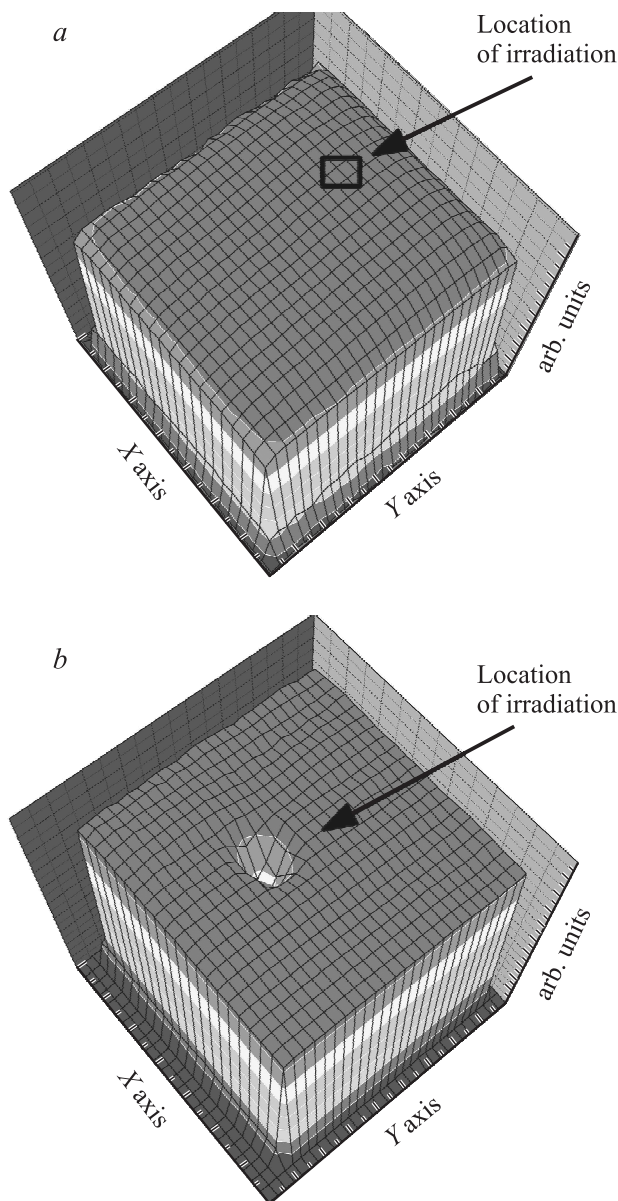


Рис. 3. Однородность фотоответа фотодиодов на длине волны 121.6 нм: *a* — $p-n$, 17 месяцев после облучения, *b* — $n-p$, 11 месяцев после облучения.

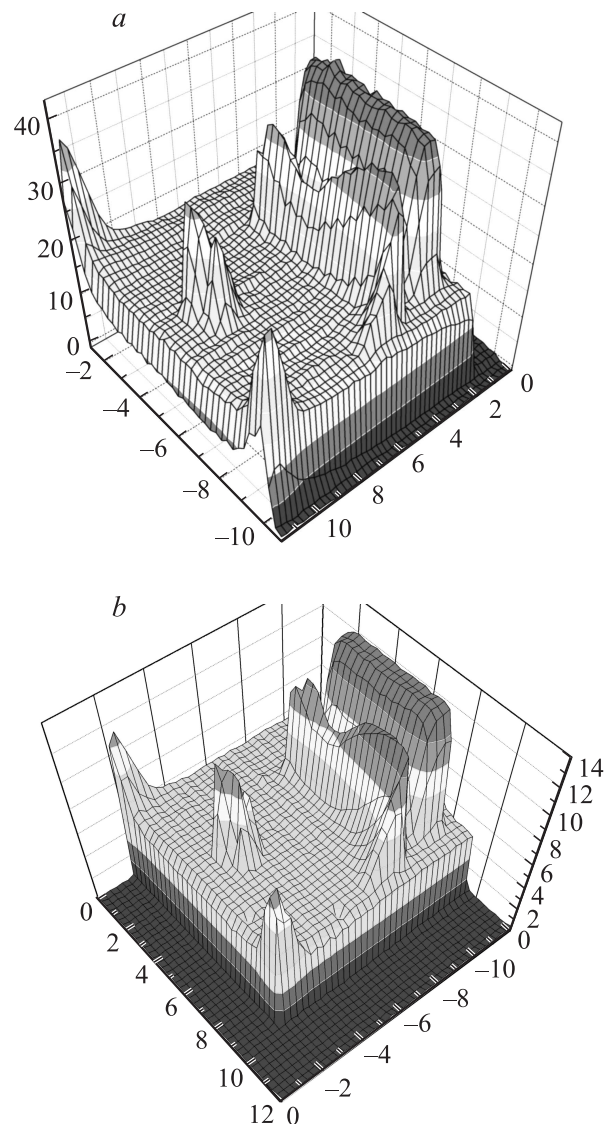


Рис. 4. Однородность фотоответа фотодиодов на длине волны 6.05 нм (энергия кванта 205 эВ): *a* — $n-p$ -фотодиод после облучения в рамках работы [11], *b* — $n-p$ -фотодиод после 49 месяцев хранения.

и МРИ, чтобы уровень потери фотоответа $p-n$ -фотодиода после облучения составил величину порядка 20%. Кроме того, необходимо увеличить количество исследуемых $p-n$ -фотодиодов с „мертвым“ слоем на основе компаунда бор-кремний.

5. Заключение

Таким образом, в настоящей работе исследованы изменения пространственной однородности фотоответа ранее облученных кремниевых фотодиодов в области ВУФ и МРИ. После продолжительного периода хранения фотодиодов в обычных лабораторных условиях обнаружен эффект восстановления фотоответа $p-n$ -фотодиода, облученного на длине волны 121.6 нм. Фотодиоды на

основе $n-p$ -переходов не проявили признаков восстановления.

На наш взгляд, главным отличием поведения исследованного $p-n$ -фотодиода является принципиально иной подход к формированию „мертвого“ слоя. По-видимому, компаунд бор–кремний более стоек к воздействию ВУФ и МРИ, так как в нем минимизировано количество связей кремний–кислород.

Другая группа исследователей наблюдала в ВУФ эффект восстановления отклика фотодиода на основе $p-n$ -структуры, который также был выполнен с использованием компаунда бор–кремний [12].

Авторы благодарны Л.А. Шмаенку (ФТИ им. А.Ф. Иоффе) за помощь в организации исследования фотодиодов в области ВУФ.

Работа поддержана Министерством образования и науки Российской Федерации (договор 11.G34.31.0001 с СПбГПУ и ведущим ученым Г.Г. Павловым), грантами РФФИ № 10-02-00935а, 10-08-00837а и при частичной поддержке Северо-Западным ЦКП „Материаловедение и диагностика в передовых технологиях“ (госконтракт № 16.552.11.7002 Министерства образования и науки России).

Двумерное сканирование фотодиодов проводилось при использовании оборудования ЦКП „Сибирский центр синхротронного и терагерцового излучения“ и финансовой поддержке Министерства образования и науки России.

Список литературы

- [1] A. Gottwald, U. Kroth, M. Richter, H. Schöppe, G. Ulm. Meas. Sci. Technol., **21**, 125 101 (2010).
- [2] F. Scholze, J. Tummmler, G. Ulm. Metrologia, **40**, 224 (2003).
- [3] M. Gerlach, M. Krumrey, L. Cibik, P.Muller, H. Rabus, G. Ulm. Metrologia, **45**, 577 (2008).
- [4] E.M. Gullikson, R. Korde, L.R. Carifield, R.E. Vest. J. Electron Spectroscopy and Relat. Phenomena, **80**, 313 (1996).
- [5] R. Korde, J.S. Cable, L.R. Canfield. IEEE Trans. Nucl. Sci., **40** (12), 1655 (1993).
- [6] Е.М. Вербицкая. Письма ЖТФ, **12**, 1254 (1986).
- [7] Ю.А. Гольдберг, В.В. Забродский, О.И. Оболенский, Т.В. Петелина, В.Л. Суханов. ФТП, **33**, 343 (1999).
- [8] V.V. Zabrodsky, P.N. Aruev, V.L. Sukhanov, N.V. Zabrodskaya, B.J. Ber, D.Yu. Kasantsev, A.G. Alekseyev. Proc. 9th ISMTII (St.Petersburg, 2009) p. 3-243.
- [9] M. Razeghi, A. Rogalski. J. Appl. Phys., **79** (10), (1996).
- [10] В.В. Забродский, В.П. Белик, П.Н. Аруев, Б.Я. Бер, С.В. Бабашев, М.В. Петренко, В.Л. Суханов. Письма ЖТФ, **38** (17), 69 (2012).
- [11] P.N. Aruev, Yu.M. Kolokolnikov, N.V. Kovalenko et al. Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A, **603**, 58 (2009).
- [12] L. Shi, S. Nihtianov, F. Scholze, A. Gottwald, L.K. Nanver. Proc. SPIE, **8145**, 81450N (2011).

Редактор Л.В. Беляков

Response recovery of the silicon photodiodes after VUV irradiation

V.V. Zabrodskiy^{*,+}, P.N. Aruev^{*,+}, V.P. Belik^{*},
B.Ya. Ber^{*}, D.Yu. Kazantsev^{*}, M.V. Drozdova^{*},
N.V. Zabrodskaya^{*}, M.S. Lazeeva^{*}, A.D. Nikolenko[•],
V.L. Sukhanov^{*}, V.V. Filimonov^{*}, E.V. Sherstnev^{*}

^{*} Ioffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia

⁺ St. Petersburg State Polytechnical University,
195251 St. Petersburg, Russia

[•] Budker Institute of Nuclear Physics,
Russian Academy of Sciences, Siberian Branch,
630090 Novosibirsk, Russia

Abstract Studies of detector response spatial profile for silicon photodiodes based on $n-p$ - and $p-n$ -junctions exposed to VUV irradiation at 121.6 nm wavelength after one year of irradiation and also photodiodes after four years of irradiation in VUV region has been performed. It has been shown, that $p-n$ -photodiodes demonstrate a significant recovery phenomenon of the response in the exposed area. For the $n-p$ -photodiodes that phenomenon has not been found.