

06;12

Исследование стабильности кремниевых фотодиодов в вакуумном ультрафиолете

© В.В. Забродский, В.П. Белик, П.Н. Аруев, Б.Я. Бер,
С.В. Бобашев, М.В. Петренко, В.Л. Суханов

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
E-mail: sildet@mail.ioffe.ru, m.petrenko@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 16 апреля 2012 г.

Проведено испытание кремниевых фотодиодов на стойкость к вакуумному ультрафиолетовому (ВУФ) излучению на длине волны 121.6 nm. Показано, что исследуемые фотодиоды, на основе $p-n$ - и $n-p$ -структур, обнаруживают деградацию чувствительности на уровне десятков процентов при дозах ВУФ-излучения порядка десятков mJ/cm^2 . Наблюдался эффект обратимой релаксации фототока детекторов на основе $n-p$ -структур.

Для освоения области вакуумного ультрафиолета (ВУФ) с энергией фотонов $\sim (10-100)$ eV требуются детекторы, обладающие одновременно низкими шумами, а также высокой чувствительностью и стойкостью к ВУФ. В качестве таких детекторов широко известны кремниевые $n-p$ -фотодиоды. В работе [1] были представлены результаты исследования стойкости таких $n-p$ -фотодиодов на длине волны 121.6 nm. Сравнение с противоположными по структуре $p-n$ -фотодиодами, а также с кремниевыми фотодиодами на основе барьера Шотки было выполнено в работе [2] и показало существенное преимущество $n-p$ -фотодиодов над $p-n$ -фотодиодами на длине волны 150 nm. Однако существуют другие варианты $p-n$ -фотодиодов, созданные на основе $p-n$ -структуры [3-6], которые не рассматривались в работе [2]. Данная работа имеет целью сравнение оптических свойств кремниевых $n-p$ - [1,2] и $p-n$ - [3-6] фотодиодов, на длине волны 121.6 nm.

В данной работе в качестве детекторов ВУФ-излучения использовались два типа кремниевых фотодиодов: $n-p$ -фотодиоды [1,2] и $p-n$ -фотодиод [3-6]. Следует отметить, что кроме противоположности по структуре планарного $p-n$ -перехода исследуемые фотодиоды обладают различным материалом „входного окна“ фотодиода, что, на наш взгляд, является одним из факторов, определяющих свойства фотодиода в

области ВУФ. „Входное окно“ частично отражает падающее излучение, пропускает излучение в структуру фотодиода, кроме того, оно поглощает часть излучения. Носители заряда, рожденные поглощенным светом или частицами во „входном окне“, рекомбинируют в „мертвом слое“ и не дают вклад в фототок. Как правило, материалом „входного окна“ является диэлектрик, который играет роль просветляющего и пассивирующего покрытия. Если для исследуемых $n-p$ -фотодиодов материалом „входного окна“ является оксинитрид [1], то в случае $p-n$ -фотодиодов „входное окно“ представляет собой компаунд, состоящий в основном из бора и кремния. Поверхностная концентрация бора для исследуемого $p-n$ -фотодиода составляет больше чем $5 \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ при глубине залегания p -области порядка 30 nm [3,7].

Глубина поглощения ВУФ-излучения в кремнии лежит в диапазоне от единиц до десятков nm, что накладывает физическое ограничение на толщину „мертвого слоя“, которая не должна превышать 10 nm. В противном случае чувствительность детектора в ВУФ-диапазоне будет низкой. Возникающие под воздействием излучения радиационные дефекты могут приводить к изменению чувствительности фотодиодов [8,9]. Более того, в области мягкого рентгеновского излучения обнаружены эффекты значительной деградации (до 70% от исходного уровня) и восстановления чувствительности фотодиодов в областях, которые прилегают к облучаемой области, но сами не подвергаются воздействию излучения [6].

Толщины поверхностного пассивирующего покрытия у исследуемых детекторов составляли величину порядка 10 nm. Все исследованные в представленной работе фотодиоды обладали активной областью с площадью 1 cm^2 и имели геометрию активной области $10 \times 10 \text{ mm}$. Темновые токи фотодиодов были ниже 1 nA при обратном смещении 10 mV.

Источником ВУФ-излучения служила водородная лампа ВМФ-25 с выходным окном из MgF_2 . Требуемая длина волны (121.6 nm, линия L_α водорода) выделялась с помощью вакуумного монохроматора, построенного по схеме Сейя–Намиока. Наблюдения показали, что через 15–20 min после включения, на длине волны 121.6 nm, лампа была достаточно стабильна и теряла интенсивность на уровне единиц процентов за час работы. Такая стабильность лампы была достаточна для проведения эксперимента. Контроль стабильности излучения лампы проводился с помощью периодического кратковременного облучения

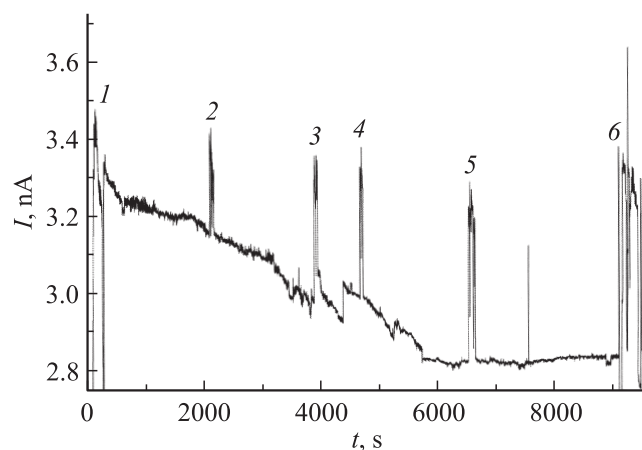


Рис. 1. Зависимость фототока от времени при облучении фотодиода ($n-p(2)$) излучением с длиной волны 121.6 нм. Цифрами 1–6 показаны моменты контроля излучения лампы.

активной области исследуемого фотодиода. Контрольная зона активной области фотодиода находилась на расстоянии не меньше 3 мм от облучаемой зоны и не подвергалась длительному воздействию ВУФ-излучения. На рис. 1 приведен пример записи процесса облучения фотодиода с контролем излучения лампы. Исходя из информации о временной стабильности лампы и чувствительности фотодиода, производилась оценка накопленной дозы ВУФ-излучения.

Как уже отмечалось выше, измерения проводились на вакуумном монохроматоре Сейя–Намиока с источником излучения водородной лампой, расположенной в плоскости входной щели, и исследуемым фотодиодом за выходной щелью. Роль входной щели играло световое пятно от лампы, вырезаемое круглой диафрагмой 2.5 мм и расположенное в плоскости входной щели. Система ловушек рассеянного света и излучения нулевого порядка по всему тракту излучения внутри спектрального прибора позволила снизить уровень фонового излучения до уровня шумов системы регистрации фототока.

Монохроматор оснащен тороидальной дифракционной решеткой с количеством штрихов 1200 mm^{-1} , меридиональным радиусом кривиз-

ны $R_M = 50$ см и сагиттальным радиусом $R_S = 33$ см, что устраняло астигматизм в изображении источника (в плоскости выходной щели) и соответственно существенно увеличивало поток излучения через выходную щель (по сравнению со сферической решеткой). Обратная линейная дисперсия прибора составляла $\sim 8.7 \text{ \AA}/\text{mm}$. Выходная щель размером 0.5 (ширина) $\times 0.6$ мм формировала на фотодиоде, отстоящем от выходной щели на 10 мм, участок засветки размером 1.5×1.5 мм со спектральной шириной (с учетом ширин выходной щели и входной диафрагмы) $\sim 22 \text{ \AA}$.

Перемещение фотодиода относительно светового пучка осуществлялось с помощью специального двухкоординатного ручного манипулятора, соединенного с корпусом выходной щели монохроматора сильнофонной развязкой. Диапазон перемещения по обеим координатам составлял 14 мм с точностью 0.1 мм. Для откачки монохроматора использовался безмасляный насос GVSP 30 корпорации Edwards, уровень вакуума был не хуже $1 \cdot 10^{-2}$ mbar.

Фототок диода регистрировался малогабаритным измерителем на основе электрометрического преобразователя сигналов, аналогичного примененному в работе [10]. Использованный в работе измеритель постоянного тока предназначен для регистрации тока одной полярности. Поэтому в случае $n-p$ -фотодиодов активная n -область была заземлена и сигнал шел с базы фотодиода, у $p-n$ -фотодиода была заземлена база фотодиода и сигнал регистрировался из активной p -области. Шум системы регистрации фототока находился на уровне $1 \cdot 10^{-12}$ А. Время регистрации текущего значения фототока составляло $0.3-1$ с.

Для оценки чувствительности исследуемых детекторов в качестве переносного стандарта чувствительности использовался $p-n$ -фотодиод [7], калиброванный в немецком институте метрологии РТВ (Берлин) [11]. Объектами исследования были два $n-p$ -фотодиода и один $p-n$ -фотодиод. Следует отметить, что фотодиод $n-p(1)$ использовался около 3 лет в лабораторных установках, фотодиоды $n-p(2)$ и $p-n$ были новыми и не использовались в других экспериментах. Фотодиоды хранились на воздухе в обычных лабораторных условиях: фотодиод $n-p(2)$ хранился в лаборатории 1 месяц с момента доставки до момента облучения, фотодиод $p-n$ хранился 1 год с момента изготовления до момента облучения.

В таблице приведены результаты следующих измерений: S — чувствительности исследуемых детекторов к излучению с длиной волны

Результаты измерений параметров исследуемых фотодиодов

Параметры	$p-n$	$n-p(1)$	$n-p(2)$
S , A/W	0.05	0.08	0.1
P , mJ/cm ²	17	13	43
ΔS , %	5	30	28

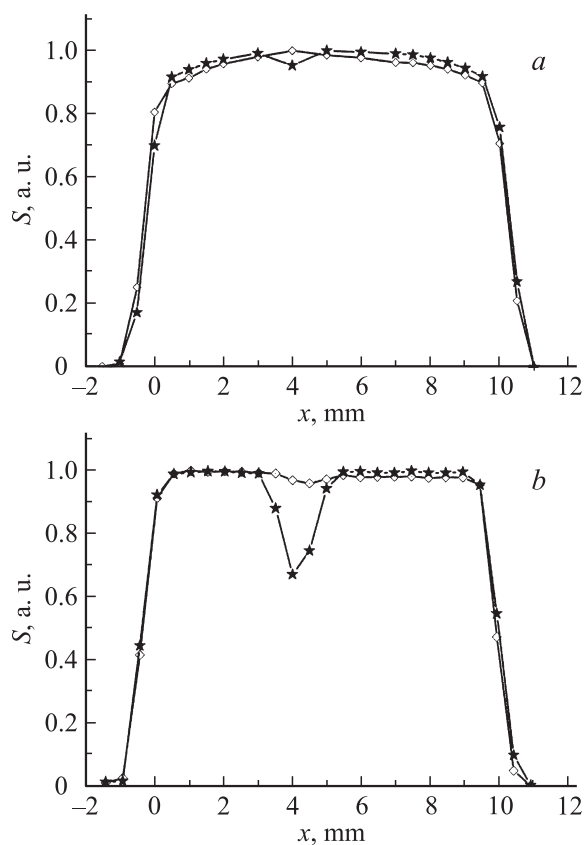


Рис. 2. Зависимости чувствительности фотодиодов (a — $p-n$, b — $n-p(1)$, c — $n-p(2)$) от координаты: \diamond — до облучения, \star — после облучения.

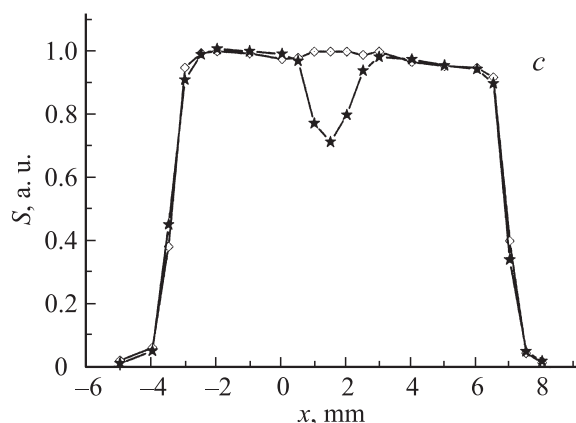


Рис. 2 (продолжение).

121.6 nm, P — дозы облучения и величины ΔS , которая характеризует потерю чувствительности в зоне облучения. Время облучения фотодиодов составляло от 3 до 6 h, зона облучения находилась в центральной области фотодиодов, ее размер — 1.5×1.5 mm. Проведено измерение зависимости чувствительности фотодиодов от координаты облучаемой области, положение которой изменялось при перемещении фотодиодов относительно пучка ВУФ-излучения. Значения фототока для каждой точки фиксировались после экспозиции 10 s. На рис. 2 приведены зависимости чувствительности фотодиодов от координаты до и после облучения (см. таблицу).

На рис. 3 показаны характерные примеры непрерывной записи фототока при перемещении фотодиодов относительно пучка ВУФ. В данном исследовании при непрерывной записи фототока пятно ВУФ-излучения размером 1×1 mm перемещалось на 0.5 mm. Всего за время измерения для представленных на рис. 3 примеров было пройдено по поверхности каждого фотодиода расстояние 10 mm без захвата облученной области. Время регистрации текущего значения фототока составляло 1 s, что было обусловлено ограничением плотности потока излучения. В случае n - p -фотодиодов момент перемещения фотодиода относительно пучка ВУФ-излучения совпадал с резким скачком текущего значения фототока и последующим спадом в течение нескольких секунд до его среднего

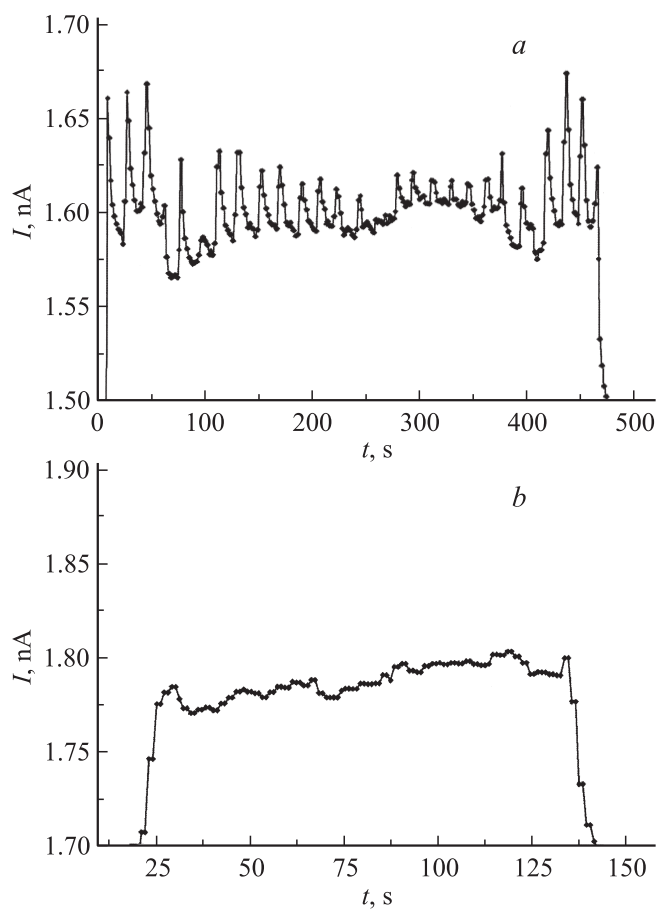


Рис. 3. Непрерывная запись фототока во времени при перемещении фотодиода относительно пучка ВУФ: a — $n-p(2)$, b — $p-n$.

стационарного значения. Время на перемещение фотодиода составляло порядка 1 с.

Из экспериментальных данных видно, что исследованные фотодиоды на основе $p-n$ - и $n-p$ -структур обладают близкими свойствами по стойкости к ВУФ-излучению и уровню чувствительности на длине

волны 121.6 nm. Следует отметить, что $n-p$ -переходы обладают лучшей однородностью чувствительности по площади, что особенно актуально для квантов с глубинами поглощения в кремнии порядка 10 nm. Если принять во внимание эффект обратимой релаксации фототока $n-p$ -структур (рис. 3, а), можно предположить, что фотодиоды на основе исследованной $p-n$ -структуры будут обладать преимуществом при работе с однократными импульсными сигналами в ВУФ-диапазоне.

Другая группа исследователей, использовавшая близкий подход по формированию фотодиодов, получила подтверждение стойкости $p-n$ -структур с „входным окном“ на основе компаунда бор–кремний [12–14] к ВУФ-диапазону спектра.

Таким образом, в представленной работе исследована чувствительность и стойкость фотодиодов, созданных на основе структур $n-p$ [1,2] и $p-n$ [7], к излучению с длиной волны 121.6 nm. Показано, что $p-n$ -фотодиод по чувствительности и стойкости не уступает широко используемым фотодиодам на $n-p$ -структуре. Для диодов на $n-p$ -структуре наблюдался эффект обратимой релаксации фототока при засветке ранее не облучаемой зоны активной области. В то же время для $p-n$ -фотодиода эффекта обратимой релаксации фототока не зафиксировано, что может оказаться существенным преимуществом при абсолютных измерениях мощности импульсных потоков одиночных кратковременных вспышек в ВУФ-диапазоне.

Авторы благодарны коллегам из ФТИ им. А.Ф. Иоффе Н.В. Забродской, М.С. Лазеевой, М.В. Дроздовой, В.В. Филимонову за помощь в изготовлении фотодиодов, Л.А. Шмаенку за помощь в исследовании фотодиодов, а также А.А. Сорокину за обсуждение результатов работы.

Работа выполнена при поддержке 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 Минобрнауки России).

Список литературы

- [1] Korde R., Cable J.S., Canfield L.R. // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1993. V. 40. P. 1655–1659.
- [2] Kuschnerus P. et al. // Metrologia. 1998.V. 35. P. 355–362.
- [3] Goldberg Yu.A. et al. // Semiconductors. 1999. V. 33. P. 343.

- [4] *Aruev P.N.* et al. // Proceeding of IWRFR1'2000.
- [5] *Scholze F., Klein R., Müller R.* // Metrologia. 2006. V. 43. S6–S10.
- [6] *Aruev P.N.* et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. A. 2009. V. 603. P. 58–61.
- [7] *Zabrodsky V.V.* et al. // Proceeding of the 9th ISMTII-2009.
- [8] *Gullikson E.M.* et al. // Electron Spectroscopy and Related Phenomena. 1996.V. 80. P. 313-316.
- [9] *Flora M.Li., Nixon O., Arokia Nathan* // IEEE Trans. Electron Dev. 2004. V. 51. P. 2229.
- [10] *Sotnikova G.Yu.* et al. // Proceeding of SPIE. 2011. V. 8073. P. 80731D.
- [11] *Gottwald A.* et al. // Meas. Sci. Technol. 2010. V. 21. P. 125101.
- [12] *Sarubbi F.* et al. // ECS Transactions. 2006. V. 3. N 2. P. 35–44.
- [13] *Sarubbi F.* et al. // Proc. IEEE 38th ESSDERC. 2008. P. 278–281.
- [14] *US Patent 7 586 108*, September 8, 2009.