

07
Кремниевые дифференциальные фотоприемники. Технология, характеристики, применение

© В.В. Гаврушко, А.С. Ионов, О.Р. Кадриев, В.А. Ласткин

Новгородский государственный университет им. Ярослава Мудрого,
173003 Великий Новгород, Россия
e-mail: Valery.Gavrushko@novsu.ru

Поступило в Редакцию 31 марта 2023 г.
В окончательной редакции 8 июня 2023 г.
Принято к публикации 3 июля 2023 г.

Рассмотрены возможности применения дифференциальных методов регистрации сигналов для кремниевых фотоприемников. Даны примеры возможной реализации дифференциальных фотоприемников на основе кремния. Проанализированы их характеристики, показаны варианты возможного использования фотоприемников как двухцветных. Фотоприемники содержали два $n^+ - p$ -фотодиода. Один из фотодиодов имел широкую спектральную характеристику с высокой чувствительностью в ультрафиолетовой области. Чувствительность второго была снижена в коротковолновой части спектра путем создания дополнительных рекомбинационных центров в приповерхностной области методом имплантации ионов As. Спектральная чувствительность дифференциального сигнала, полученного вычитанием фототоков, имела ярко выраженную коротковолновую характеристику. Длинноволновая граница спектрального диапазона этого канала по уровню $\lambda_{0.5}$ в зависимости от дозы легирования изменялась в пределах $0.37 - 0.47 \mu\text{m}$. Максимум чувствительности соответствовал $\lambda_{\text{max}} = 0.32 - 0.37 \mu\text{m}$. Электрические и шумовые характеристики обоих фотодиодов были сходными. Пороговые характеристики фотоприемников для дневного света на частотах свыше 300 Hz определялись флуктуациями фонового излучения, начиная с освещенности около 10 lx .

Ключевые слова: фотодиод, имплантация, дифференциальный сигнал, ультрафиолет, двухспектральный фотоприемник.

DOI: 10.21883/JTF.2023.09.56223.1360-23

Введение

В микроэлектронных измерительных преобразователях, наряду с традиционными, находят широкое применение разностные или дифференциальные методы [1,2], основанные на регистрации разности между двумя сигналами. Примером использования таких методов в оптоэлектронике может быть применение дифференциальных усилителей в координатно-зависимых фотоприемниках [3]. Разностные сигналы используются в гелиотрекерах для ориентации фотоэлектрических модулей на максимальный поток солнечного излучения [4]. Для коррекции неоднородности матричных фоточувствительных элементов наиболее широко применяется схема, основанная на сравнении сигналов всех (ФЧЭ) с двумя опорными уровнями при равномерном облучения матрицы [5]. Встречно включенные терморезисторы позволяют обеспечить стабильность характеристик болометров [6]. В настоящей работе рассматривается возможность использования дифференциальной технологии для коррекции спектральной характеристики кремниевых фотоприемников.

Фотоприемники на основе кремния как в настоящее время, так и в ближайшей перспективе будут иметь широкое применение в оптоэлектронике [7–10]. Это связано с высокоразвитой и низкокзатратной технологией кремниевых приборов, а также с возможностью

эффективно регистрировать оптическое излучение в широком спектральном диапазоне — от ультрафиолетового до инфракрасного. Во многих случаях излучение наблюдаемых объектов имеет ограниченный спектральный диапазон, и целесообразно согласовать с ним и сузить спектральную характеристику фотоприемника [11], что позволит устранить влияние мешающих объектов с другим спектром излучения. Для коррекции спектральной чувствительности обычно используются оптические встроенные фильтры [12–14]. Использование для глубокого подавления паразитного излучения высококачественных внешних фильтров может существенно увеличить стоимость приборов [15] и не всегда является технически эффективным. Кроме того, исследователи отмечают деградацию приборов из-за склонности многих светофильтров к соляризации, особенно для УФ излучения [16]. Наиболее технологичными и стабильными являются полупроводниковые фильтры, но они используются только для подавления чувствительности в коротковолновой части спектра [17]. Применение для выделения коротковолновой области интерференционных покрытий [18–19] не лишено недостатков, связанных с зависимостью характеристик от угла падения света на поверхность фильтра и сложностью нанесения большого числа слоев строго контролируемой толщины. Возможности снижения чувствительности в длинноволновой области за счет формирования встроенного тормозящего

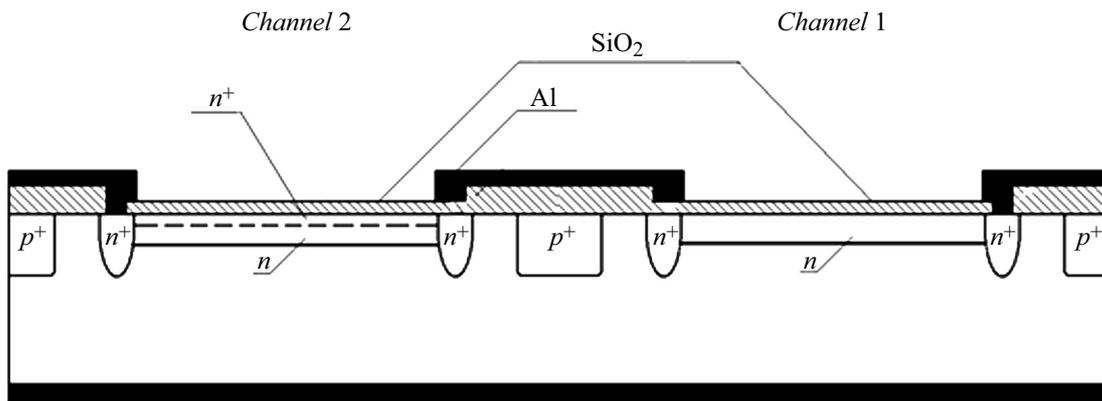


Рис. 1. Структура дифференциального фотоприемника.

поля [20] также дают ограниченный эффект. Интересным является способ формирования спектральной чувствительности фотоприемника в УФ области за счет вычитания сигналов рядом расположенных чувствительных площадок с различной спектральной характеристикой (дифференциальные фотоприемники) [21–23]. Как оказалось, такие фотоприемники обладают рядом специфических особенностей. В настоящей работе описан способ получения дифференциальных фотоприемников на основе кремния с использованием коррекции спектральной чувствительности путем имплантации тяжелых ионов As [24]. Приведены установленные авторами особенности их характеристик. Проанализированы способы управления диапазоном спектральной чувствительности, приведены примеры возможного использования таких фотоприемников.

1. Структура и технология фотоприемника

Структура предлагаемого фотоприемника приведена на рис. 1.

Фотоприемник содержал две площадки, спектральная чувствительность которых была идентичной в длинноволновой области, но различна для УФ излучения. Первый (основной) канал для обеспечения чувствительности в широкой спектральной области формировался как фотодиод с мелким $p-n$ -переходом [25,26]. Исходным материалом служил кремний p -типа марки КДБ-10. Электронно-дырочный переход создавался имплантацией ионов фосфора дозой $3 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ при энергии 100 keV с последующим термическим отжигом. Конечная глубина залегания $p-n$ -перехода, определенная методом сферического шлифа, составляла $1.1 \mu\text{m}$. Для обеспечения омического контакта с n -слоем по периферийной области фоточувствительного слоя проводилось дополнительное подконтактное легирование имплантацией фосфора дозой $100 \mu\text{C}/\text{cm}^2$. Для ограничения каналов инверсии, вносимых зарядом окисла, формировались

диффузионные p^+ -области. С целью уменьшения коэффициента отражения падающего излучения на фоточувствительной области выращивалась антиотражающая пленка SiO_2 толщиной около 60 nm, оптимизированная на длину волны 350 nm. Омические контакты получались напылением алюминия с последующим вжиганием при температуре 450°C . Пленки алюминия также выполняли роль оптического экрана, задающего размеры фоточувствительных площадок. С целью снижения связи между каналами минимальные размеры экрана выбирались в 5–6 раз превышающими диффузионную длину неосновных носителей заряда [27,28].

Второй (дополнительный) канал формировался одновременно с первым на той же пластине с использованием общих технологических операций, но с добавлением на заключительных стадиях процесса имплантации высокой дозы мышьяка. Имплантация проводилась с энергией 50 keV в диапазоне доз от 200 до $5000 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ без последующего термического отжига. Ионно-легированный слой создавал структурные дефекты, что приводило к увеличению скорости рекомбинации фотоносителей, образованных УФ излучением [29]. Кроме того, профиль торможения примеси при имплантации [30–32] мог создавать тормозящее электрическое поле для генерируемых светом неосновных носителей заряда в приповерхностной области. Таким образом, наличие ионно-легированного слоя снижало чувствительность фотодиода в УФ диапазоне как за счет рекомбинационных процессов, так и за счет создания тормозящего электрического поля. Вместе с тем идентичность глубоких слоев обеспечивала близкую спектральную чувствительность в длинноволновой области, где процессы собирания фотоносителей определялись удаленными от поверхности областями. Размеры приемных площадок для обоих каналов были одинаковыми.

Для уменьшения влияния на спектральную характеристику неоднородности физических характеристик структуры, а также неравномерности светового потока, мы предложили сформировать каналы в виде двух групп параллельно включенных фотодиодов. Фотодиоды

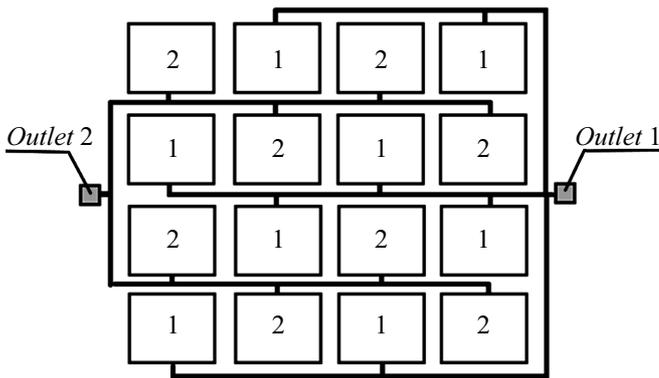


Рис. 2. Топология размещения основного (1) и дополнительного (2) каналов фотоприемника.

первого и второго каналов располагались в шахматном порядке, как это показано на рис. 2. Общий размер фоточувствительной области составлял 2.5×2.5 мм.

Попытка предсказать количественные физические характеристики такого фотоприемника с помощью математического моделирования, например спектральную чувствительность, вызывает определенные трудности. Это связано с проблемами в определении значений концентрации структурных дефектов, их распределением, параметрами центров рекомбинации, тем более, что эти величины подвержены изменениям в многоступенчатых технологических операциях. В связи с этим для получения достоверных сведений целесообразно было провести экспериментальное исследование характеристик таких приборов.

2. Спектральные характеристики фотоприемников

На рис. 3 в качестве примера представлена спектральная чувствительность для равного потока падающих квантов в относительных единицах для канала 1 и канала 2, подвергнутого дополнительной имплантации мышьяком с энергией 50 keV и дозой $2000 \mu\text{C}/\text{cm}^2$. Измерения проводились в режиме регистрации фототока, близком к режиму короткого замыкания. Как видно, введение дополнительных рекомбинационных центров позволило на порядок снизить чувствительность второго канала в УФ области. Вместе с тем при смещении к видимой области разница между сигналами в обоих каналах уменьшалась. На рис. 4 приведена спектральная характеристика на выходе дифференциального усилителя (назовем его дифференциальным каналом), полученная путем вычитания фототоков основного и дополнительного каналов.

Характеристика имела ярко выраженный максимум в УФ области около $0.35 \mu\text{m}$. Границы спектрального диапазона по уровню $\lambda_{0.5}$ находились в пределах $0.27-0.46 \mu\text{m}$. Чувствительность дифференциально-

го канала для больших длин волн ($\lambda > 0.7 \mu\text{m}$) снижалась почти на два порядка.

Одним из существенных факторов, определяющих вид спектральной характеристики дифференциального канала, являлась величина дозы имплантации As. В связи с этим была изготовлена серия фотоприемников с различной степенью легирования вспомогательного канала [33,34]. На рис. 5 приведены нормированные спектральные характеристики дифференциальных каналов для равного потока падающих квантов при различных дозах легирования дополнительного канала.

Как и следовало ожидать, с ростом дозы имплантации наблюдалось расширение спектрального диапазона чувствительности за счет смещения длинноволновой границы. Представляет интерес экспериментальная зависимость длинноволновой границы (по уровню $\lambda_{0.5}$) от дозы легирования (рис. 6). В диапазоне исследованных доз она может быть аппроксимирована выражением

$$\lambda_{0.5} = \lambda_0 + k \ln \frac{Q}{Q_0},$$

где $\lambda_0 = 0.347 \mu\text{m}$, $k = 3.2 \cdot 10^{-2} \mu\text{m}$, $Q_0 = 100 \mu\text{C}/\text{cm}^2$.

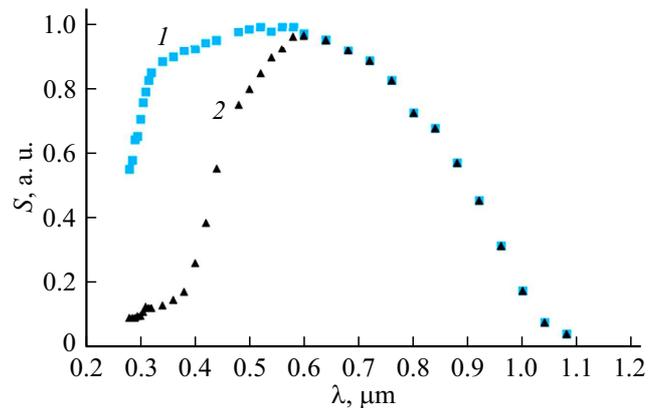


Рис. 3. Спектральная чувствительность основного (1) и дополнительного (2) каналов.

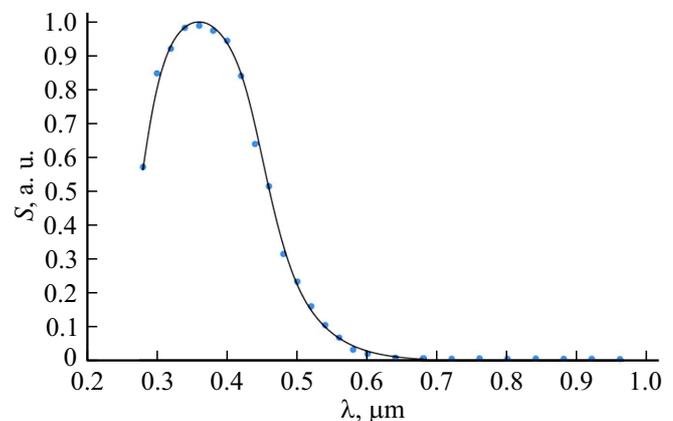


Рис. 4. Спектральная чувствительность дифференциального канала.

Еще одной важной характеристикой фотоприемника является значение чувствительности дифференциального канала, которое также зависело от дозы легирования вспомогательного канала. На рис. 7 приведена квантовая эффективность дифференциального канала для различных доз имплантации. Значения приведены в виде отношения квантовой эффективности дифференциального канала к максимальному значению квантовой эффективности основного канала.

С ростом дозы наблюдалось увеличение сигналов дифференциального канала. На рис. 8 приведен анализ зависимости эффективности дифференциального канала от дозы имплантации As для фиксированной длины волны в районе максимума спектральной характеристики $\lambda = 0.34 \mu\text{m}$.

В диапазоне от 200 до $2000 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ наблюдалось существенное влияние дозы на чувствительность дифференциального канала. Начиная с $2000 \mu\text{C}/\text{cm}^2$, значение квантовой эффективности приближалось к 90%, и дальнейшее увеличение дозы мало сказывалось на чувствительности. Таким образом, если не ставить задачу коррекции длинноволновой границы относительно $\lambda_{0.5} = 0.44 \mu\text{m}$, то близкими к оптимальным следует

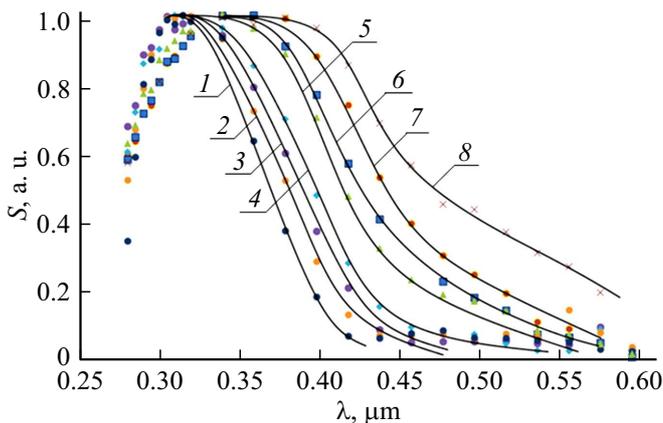


Рис. 5. Спектральная чувствительность дифференциального канала. Дозы легирования: 1 — 200, 2 — 300, 3 — 400, 4 — 500, 5 — 700, 6 — 1000, 7 — 2000, 8 — $5000 \mu\text{C}/\text{cm}^2$.

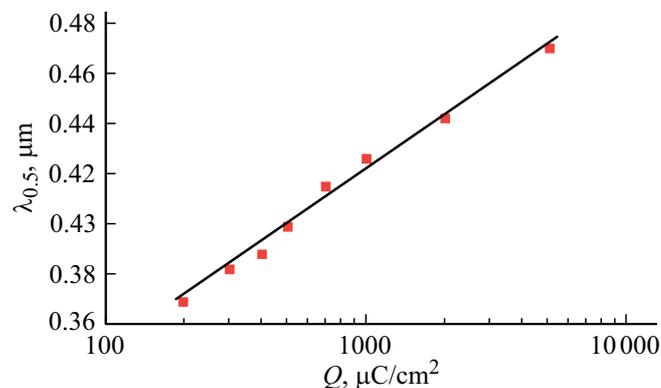


Рис. 6. Зависимость длинноволновой границы чувствительности дифференциального канала от дозы имплантации As.

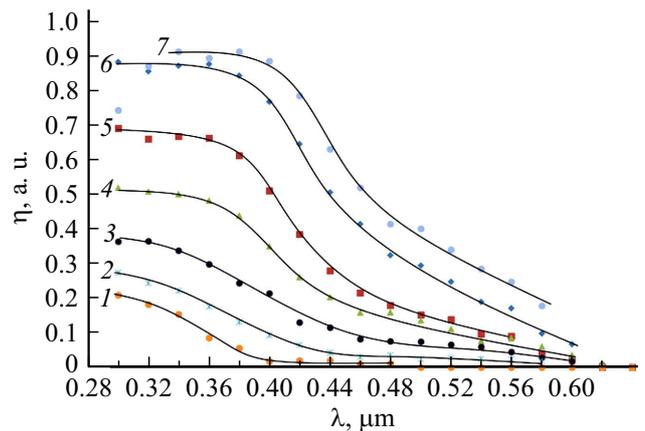


Рис. 7. Квантовая эффективность дифференциального канала для разных доз имплантации As: 1 — 200, 2 — 300, 3 — 500, 4 — 700, 5 — 1000, 6 — 2000, 7 — $5000 \mu\text{C}/\text{cm}^2$.

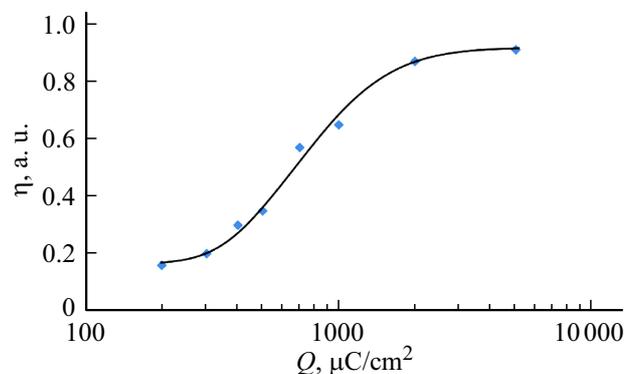


Рис. 8. Зависимость квантовой эффективности дифференциального канала от дозы имплантации As для $\lambda = 0.34 \mu\text{m}$.

считать дозы легирования около $2000 \mu\text{C}/\text{cm}^2$. При этом сохранялась хорошая селективность спектральной характеристики и обеспечивалась высокая чувствительность дифференциального фотоприемника.

3. Электрические характеристики фотоприемников

Важным требованием к дифференциальным фотоприемникам является обеспечение идентичности электрических характеристик основного и дополнительного каналов. Измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) производились с помощью анализатора полупроводниковых приборов Agilent B1500A. Для температурных измерений использовалась зондовая установка Microxact SPS-2800-TC.

ВАХ основного и дополнительного каналов измерялись в диапазоне доз легирования мышьяком от 200 до $5000 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ [35]. Для каждой технологической серии ВАХ фотодиодов основного (1) и дополнительного (2) каналов при небольших напряжениях имели похожий

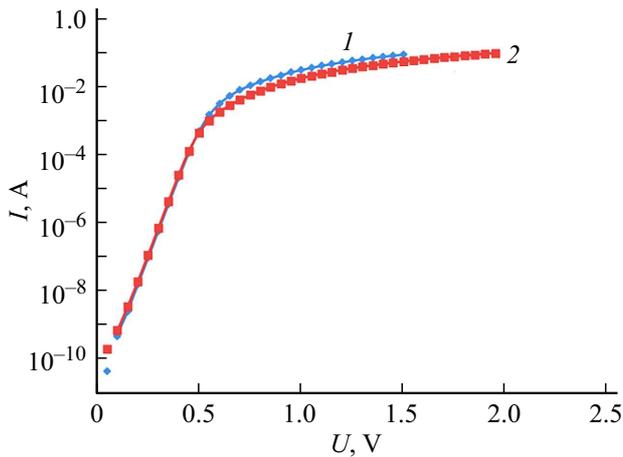


Рис. 9. Прямые ветви ВАХ. Доза легирования $500 \mu\text{C}/\text{cm}^2$. 1 — основной, 2 — дополнительный канал.

вид, не обнаруживая существенной зависимости от дозы легирования дополнительного канала. В качестве примера на рис. 9 приведены прямые ветви темновых ВАХ одного из фотоприемников. Как видно, в области малых токов при напряжениях до 0.5 V наблюдалась экспоненциальная зависимость, соответствующая общепринятому виду [36]:

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{eU}{\beta kT}\right) - 1 \right]$$

со значениями $I_0 \approx 1 \cdot 10^{-11} \text{ A}$, $\beta = 1.11$. При небольших напряжениях для основного и дополнительного каналов вид ВАХ был одинаков. При больших напряжениях начинало сказываться последовательное остаточное сопротивление диодов, и ВАХ выходила на линейный участок. Для некоторых образцов, как это наблюдается в приведенном примере, в области больших токов проявлялось небольшое различие в величинах остаточного сопротивления. Так, в этом случае дифференциальные сопротивления составили: для основного канала $R_1 = 9.4 \Omega$ и дополнительного $R_2 = 11.2 \Omega$. Однако следует учесть, что предпочтительным для работы фотодиода является режим с нулевыми или небольшими отрицательными напряжениями на $p-n$ -переходе. При этом наблюдаемое различие в области больших положительных смещений не является существенным. Для образцов многих других технологических серий в прямой ветви наблюдалось практически полное совпадение ВАХ вплоть до токов порядка 100 mA .

Типичные зависимости обратного темнового тока приведены на рис. 10. Близкие к пробивным напряжения, при которых заметно возрастал обратный ток для основного канала, достигали $140\text{--}160 \text{ V}$. Учитывая развитую совокупную длину границ $p-n$ -переходов многоплощадочного фотодиода, можно предположить значительное влияние поверхностных утечек на характер обратного тока. Как и следовало ожидать, для дополнительного

канала, имеющего высокую концентрацию структурных дефектов в приповерхностной области, предельные напряжения оказались меньшими.

На рис. 10 также представлена начальная часть характеристики в диапазоне небольших напряжений, представляющих наибольший интерес для практики. Характеристики основного и дополнительного каналов имели сходный вид, но численно несколько различались. Как видно, обратный ток не испытывал насыщения. Величины токов при небольших напряжениях значительно превышали значение $I_0 \approx 10 \text{ pA}$ (так, при $U = 1.6 \text{ V}$, $I_1 = 107 \text{ pA}$, $I_2 = 160 \text{ pA}$) и линейно увеличивались с напряжением. Это могло свидетельствовать о наличии избыточных токов. Ток диода при небольших смещениях можно представить суммой слагаемых

$$I(U) = I_d(U) + I_{gr}(U) + G_s U,$$

где I_d , I_{gr} — диффузная и генерационно-рекомбинационная составляющие диодного тока, G_s — проводимость утечек.

Хотя В.И. Стафеев в работе [37] показал, что аддитивность тока идеального диода и тока утечки не выполняется строго, тем не менее приведенная формула может быть полезна как отражающая близкий к омическому

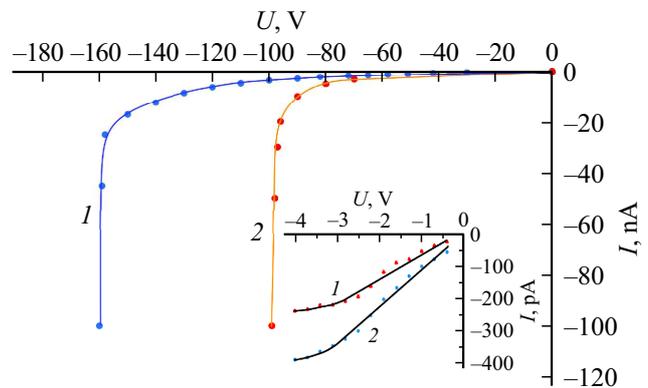


Рис. 10. Обратные ветви ВАХ: 1 — основной, 2 — дополнительный канал. Доза $500 \mu\text{C}/\text{cm}^2$.

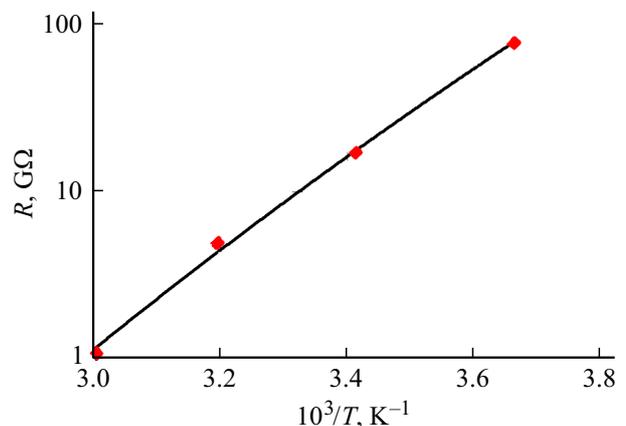


Рис. 11. Зависимость сопротивления утечек от температуры.

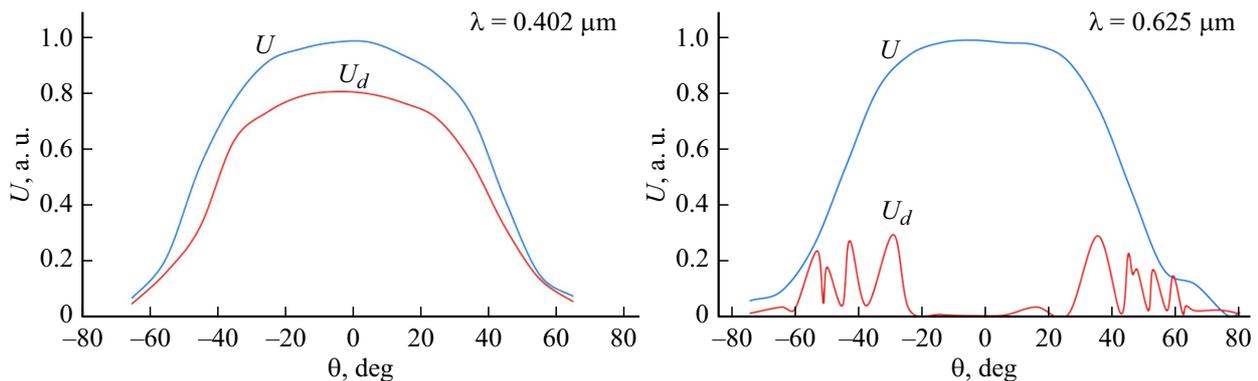


Рис. 12. Диаграммы направленности основного (U) и дифференциального (U_d) каналов фотоприемника первого типа в коротковолновой ($\lambda = 0.402 \mu\text{m}$) и длинноволновой ($\lambda = 0.625 \mu\text{m}$) областях.

характер изменения тока в приборе. Для количественной характеристики можно оценить сопротивления утечек, которые для рассматриваемого образца составили $R_{s1} = 14 \cdot 10^9$ и $R_{s2} = 8.9 \cdot 10^9 \Omega$. Знание динамических сопротивлений необходимо для выбора характеристик предусилителя.

На рис. 11 приведена температурная зависимость сопротивления утечек для основного канала фотоприемника с дозой легирования $500 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ в области положительных температур от 0 до $+60^\circ\text{C}$. Результаты могут быть аппроксимированы экспоненциальной зависимостью с энергией активации, близкой к половине ширины запрещенной зоны кремния (около 0.54eV). Его величина оказалась на много порядков выше типичных значений входных сопротивлений предусилителей ($R_{inp} < 10^3 \Omega$). Это позволяет не учитывать различия в значениях сопротивления утечек каналов и надежно регистрировать разностный сигнал с помощью дифференциального усилителя во всем представляющем практический интерес диапазоне температур. Изменение доз легирования не выявило существенного влияния на электрические характеристики как основного, так и дополнительного каналов.

Барьерные емкости для приведенной топологии фотоприемника при нулевом смещении имели значения около 440pF для основного канала и 390pF для дополнительного. Различие связано с несколько большей площадью металлизации основного канала.

4. Диаграмма направленности фотоприемника

Одна из специфических особенностей дифференциальных фотоприемников проявилась при исследовании их диаграммы направленности [38]. Диаграммы направленности регистрировались гониометром Г5 с использованием монохроматических источников света отдельно для коротковолнового и длинноволнового излучения. В качестве коротковолнового источника использовался светодиод с длиной волны $0.402 \mu\text{m}$, а в каче-

стве длинноволнового — светодиод с длиной волны $0.625 \mu\text{m}$. Излучение светодиодов модулировалось на частоте 1000Hz с амплитудными значениями тока 10mA . Это обеспечивало работу фотоприемников на линейном участке их энергетической характеристики с уровнем сигналов, значительно превышающих шумовые. Сигналы регистрировались на выходе дифференциального усилителя селективным микровольтметром В6-9.

Были исследованы диаграммы направленности для фотоприемников с использованием корпусов двух типов. В первом случае фоточувствительная структура монтировалась в стандартный металлический корпус КТ-2, снабженный оптическим окном. Диаграммы направленности как основного (широкодиапазонного), так и дифференциального каналов в области коротких длин волн имели традиционный для фотоприемников вид. Плоский угол зрения (2β) по уровню 0.5 [39] составил как для основного, так и для дифференциального каналов $2\beta \approx 90^\circ$. Особенность в диаграмме направленности проявилась в длинноволновой области спектра (рис. 12).

Дифференциальный канал предназначен для регистрации только коротковолнового излучения, и его чувствительность в длинноволновой области должна быть минимально возможной. Однако при отклонении от оси, начиная с углов порядка 30° , для дифференциального канала наблюдался ряд паразитных максимумов. Их появление можно связать с частичным затенением фоточувствительных площадок стенками углубленного корпуса фотоприемника, особенно ярко выраженным на границах диаграммы направленности. Поскольку дифференциальный сигнал формировался вычитанием сигналов рядом расположенных соседних фотодиодов, неравномерное освещение площадок приводило к появлению краевого эффекта и образованию паразитного сигнала. Для устранения эффекта был использован монтаж фоточувствительной структуры в плоский корпус КТ-93 (второго типа).

Диаграмма направленности такого фотоприемника для длинноволнового излучения приведена на рис. 13. Как видно, исключение влияния на освещение фоточув-

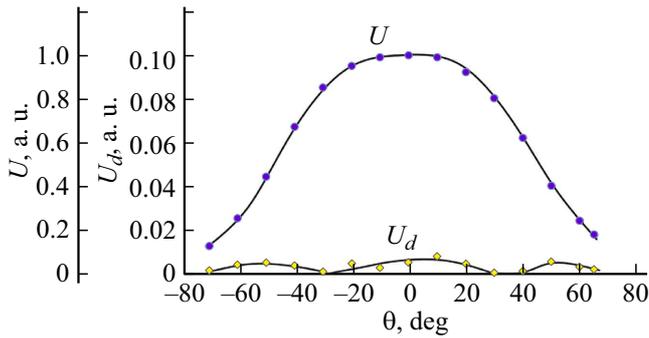


Рис. 13. Диаграммы направленности основного (U) и дифференциального (U_d) каналов фотоприемника второго типа в длинноволновой области ($\lambda = 0.625 \mu\text{m}$).

ствительной структуры элементов конструкции корпуса привело к существенному подавлению паразитных краевых эффектов. Низкий уровень сигналов дифференциального канала свидетельствовал об однородности освещения чувствительных площадок и сохранении селективности спектральной характеристики фотоприемника для всех углов диаграммы направленности. Еще одним вариантом исключения краевых эффектов может быть использование матового (рассеивающего) входного окна [40].

5. Токовая чувствительность и пороговые характеристики фотоприемника

Были измерены значения абсолютной токовой чувствительности дифференциального канала для монохроматического излучения (S_λ) [41]. Для этого использовался УФ светодиод, имеющий пик излучения на длине волны $0.36 \mu\text{m}$ с полушириной спектра $0.013 \mu\text{m}$, что согласовалось с максимумом спектральной чувствительности фотоприемника. Значение токовой чувствительности определялось путем сравнения сигналов исследуемого фотоприемника с известным. В качестве приемника сравнения использовался фотодиод ФДУК-10 [42]. Значения токовой чувствительности дифференциального канала для фотоприемника с дозой легирования $2000 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ составили $S_i = 0.06 \text{ A/W}$. Расчет токовой чувствительности для 100% квантового выхода при $\lambda = 0.36 \mu\text{m}$ [43] дает значение 0.29 A/W . Если учесть, что площадь чувствительных площадок основного канала составляла 32% от общей площади фотоприемника, а также происходящее снижение чувствительности из-за вычитания сигналов от вспомогательного канала (в нашем случае это 12%), то расчетное значение S_i составит 0.082 A/W . Если также учесть наличие дополнительных потерь на отражение излучения входным окном и самой структурой, то полученные значения $S_i = 0.06 \text{ A/W}$ можно считать вполне приемлемым результатом.

В ряде случаев может возникать необходимость увеличения размеров чувствительной площадки фотоприемника. Например, для повышения чувствительности фотоприемника к освещенности или для расширения поля зрения устройства с заданной оптической системой. Одним из преимуществ предлагаемых фотоприемников является возможность увеличивать площадь за счет параллельного включения модулей. Необходимое число модулей может набираться на заключительных операциях сборки приборов без изменения основных технологических операций. На рис. 14 приведены полученные зависимости токовой чувствительности с ростом подключаемых модулей. Как видно, при увеличении суммарной площади приемных площадок в 4 раза токовая чувствительность не уменьшалась, сохраняя постоянное значение.

Актуальным при регистрации слабых сигналов является вопрос о пороговых характеристиках фотоприемников. Исследование спектра шумов показало, что характеристики основного и дополнительного каналов для всех образцов практически совпадали и не зависели от дозы легирования дополнительного канала.

В отсутствие фоновой засветки спектральные характеристики шумовых токов имели классический вид

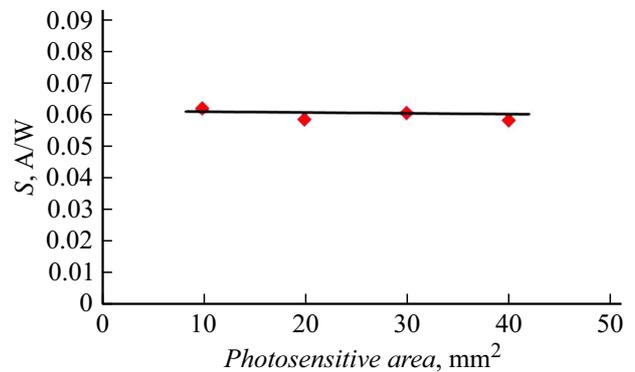


Рис. 14. Токовая чувствительность дифференциального канала для фотоприемников с увеличенной площадью.

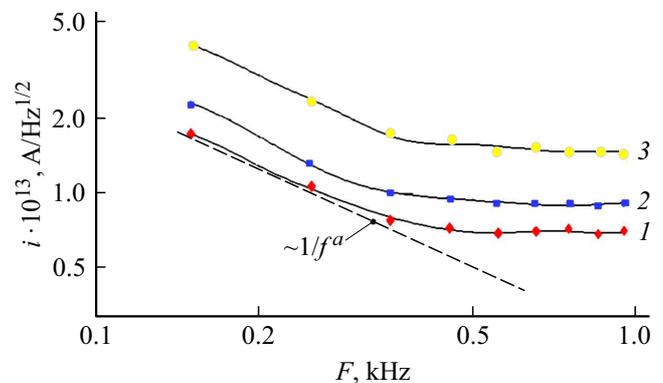


Рис. 15. Спектральные характеристики шумового тока дополнительного канала для дозы легирования $500 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ в отсутствие фоновой засветки: U_{suppl} : 1 — 0.5, 2 — 2, 3 — 10 V.

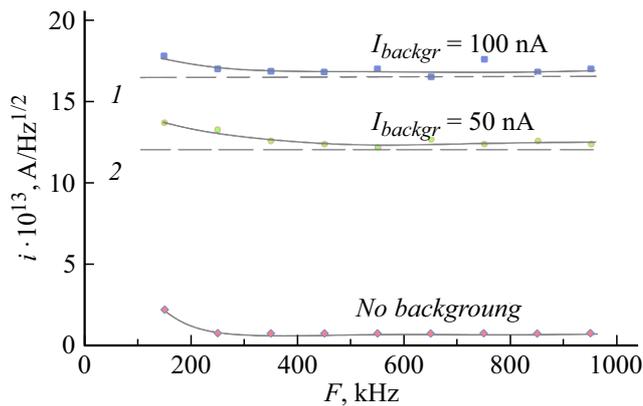


Рис. 16. Спектральные характеристики шумового тока дополнительного канала с дозой легирования $500 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ при разных фоновых токах и напряжении питания 0.5 V . 1 — теоретическое значение дробового шумового тока при $I_{\text{backgr}} = 100 \text{ nA}$; 2 — теоретическое значение дробового шумового тока при $I_{\text{backgr}} = 50 \text{ nA}$.

(рис. 15) и могли быть представлены в виде суммы двух компонент: фликкер-шума и белого шума [43]. Параметр α фликкер-шума ($i_{\text{noise}} \propto 1/f^\alpha$) для исследованных образцов имел значение в пределах от 0.9 до 1.1, а частота сопряжения фликкер-шума и белого шума составляла 300–350 Hz. Вблизи нулевого смещения спектральная плотность белого шумового тока имела значение около $1 \cdot 10^{-13} \text{ A}/\text{Hz}^{1/2}$. Поскольку фотодиоды практически не используются в режимах без фоновой засветки, были проведены измерения шумового тока фотодиодов при воздействии на них фонового потока излучения. В качестве источника фона использовалась питаемая стабильным током лампа накаливания. Уровень фонового потока регулировался изменением тока питания лампы, а контролировался по величине фонового тока исследуемого образца. Результаты измерений приведены на рис. 16.

Как видно, при фоновых токах $I_{\text{backgr}} > 50 \text{ nA}$ шумовой ток каждого канала для частот свыше 300–350 Hz практически полностью определялся дробовым шумом его фонового тока и мог быть определен по формуле Шоттки [44]:

$$i_{\text{noise}} = \sqrt{2eI_{\text{backgr}}\Delta f},$$

где e — заряд электрона, I_{backgr} — фоновый ток, Δf — полоса пропускания.

Исходя из полученных данных, рабочие напряжения в диапазоне от 0 до 0.5 V можно считать оптимальными для обоих каналов дифференциального фотоприемника. По нашим оценкам, при этом шумовые характеристики кремниевых дифференциальных фотоприемников для дневного света на частотах свыше 350 Hz будут определяться флуктуациями фонового излучения начиная с освещенности около 10 lx [45].

6. О применении кремниевых дифференциальных фотоприемников

Наиболее востребованным следует считать применение кремниевых дифференциальных фотоприемников в качестве коротковолновых, работающих в УФ диапазоне. Вместе с тем области чувствительности дифференциального и дополнительного каналов имели ярко выраженное смещение друг относительно друга в коротковолновую и длинноволновую части спектра. Это позволяет использовать дифференциальные фотоприемники в качестве двухцветных. На рис. 17 приведены спектральные характеристики фотоприемника с наиболее широким спектром дифференциального канала (доза легирования $5000 \mu\text{C}/\text{cm}^2$). Как видно, максимумы чувствительности находились в УФ области ($\lambda_{\text{max}} = 0.37 \mu\text{m}$) для одного канала и в видимой области ($\lambda_{\text{max}} = 0.6 \mu\text{m}$) для второго. Возможность регистрировать оптическое излучение одновременно в двух разнесенных спектральных диапазонах может представлять практический интерес, поскольку позволяет оперативно осуществлять спектрально-анализ излучающих объектов. Актуальность разработки многоспектральных оптико-электронных систем (ОЭС), в которых один из спектральных каналов обладал бы чувствительностью к излучению в УФ спектральном диапазоне, а другой канал — в видимой или ИК области спектра, связана с возможностью их применения в таких областях, как космические исследования, нанолитография, военная техника, медицина, мониторинг, ЧС и др. [46,47].

В качестве примера можно рассмотреть использование такого фотоприемника для определения температуры тепловых источников излучения. На рис. 18 приведена расчетная зависимость отношения сигналов дифференциального и дополнительного каналов ($\delta = U_{\text{dif}}/U_2$) от температуры теплового источника.

Данные получены методом численного интегрирования. В качестве модели источника излучения принято

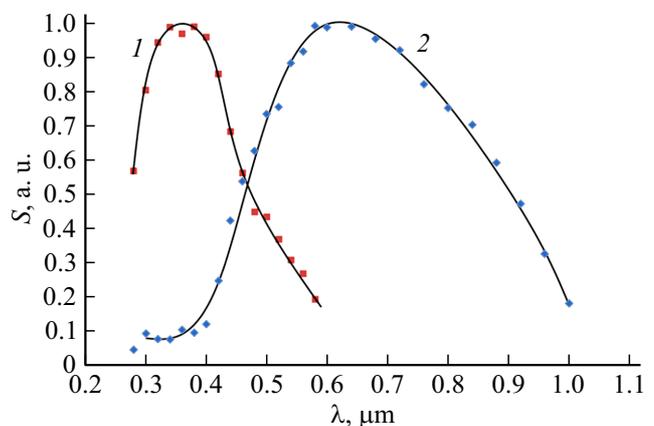


Рис. 17. Спектральные характеристики дифференциального (1) и дополнительного (2) каналов.

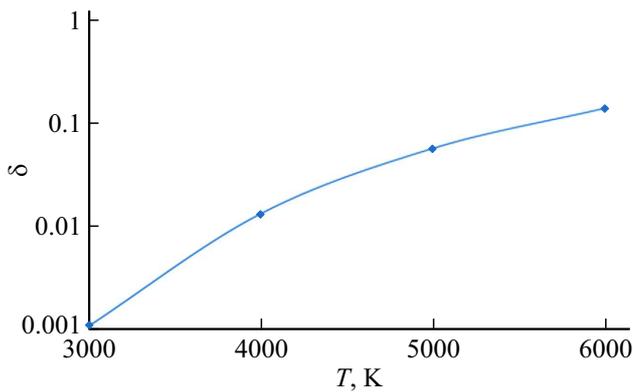


Рис. 18. Зависимость отношения сигналов дифференциального канала к дополнительному от температуры теплового источника.

АЧТ с характером распределения потока фотонов [48]:

$$N_{\lambda} = \frac{2\pi c \lambda^{-4}}{\exp \frac{C_2}{\lambda T} - 1},$$

где N_{λ} — количество фотонов, испущенных во всех направлениях с единичной площадки в единичном интервале частот, c — скорость света, λ — длина волны, T — температура, $C_2 = 1.44 \text{ cm} \cdot \text{K}$.

Отношение сигналов рассчитывалось, как

$$\delta = \frac{\sum_i N_{\lambda_i} \eta_{\lambda_1}}{\sum_i N_{\lambda_i} \eta_{\lambda_2}},$$

где $\eta_{\lambda_1}, \eta_{\lambda_2}$ — относительные квантовые эффективности каналов 1 и 2. Суммирование проводилось с шагом $0.02 \mu\text{m}$. Как видно, при снижении температуры от 6000 K (солнечное излучение) до 3000 K (лампа накаливания) отношение сигналов должно существенным образом изменяться, уменьшаясь на два порядка. Это позволяет применять такие фотоприемники для контроля высокотемпературных источников излучения и для эффективного анализа вида источников излучения — например, в пожарных извещателях для исключения ложных срабатываний путем распознавания отличия спектра солнечных бликов от спектра теплового излучения источников возгорания. В качестве модели был выбран наиболее подходящий для такого применения фотоприемник с максимально широким спектром дифференциального канала (доза $5000 \mu\text{C}/\text{cm}^2$).

Другим интересным применением двухспектрального фотоприемника является его использование для тестирования источников света. Многие современные источники используют преобразование УФ излучения в видимое. Наличие значительной доли УФ излучения в бытовых источниках света является крайне нежелательным [49]. Необходимость совершенствования приборов и методов оценки качества источников света считается актуальной задачей [50]. На наш взгляд, кремниевые дифференциальные фотоприемники могут быть использованы с

отношением сигналов дифференциального канала к длинноволновому для различных источников света

| № п/п | Источник света | Отношение сигналов δ , а.у. |
|-------|--|------------------------------------|
| 1 | Лампа накаливания, 75 W | 0.0025 |
| 2 | Светодиодная лампа, теплый цвет, 10 W (LEDGSLE27) | 0.186 |
| 3 | Люминесцентная лампа, теплый цвет, 30 W (CF30-ASE27) | 0.212 |
| 4 | Светодиодная лампа, холодный цвет, 17 W (LED-17 A65/865/E27) | 0.247 |
| 5 | Светодиодная лампа, холодный цвет, 7 W (17FQ) | 0.283 |
| 6 | Люминесцентная лампа, холодный цвет, 15 W | 0.304 |

этимися целями [51]. В таблице приведены примеры измерения отношения сигналов дифференциального канала к длинноволновому ($\delta = U_d/U_2$) для некоторых источников света. Доза легирования дополнительного канала составляла $2000 \mu\text{C}/\text{cm}^2$. Как видно, наблюдалось существенное изменение значения δ для разных источников света. Следует также отметить, что, кроме спектроанализа, дифференциальные фотоприемники позволяют измерять уровень пульсаций интенсивности, что также является актуальной характеристикой искусственных источников света [52]. Дополнительным преимуществом таких фотоприемников является возможность проведения анализа пульсаций отдельно как для ультрафиолетовой, так и для видимой составляющих спектрального диапазона.

Заключение

Рассмотрены возможности применения дифференциальных методов регистрации сигналов кремниевых фотоприемников для управления диапазоном спектральной чувствительности. Для повышения однородности характеристик предложено сформировать каналы в виде двух групп параллельно включенных фотодиодов, расположенных в шахматном порядке. Приведена экспериментальная зависимость длинноволновой границы дифференциальных сигналов от дозы имплантации As. Рекомендуемая оптимальная доза имплантации — около $2000 \mu\text{C}/\text{cm}^2$. Исследование электрических характеристик основного и дополнительного каналов показало возможность надежной регистрации разностного сигнала с помощью дифференциального усилителя во всем представляющем практический интерес диапазоне температур. Для исключения паразитных сигналов при боковых направлениях излучения не рекомендуется использовать глубокие корпуса. Измеренные значения то-

ковой чувствительности дифференциального канала для фотоприемника с дозой легирования $2000 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ составили $S_i = 0.06 \text{ A/W}$ на длине волны $0.36 \mu\text{m}$. Одним из преимуществ предлагаемых фотоприемников является возможность увеличения приемной площадки в широких пределах за счет параллельного включения модулей. Исследование спектра шумов показало, что вблизи нулевого смещения на частотах свыше $300\text{--}350 \text{ Hz}$ для темнового тока спектральная плотность белого шума имела значение около $1 \cdot 10^{-13} \text{ A/Hz}^{1/2}$. Кроме применения кремниевых дифференциальных фотоприемников в качестве коротковолновых, работающих в УФ диапазоне, возможно их использование как двухцветных, например, для дистанционного анализа излучения высокотемпературных тепловых источников или в качестве тестеров качества искусственных источников света.

Финансирование работы

Исследование выполнено за счет поддержки Минобрнауки РФ в рамках базовой части госзадания, проект № 1755.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] А.М. Прохоров (гл. ред.) *Физический энциклопедический словарь* (Советская энциклопедия, М., 1983).
- [2] Дж. Фрайден. *Современные датчики. Справочник* (Техносфера, М., 2005).
- [3] Н.Т. Гурин, С.Г. Новиков, И.В. Корнеев, А.А. Штанько, В.А. Родионов. Письма в ЖТФ, **37** (6), 57 (2011).
- [4] М.В. Китаева, А.В. Юрченко, А.В. Охорзина, А.В. Скороходов. Ползуновский вестник, **3/1**, 196 (2011).
- [5] А.М. Филачев, В.П. Пономаренко, И.И. Таубкин. Прикладная физика, **2**, 102 (2003).
- [6] М.Л. Бараночников. *Приемники и детекторы излучений. Справочник* (ДМК Пресс, М. 2012)
- [7] И.Д. Анисимов, И.М. Викулин, Ф.А. Зайтов, Ш.Д. Курмашев. *Полупроводниковые фотоприемники: Ультрафиолетовый, видимый и ближний ИК диапазоны спектра* (Радио и связь, М., 1984)
- [8] Р.Дж. Киес (ред.). *Фотоприемники видимого и ИК диапазонов*. Пер. с англ. (Радио и связь, М., 1985)
- [9] А.М. Филачев, И.И. Таубкин, М.А. Трищенко. *Современное состояние и магистральные направления развития твердотельной фотоэлектроники* (Физматкнига, М., 2010)
- [10] А.В. Войцеховский, Н.А. Кульчицкий, А.А. Мельников, С.Н. Несмелов, С.М. Дзядух. Нано и микросистемная техника, **143** (6), 30 (2012).
- [11] Ю.И. Белоусов, Е.С. Постников. *Инфракрасная фотоника. Часть II Особенности регистрации и анализа тепловых полей*. Учебное пособие (Университет ИТМО, СПб, 2019).
- [12] Р. Хеймен. *Светофильтры*. Пер. с англ. (Мир, М., 1988)
- [13] Э. Риттер. Физика тонких пленок, **8**, 7 (1978).
- [14] Г.В. Розенберг. *Оптика тонкослойных покрытий* (Наука, М., 1991).
- [15] Электронный ресурс ОАО „ЛЛС“. Режим доступа: info@lenlasers.ru
- [16] Ю.А. Гольтберг, Б.В. Царенков. ЖТФ, **66** (8), 195 (1996).
- [17] Ю.А. Глебов, Н.Ю. Зверева, Ю.А. Казарова, О.Г. Ревзина, Л.С. Шендерович. Прикладная физика, **3**, 84 (2007).
- [18] Ш.А. Фурман. *Тонкослойные оптические покрытия* (Машиностроение, Л., 1977)
- [19] Г.Я. Колодный, Е.А. Левчук, Ю.Д. Порядин, П.П. Яковлев. Электронная промышленность, **5**, 93 (1981).
- [20] В.В. Гаврушко, А.С. Ионов, В.А. Ласткин. Наука, технология, бизнес, **100** (2), 72 (2010).
- [21] Патент US № 7196311, H01L 27/15 от 11.08.2005.
- [22] Патент BY № 8532 U1, H01L 27/15 от 30.08.2012.
- [23] Патент RU № 156627 U, H01L 31/068 от 05.05.2015.
- [24] В.В. Гаврушко, А.С. Ионов, О.Р. Кадриев, В.А. Ласткин. ЖТФ, **87** (2), 310 (2017).
- [25] R. Korde, L.R. Canfield, B. Wallis. Proc. SPIE, **932**, 153 (1988).
- [26] В.В. Гаврушко, А.С. Ионов, В.А. Ласткин. Датчики и системы, **121** (6), 49 (2009).
- [27] В.В. Гаврушко, В.А. Ласткин. Вестник Новгородского гос. ун-та, **65**, 17 (2011).
- [28] В.В. Гаврушко, А.С. Ионов, В.А. Ласткин. *Тез. докл. IV Всероссийской конференции „Физические и физико-химические основы ионной имплантации“* (Новосибирск, Россия, 2012), с. 37.
- [29] А.П. Горшков, И.А. Карпович, Е.Д. Павлова, Н.С. Волкова. ФТП, **46** (12), 1542 (2012).
- [30] С. Намба. *Технология ионного легирования*. Пер. с японского (Сов. радио, М., 1974)
- [31] В.С. Вавилов, А.Р. Челядинский. УФН, **165** (3), 347 (1995).
- [32] J.F. Ziegler, J.P. Biersack, M.D. Ziegler. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B, **268**, 1818 (2010).
- [33] В.В. Гаврушко, А.С. Ионов, В.А. Ласткин. *Патент на полезную модель кремниевый фотоприемник с задаваемой спектральной характеристикой* (№ 166199 27.11.2016)
- [34] V.V. Gavrushko, A.S. Ionov, O.R. Kadriev. Mater. Sci. Eng., **441** (1), 1 (2018).
- [35] V.V. Gavrushko, A.S. Ionov, O.R. Kadriev, V.A. Lastkin. J. Phys.: Conf. Series, **2052**, 012 (2021).
- [36] В.В. Пасынков, Л.К. Чиркин, А.Д. Шинков. *Полупроводниковые приборы* (Высш. школа, М., 1981)
- [37] В.И. Стафеев. ФТТ, **3** (1), 185 (1961).
- [38] В.В. Гаврушко, О.Р. Кадриев, В.А. Ласткин, А.А. Сапожников. Вестник Новгородского гос. ун-та, **104** (6), 17 (2017).
- [39] ГОСТ 21934-83 *Приемники излучения полупроводниковые фотоэлектрические и фотоприемные устройства*.
- [40] Патент RU № 1763331 U1, H01L 31/068 от 02.05.2017
- [41] В.В. Гаврушко, А.С.Ионов О.Р. Кадриев, В.А. Ласткин. Вестник Новгородского гос. ун-та, **107**, 4 (2018).
- [42] В.В. Забродский, П.Н. Аруев, В.П. Белик, Б.Я. Бер, Д.Ю. Казанцев, М.В. Дроздова, Н.В. Забродская, М.С. Лазева, А.Д. Николенко, В.Л. Суханов, В.В. Филимонов, Е.В. Шерстнев. ФТП, **47** (2), 178 (2013).
- [43] А.В. Клюев, Е.И. Шмелев, А.В. Якимов. Известия вузов. Радиофизика. **LVII** (12), 995 (2014).
- [44] С. Зи. *Физика полупроводниковых приборов* (Мир, М., 1984), т. 2.

- [45] В.В. Гаврушко, А.С. Ионов, А.А. Сапожников. Вестник Новгородского гос. ун-та, **109** (3), 13 (2018).
- [46] М.А. Трищенко. *Фотоприемные устройства и ПЗС. Обнаружение слабых оптических сигналов* (Радио и связь, М., 1992)
- [47] V.I. Sankin, V.P. Chelibanov. Phys. Stat. Sol. A, **185** (1), 153 (2001).
- [48] И.К. Кикоин (ред.). *Таблицы физических величин. Справочник* (Атомиздат, М., 1976)
- [49] В.А. Капцов, В.Н. Дейнего. Анализ риска здоровью, **13** (1), 15 (2016).
- [50] А. В. Виноградова, М. Р. Сидорова. *Экспертиза. Качество. Технологии. Сб. матер. Междунар. научно-практической конф.* (Новосибирск, 2020), с. 229–233.
- [51] В.В. Гаврушко, О.Р. Кадриев. Вестник Новгородского гос. ун-та им. Ярослава Мудрого, **2** (114), 4 (2019).
- [52] В.Н. Краснощекова, Н.В. Илюхин, С.С. Романова, Л.Х. Ахметова. Гигиена труда и медицинская экология, **3**, 98 (2015).