

15

Фоторезистор инфракрасного излучения на основе кремния с нанокластерами атомов марганца

© М.К. Бахадирханов, Ш.Н. Ибодуллаев[¶], Н.Ф. Зикриллаев, С.В. Ковешников

Ташкентский государственный технический университет, Ташкент, Узбекистан

[¶] E-mail: shakhboz.ibodullayev.92@inbox.ru

Поступило в Редакцию 13 октября 2020 г.

В окончательной редакции 30 марта 2021 г.

Принято к публикации 1 апреля 2021 г.

Показана возможность использования кремния с нанокластерами атомов марганца для создания фоторезисторов в области спектра $\lambda = 1.2\text{--}3\ \mu\text{m}$. Установлено, что такие фотоприемники обладают пороговой чувствительностью порядка $10^{-11}\ \text{W}$ на длине волны $1.55\ \mu\text{m}$. Квантовая эффективность на длине волны $2\ \mu\text{m}$ превышает 10% и составляет 0.1% на длине волны $2.5\ \mu\text{m}$, что позволяет использовать примесную фоточувствительность кремния с нанокластерами атомов марганца для создания высокоразрешающих матричных фотоприемников, работающих в спектральном диапазоне до $2.5\ \mu\text{m}$.

Ключевые слова: кремний, кластер марганца, фоточувствительность.

DOI: 10.21883/PJTF.2021.13.51114.18582

Фотоприемники ИК-излучения диапазона $\lambda = 10\text{--}2.5\ \mu\text{m}$ востребованы преимущественно в качестве матричных телевизионных устройств для создания тепловизоров [1]. В матрицах, работающих на собственном внутреннем фотоэффекте, применяются такие материалы, как PbS, PbSe, InSb, $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{Bi}_z\text{Sb}_{1-y-z}/\text{InSb}$, (CdHg)Te и др. [1–4]. Однако создание высокоразрешающих матриц непосредственно на основе этих материалов практически невозможно, так как требуется их стыковка с кремниевыми усилительными и управляющими элементами. В то же время возможности кремния для создания фотоприемников на основе примесного фотоэффекта далеко не исчерпаны.

В этом плане представляет интерес кремний с нанокластерами атомов марганца. Как показано в работе [5], при определенных соотношениях концентрации нанокластеров N_c и концентрации носителей заряда p -типа ($N_c \gg p$) могут образовываться примесные минизоны, которые могут привести к существенному расширению спектральной области чувствительности кремниевой матрицы.

В связи с этим цель настоящей работы состоит в том, чтобы показать возможность создания фотоприемников на основе кремния с нанокластерами атомов марганца, пригодных для получения высокоразрешающих монокристаллических фотоприемников, и определить их основные параметры.

В качестве исходного материала использовался монокристаллический кремний p -типа, легированный бором, с удельным сопротивлением $\rho = 3\ \Omega \cdot \text{cm}$ (концентрация дырок $p = 7 \cdot 10^{15}\ \text{cm}^{-3}$). Легирование марганцем проводилось методом „низкотемпературной“ диффузии [6]. Условия диффузии подбирались таким образом, чтобы получить практически полностью компенсированный кремний p -типа с удельным сопротивле-

нием $\rho = 5 \cdot 10^3\text{--}5.8 \cdot 10^4\ \Omega \cdot \text{cm}$. В таких образцах атомы марганца находятся преимущественно в двукратно ионизованном виде (Mn^{++}). Кроме того, согласно [7], обеспечиваются высокое зарядовое состояние кластеров, имеющих структуру типа Mn_4V , и условие образования минизон.

Электрические параметры образцов были исследованы методом эффекта Холла. Для исследования спектральной зависимости фотопроводимости использовался монохроматор на основе установки ИКС-21, снабженной криостатом (температура образцов в процессе измерений находилась в диапазоне 95–105 К). Чтобы исключить попадание рассеянного в монохроматоре, а также фонового излучения на образец, использованы фильтры из двусторонне полированных кремниевых пластин толщиной $d \sim 380\ \mu\text{m}$, которые устанавливались на входе монохроматора и непосредственно в окошке криостата. Мощность падающего на образец излучения в этих измерениях поддерживалась постоянной и составляла $6.5 \cdot 10^{-6}\ \text{W}$.

На рис. 1, а показана типичная спектральная зависимость фототока образцов кремния с нанокластерами атомов марганца, измеренная в области „примесной“ фотопроводимости при наличии электрического поля в образце $6.5\ \text{V/cm}$.

Как видно из рисунка, фотоответ в таких образцах начинается при $h\nu = 0.16\ \text{eV}$ ($\lambda = 8\ \mu\text{m}$). При этом наблюдается три области спектральной чувствительности, которые существенно отличаются друг от друга. Первая область — $h\nu = 0.16\text{--}0.4\ \text{eV}$, значение фототока монотонно увеличивается в указанной области спектра почти на два порядка. Вторая область — $h\nu = 0.4\text{--}0.6\ \text{eV}$ ($\lambda = 3.1\text{--}2.06\ \mu\text{m}$), в этом диапазоне значение фототока увеличивается почти на 5.5 порядка, т.е. имеет место аномально большое изменение фототока (в ин-

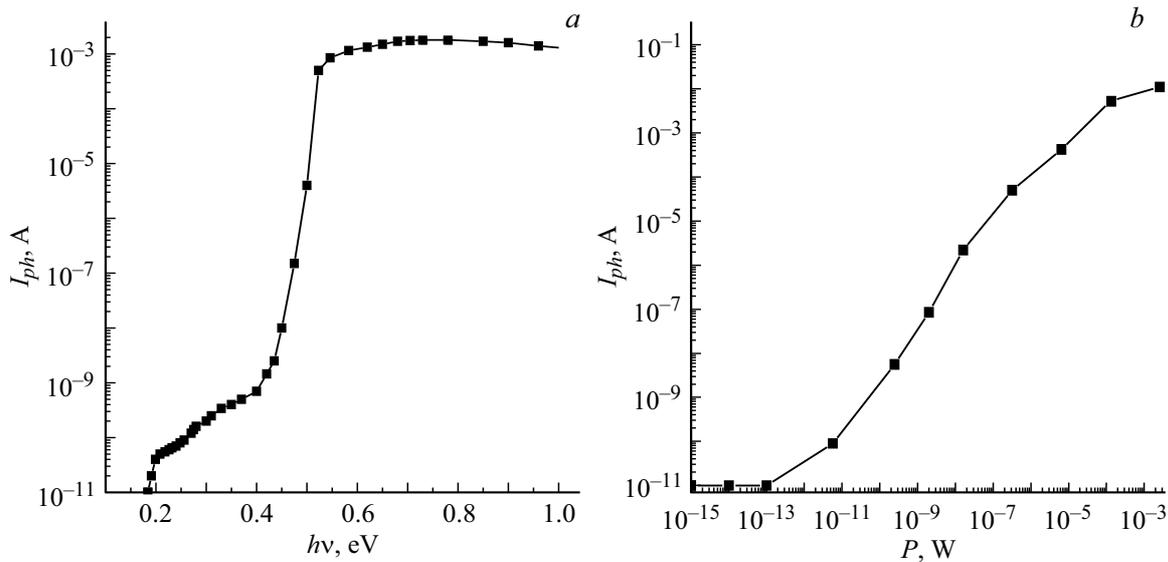


Рис. 1. Характеристики фоторезистора. *a* — типичная спектральная зависимость фототока фоторезистора; *b* — зависимость фототока от мощности падающего излучения при энергии квантов $h\nu = 0.78$ eV.

тервале всего $\Delta h\nu = 0.2$ eV). В третьей области — $h\nu = 0.6–1$ eV ($\lambda = 2.06–1.2$ μm) — фототок сохраняет anomalously большое значение ($\sim 10^{-3}$ A) и практически не зависит от энергии фотона.

Такие спектральные зависимости фоточувствительности имеют образцы с удельным сопротивлением $\rho = 5 \cdot 10^3–2 \cdot 10^4$ $\Omega \cdot \text{cm}$ (при $T = 300$ K), а самая высокая фоточувствительность наблюдается в образцах с удельным сопротивлением $\rho = (5–8) \cdot 10^3$ $\Omega \cdot \text{cm}$. Это означает, что на основе кремния с нанокластерами атомов марганца можно получить резистивные фотоприемники, работающие в широком интервале ИК-спектра (до $\lambda = 8$ μm).

На основе исследованных образцов с $\rho = (5–8) \cdot 10^3$ $\Omega \cdot \text{cm}$ были разработаны и изготовлены фотоприемники с никелевыми химически осажденными контактами и фоточувствительной площадью 4×2 mm, далее приводится методика измерения их основных параметров.

Для исследования пороговой чувствительности фотоприемника интенсивность падающего света изменялась с помощью кремниевых фильтров, работающих как ослабители излучения. Ослабление излучения происходит как за счет диэлектрического отражения от передней и задней поверхностей, так и за счет поглощения. Использовались до 10 штук двусторонне полированных кремниевых пластин с толщиной $d \sim 380$ μm , которые устанавливались последовательно (с расстоянием между фильтрами 2 mm) перед монохроматором спектрометра ИКС-21. Фильтры располагались в корпусе, полностью устраняющем возможное фоновое освещение фильтров, которое может привести к изменению их пропускания.

Интенсивность падающего ИК-излучения без фильтров определялась измерителем мощности ИМО-2Н.

С помощью отдельных измерений показано, что каждый фильтр уменьшает мощность излучения в 20 раз. Таким образом, использование до 10 фильтров последовательно позволило нам изменять мощность излучения в интервале $P = 10^{-13}–10^{-3}$ W. Зависимость фототока фоторезистора от мощности падающего излучения ($h\nu = 0.78$ eV) показана на рис. 1, *b*.

Как видно из рисунка, в интервале мощности падающего излучения $P = 10^{-11}–10^{-4}$ W зависимость фототока фоторезистора соответствует теоретической (линейной) зависимости от мощности, а отклонения, наблюдающиеся при $P > 10^{-4}$ W, могут быть связаны с изменением пропускания первого фильтра за счет фонового освещения и излучения глобара. Поскольку мощность монохроматического излучения пропорциональна количеству квантов света в единицу времени (через энергию фотонов), а фототок также пропорционален количеству квантов света в единицу времени (через квантовый выход), между фототоком и мощностью монохроматического излучения должна наблюдаться линейная зависимость.

Пороговая чувствительность была оценена по графику (рис. 1, *b*) путем сравнения темного тока прибора (что по порядку величины соответствует уровню шума) с экстраполированной величиной фототока. Установлено, что разработанный фоторезистор на основе Si с нанокластерами имеет пороговую чувствительность по мощности порядка $P \sim 10^{-11}$ W (при $T = 100$ K) на длине волны 1.55 μm , что лучше, чем для кремниевых фотоприемников, полученных с помощью других технологий [8] на этой длине волны ИК-излучения.

Исследовалась спектральная зависимость токовой чувствительности разработанного фотоприемника. На рис. 2, *a* показана спектральная зависимость то-

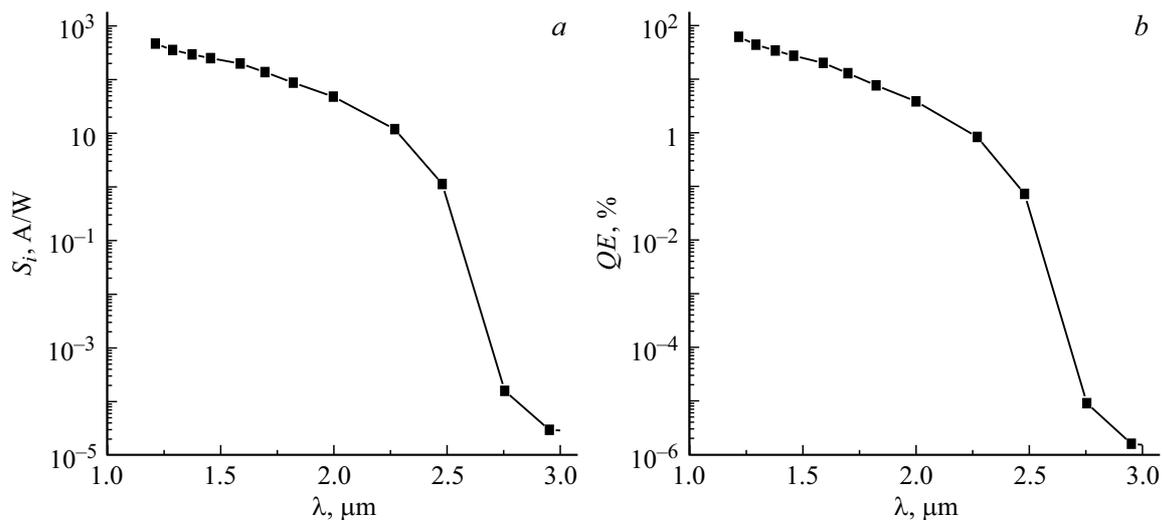


Рис. 2. Спектральные зависимости фоторезистора. *a* — зависимость токовой чувствительности, *b* — зависимость квантового выхода.

ковой чувствительности фотоприемника в области $\lambda = 1.2\text{--}3 \mu\text{m}$ при напряженности электрического поля $\sim 6.25 \text{ V/cm}$. Для длины волны $1.2\text{--}1.6 \mu\text{m}$ токовая чувствительность достигает $S \sim 500\text{--}100 \text{ A/W}$, в интервале $\lambda = 1.6\text{--}2.3 \mu\text{m}$ она уменьшается от 100 до 10 A/W, далее на длине волны $2.5 \mu\text{m}$ токовая чувствительность спадает до $S = 1.15 \text{ A/W}$, оставаясь достаточно высокой для практического применения, а затем быстро уменьшается с ростом длины волны ИК-излучения.

Токовая чувствительность данного фотоприемника, достигающая сотен A/W в области спектра $1.2\text{--}1.6 \mu\text{m}$, превосходит фоточувствительность инфракрасных фотодиодов (токовая чувствительность для $p\text{--}i\text{--}n$ -фотодиодов в рабочем диапазоне длин волн составляет $0.5\text{--}0.8 \text{ A/W}$, а для лавинных фотодиодов достигает $20\text{--}60 \text{ A/W}$ [9]).

Квантовая эффективность является одним из основных параметров фотоприемника. Квантовая эффективность (QE) — физическая величина, равная отношению числа носителей заряда (N_p), образованных при освещении образца, к общему числу поглощенных фотонов (N_{ph}).

Поскольку точное значение коэффициента усиления фоторезистора неизвестно, квантовый выход вычислялся относительно квантового выхода собственного фотоэффекта с использованием токовой чувствительности. На рис. 2, *b* представлена расчетная зависимость QE фотоприемника от длины волны падающих фотонов. Квантовый выход в области собственного поглощения считался равным 85%.

Как видно из рис. 2, *b*, разработанный фоторезистор на основе кремния с нанокластерами атомов марганца обеспечивает квантовую эффективность QE порядка 10% до длины волны $2 \mu\text{m}$ и около 0.1% на длине волны $2.5 \mu\text{m}$. Это позволяет использовать примесную чувствительность кремния с нанокластерами атомов марганца

для создания высокоразрешающих матричных фотоприемников на основе кремния в диапазоне до $2.5 \mu\text{m}$.

Для оценки быстродействия фотоприемника исследовался временной отклик тока фоторезистора на импульсную модуляцию света. Для измерения тока использовалась низкоомная (100Ω) нагрузка. В качестве модулятора использовался вращающийся с частотой 3000 rpm металлический диск диаметром 150 mm со щелями шириной 1 mm по его краю, установленный вплотную к входной щели монохроматора. При ширине щели монохроматора 1 mm импульсы света имеют треугольную форму и обладают длительностью на полувысоте около $80 \mu\text{s}$. Быстродействие фотоприемников в области спектра $\lambda = 1.7\text{--}3 \mu\text{m}$, оцененное по двухлучевой осциллограмме импульсов тока, имеет порядок единиц микросекунд. Оценивался сдвиг фазы импульсов тока фоторезистора относительно опорных импульсов тока, генерируемых фотодиодом ФД-256 с обратным смещением 10 V на нагрузке сопротивлением 100Ω . Освещение фотодиода производилось лазером красного света. В области $\lambda = 1.2\text{--}1.7 \mu\text{m}$ быстродействие определялось по длительности затухания фотопроводимости (т.е. по спаду импульса тока фоторезистора в e раз) и составляло сотни миллисекунд. Причины столь существенного различия быстродействия в зависимости от спектрального диапазона излучения не совсем ясны, и требуются дополнительные исследования.

Таким образом, установлено, что кремний с нанокластерами Mn позволяет создавать высокочувствительные примесные фоторезисторы в ИК-области спектра с параметрами не хуже, чем у существующих ИК-фотоприемников типа $p\text{--}i\text{--}n$ и лавинных диодов на основе твердых растворов A^3B^5 . Особо следует подчеркнуть, что технология таких фотоприемников совместима с технологией кремниевых интегральных схем, и соответственно они могут использоваться при создании охлаждаемых вы-

сокоразрешающих монолитных матричных приемников ближнего ИК-диапазона.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] М.А. Трищенко, И.И. Таубкин, А.М. Филачев, *Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы*, № 1 (224), 31 (2010).
- [2] Е. Певцев, В. Чернокижин, *Электронные компоненты*, № 1-3, 12 (2001).
- [3] В.И. Стафеев, К.О. Болгарь, *ФТП*, **39** (10), 1257 (2005).
- [4] В. Волков, *Электронные компоненты*, № 1, 1 (2008).
- [5] М.К. Бахадырханов, К.С. Аюпов, Г.Х. Мавлянов, Х.М. Илиев, С.Б. Исамов, *Микроэлектроника*, **39** (6), 426 (2010).
- [6] Б.А. Абдурахманов, К.С. Аюпов, М.К. Бахадырханов, Х.М. Илиев, Н.Ф. Зикрилласев, З.М. Сапарниязова, *Доклады АН Республики Узбекистан*, № 4, 32 (2010).
- [7] М.К. Бахадырханов, Г.Х. Мавлонов, С.Б. Исамов, Х.М. Илиев, К.С. Аюпов, З.М. Сапарниязова, С.А. Тачилин, *Неорганические материалы*, **47** (5), 545 (2011).
- [8] А.К. Будтолаев, А.К. Будтолаева, Н.В. Кравченко, П.Е. Хакуашев, И.В. Чинарёва, М.А. Трищенко, *Успехи прикладной физики*, **6** (6), 494 (2018).
- [9] М.Л. Бараночников, *Приемники и детекторы излучений: справочник* (ДМК Пресс, М., 2012).