

Д. ф.-м. н. А. В. КАРИМОВ, к. ф.-м. н. Д. М. ЁДГОРОВА,  
О. А. АБДУЛХАЕВ, Ф. А. ГИЯСОВА, Ж. Т. НАЗАРОВ

Республика Узбекистан, г. Ташкент, НПО «Физика–Солнце»;  
Навоийский государственный горный институт  
E-mail: karimov@uzsci.net; navggi@intal.uz

Дата поступления в редакцию  
02.02— 15.10 2009 г.

Оппонент к. т. н. Я. Я. КУДРИК  
(ИФП им. В. Е. Лашкарёва, г. Киев)

## МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ГОМОПЕРЕХОДНАЯ АРСЕНИД-ГАЛЛИЕВАЯ $n-p-m$ -СТРУКТУРА

*Приведены особенности технологии изготовления и фотоэлектрических характеристик обратновключенной  $n-p-m$ -структуры на основе арсенида галлия.*

Необходимость улучшения параметров полупроводниковых структур, перспективных для использования в микро- и оптоэлектронике, в частности структур с прямо- и обратновключенными ( $p-n-p$  и  $n-p-n$ ) гомо- и гетеропереходами, требует исследования их характеристик [1–7]. При этом возможность варьировать параметры базовой  $p^0-n^0$ -области GaAs-диодов, изготовленных из  $p^+-p^0-n^0-n^+$ -структур, открывает перспективы развития новых направлений как в физике и технике полупроводниковых приборов на основе GaAs-структур, так и в новых областях техники и технологии сверхвысокочастотных и сверхширокополосных систем и устройств, оперирующих импульсными сигналами пикосекундной длительности.

В работе [3] для увеличения диапазона рабочих частот  $p^+-i-n^+$ -структуры было продублировано отражение  $i-n^+$ -перехода в интегрированной  $n^+-i-p^+-i-n^+$ -структуре. В аналогичных  $p^+-n-n^+$ -структурах на основе поликристаллического кремния [4] было получено инжекционное усиление фототока в 250 раз. Поскольку структуры имеют  $S$ -образную вольт-амперную характеристику, эффект усиления реализуется в режиме прямого смещения.

Авторы [5] на основе комбинации прямо- и обратновключенных гетеропереходов создали светоизлучающие тиристорные  $nGaSb-pGaSb-nGaInAsSb-PAlGaAsSb-pGaSb$ -структуры с максимумом излучения на длине волны  $\lambda=1,95$  мкм. При этом их средняя оптическая мощность достигала 2,5 мВт, а пиковая мощность в импульсном режиме — 71 мВт и превышала в 2,9 раза величину мощности, полученную для стандартного  $nGaSb/nGaInAsSb/PAlGaAsSb$ -светодиода, излучающего в том же спектральном диапазоне.

В работе [8] была реализована  $pSi-n^+ZnO-nZnO-Pd$ -структура, позволяющая принимать световые сигналы. Каждый элемент этой структуры в отдельности ( $pSi-n^+ZnO$  и  $nZnO-Pd$ ) обладал свойствами солнечного элемента и детектора водорода. При возбуждении интегрированной структуры в области собственного поглощения кремния создавался фототок, обус-

ловленный генерацией электронно-дырочных пар на гетерогранице  $pSi-n^+ZnO$ . Относительно рабочего напряжения один переход смещен в прямом направлении, а другой — в обратном. В структуре с аналогичными переходами, т. е. в биполярном транзисторе с барьером Шоттки в коллекторном переходе, можно управлять коэффициентом усиления и квантовым выходом, изменяя толщину базовой области [6].

Таким образом, увеличение частотного диапазона и фоточувствительности полупроводниковых структур в заданном спектральном диапазоне является на сегодня актуальной задачей. Для этого используются приемы модификации структур с прямо- и обратновключенными переходами и варьирование параметров базовой области.

В настоящей работе приведены особенности технологии изготовления и фотоэлектрических характеристик обратновключенной  $n-p-m$ -структуры на основе арсенида галлия.

### Выбор параметров $n-p-m$ -структуры для изготовления экспериментальных образцов

Несмотря на то, что к настоящему времени исследователями создаются разновидности структур с прямо- и обратновключенными переходами, остаются нерешенными проблемы комплексного улучшения их параметров, т. к. улучшение одного параметра приводит к ухудшению другого параметра. Так, использование новой технологии выращивания нанослоев и квантовых точек в  $p^+-ii-p^+$ -структуре с прямовключенными переходами позволило получить высокую фоточувствительность в инфракрасной области спектра [9]. Основу фотоприемника составляет трехслойная структура на основе Si с квантовыми точками из Ge, повторяющаяся 8 раз. В главном максимуме фотопроводимости, приходящемся на длину волны излучения больше 20 мкм, обнаружительная способность достигала  $1,7 \cdot 10^8$  см $\cdot$ Гц $^{1/2}$ /Вт, что несколько меньше, чем в ИК-детекторах на основе барьеров Шоттки PtSi- $pSi$  ( $10^{10}$  см $\cdot$ Гц $^{1/2}$ /Вт) [10].

Как альтернативный вариант фотоприемников на ближний ИК-диапазон были предложены биполярные  $n^+-p-n^+$  Ge/Si фототранзисторы с плавающей базой из двенадцати слоев Ge, встроенных в  $p$ -область кремния. В этих фототранзисторах при засветке со стороны плоскости  $p-n$ -переходов реализуется максимальная квантовая эффективность (3% на длине волны 1,3 мкм) [11]. Общими для упомянутых структур яв-

ляются критерии выбора базовой области, в частности, они выбираются как можно более высокоомными. В результате остается проблематичным повышение эффективности структур. Кроме того, в процессе образования фототока в этих структурах доминирует один тип носителей.

Эти проблемы остаются нерешенными и в гетеропереходных транзисторах. Так, в работе [6] предлагается фототранзисторная гетероструктура на основе композиции  $n\text{InP}-p\text{InGaAsP}-\text{Au}$  с барьером Шоттки. Как показано в энергетической зонной диаграмме (рис. 1, а), ее эмиттерная область  $n$ -типа является широкозонной, а базовая область  $p$ -типа — узкозонной. Рабочим является режим запираания  $p\text{InGaAsP}-\text{Au}$ -барьера. Приложение напряжения в темноте вызывает перетекание малого количества электронов (основных носителей) из эмиттера в коллектор. При освещении генерируемые в области объемного заряда дырки собираются у  $n-p$ -барьера, и лишь генерированные электроны достигают коллекторного контакта. Собирающиеся дырки создают нескомпенсированный положительный объемный заряд, уменьшающий потенциальный барьер  $n-p(+)$ -перехода «эмиттер—база» и резко увеличивающий поток дырок из эмиттера в базу.

В другой работе [7] предлагается фототранзисторная гетероструктура с варизонной базовой областью, полученная методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Коллектор выполнен из высокоомного  $n\text{GaAs}$ , а широкозонный эмиттер — из  $n\text{Al}_{0,45}\text{Ga}_{0,55}\text{As}$  с запрещен-

ной зоной шириной  $E_g=2$  эВ. Состав сильнолегированной базовой области изменяется от  $p\text{GaAs}$  у коллекторного перехода до  $n\text{Al}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{As}$  ( $E_g=1,8$  эВ). Как видно из энергетической зонной диаграммы (рис. 1, б), небольшой пик в зоне проводимости на границе эмиттерного перехода должен предотвратить обратную инжекцию электронов в эмиттер. Заметим, что в данной структуре имеются те же недостатки, что и в фототранзисторной гетероструктуре с барьером Шоттки. Кроме того, преимущества варизонной структуры реализуются при очень больших значениях входного сигнала, т. к. частотный диапазон фототранзистора определяется не временем пролета, а временем перезарядки емкостей эмиттера и коллектора.

Анализ упомянутых работ показывает, что для выяснения путей устранения перечисленных недостатков целесообразно исследовать гомопереходную структуру с различными базовыми областями. Для этого были изготовлены специальные  $n\text{GaAs}-p\text{GaAs}-\text{Ag}$ -структуры. В них для повышения фоточувствительности базовая область расположена под потенциальным барьером. Гомопереход  $n-p$  получен выращиванием из жидкой фазы эпитаксиального слоя  $p\text{GaAs}$  на подложке  $n\text{GaAs}$ , легированного теллуром до концентрации носителей  $2,10^{16}$   $\text{см}^{-3}$ . Концентрация же носителей в эпитаксиальном слое  $p\text{GaAs}$  толщиной 1,5  $\mu\text{м}$  составляла  $5 \cdot 10^{17}$   $\text{см}^{-3}$ . С тыльной стороны подложки  $n\text{GaAs}$  толщиной 400  $\mu\text{м}$  был нанесен напылением в вакууме омический контакт на основе сплава  $\text{In}+\text{Sn}$ , а на поверхности эпитакси-

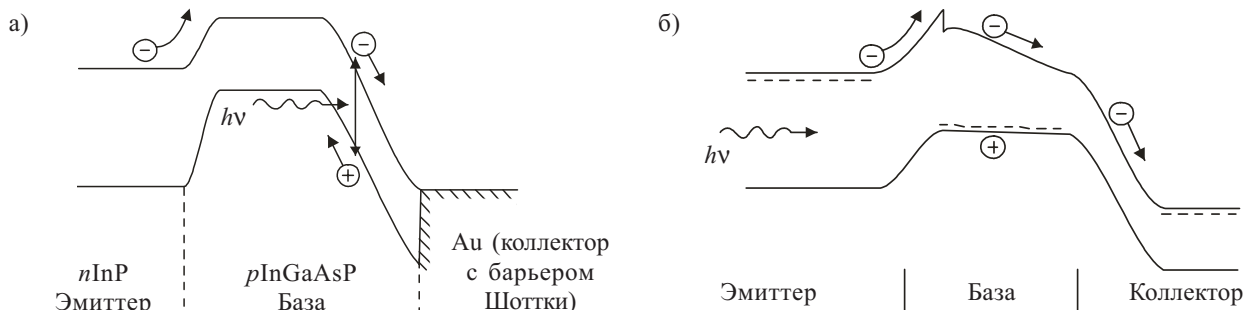


Рис. 1. Энергетические зонные диаграммы фототранзисторов с гетеропереходом (а) и варизонной базовой областью (б)

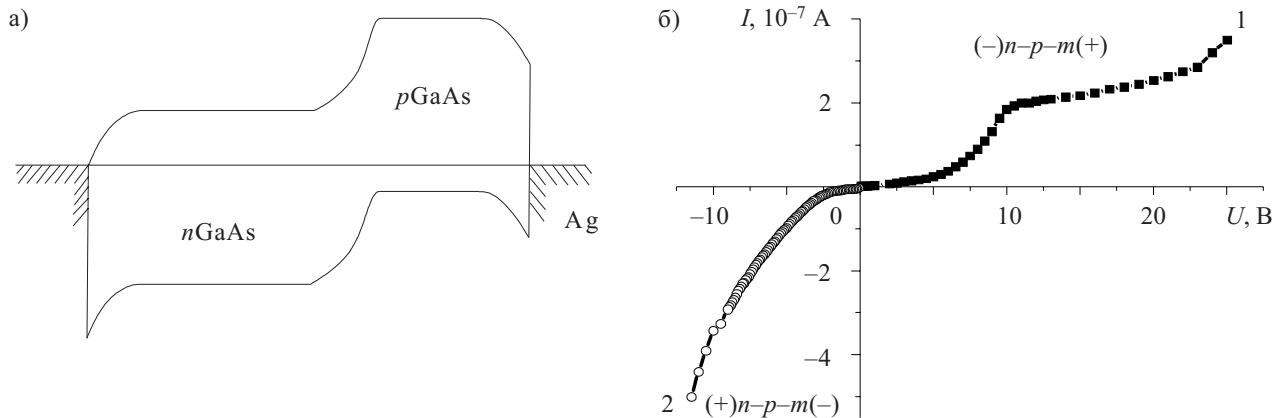


Рис. 2. Качественная энергетическая зонная диаграмма  $n\text{GaAs}-p\text{GaAs}-\text{Ag}$ -структуры с гомопереходом в равновесном состоянии и ее вольт-амперная характеристика

ального слоя был сформирован выпрямляющий потенциальный барьер из полупрозрачного Ag. Площадь структуры составляла 24 мм<sup>2</sup>. В отличие от известных структур, в полученной арсенид-галлиевой *n-p-m*-структуре, аналоге биполярного *n-p-n*-транзистора с плавающей базой, при любой полярности напряжения слой объемного заряда расширяется в одном направлении — в сторону контакта эмиттера: от металла в *p*-слой и от *p*-области вглубь *nGaAs*-подложки. Энергетическая зонная диаграмма предложенной структуры приведена на рис. 2, а. Как видно, от приложенного напряжения поочередно запираются *nGaAs-pGaAs* и *pGaAs-Ag*-переходы.

Известно [11], что фотоэлектрические характеристики биполярной транзисторной структуры на основе традиционных переходов (*p-n-p* и *n-p-n*) исследуются лишь при одной полярности рабочего напряжения, в режиме запирающего фотоприемного коллекторного перехода, когда базовая область остается в плавающем режиме. В исследуемой специальной *n-p-m*-структуре фоточувствительность обеспечивается при обеих полярностях включения. Поэтому условно за прямое направление принято прямосмещающее *n-p*-переход включение внешнего напряжения, а за обратное направление — запирающее *n-p*-переход включение. Соответствующая вольт-амперная характеристика *n-p-m*-структуры приведена на рис. 2, б.

Таким образом, в полученной арсенид-галлиевой *n-p-m*-структуре, в отличие от известных биполярных аналогов, меньшее значение концентрации носителей в *n*-области по сравнению с *p*-областью толщиной в 1,5 мкм приводит к тому, что слой объемного заряда *n-p*-перехода расширяется вглубь эмиттерной *n*-области.

**Фотоэлектрические характеристики *n-p-m*-структуры на основе арсенида галлия**

Темновые и световые характеристики структуры в прямом и обратном режимах включения приведены на рис. 3. В (*-n-p-m(+)*)-режиме (рис. 3, а) вольт-амперную характеристику можно разбить на два участка. На первом участке наблюдается нелинейное увеличение протекающего тока на два порядка (от  $2 \cdot 10^{-9}$  до  $2 \cdot 10^{-7}$  А), которое сменяется близкой к линейной зависимостью с незначительным возрастанием. Такой ход вольт-амперной характеристики обусловлен процессом запирающего базовой области из эпитаксиального слоя *pGaAs* и свидетельствует о сложном характере механизма токопереноса. В режиме (*+n-p-m(-)*) (рис. 3, б) в интервале напряжения 0—12 В наблюдается рост обратного тока (от  $4 \cdot 10^{-9}$  до  $4 \cdot 10^{-7}$  А) с замедляющимся характером, связанный с запирающим *n-p*-переходом. Здесь токоперенос обусловлен генерацией носителей в слое объемного заряда *n-p*-перехода.

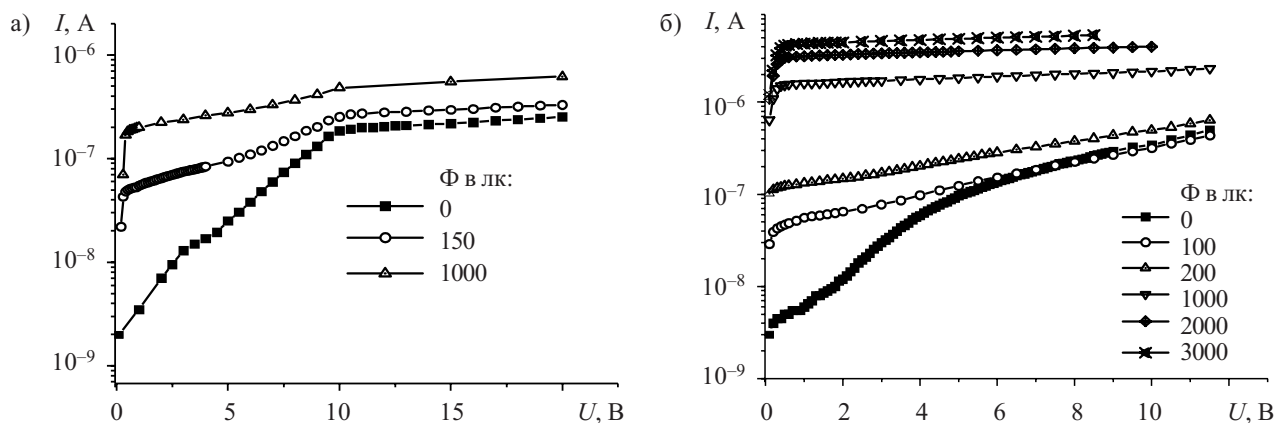


Рис. 3. Световые характеристики исследуемой структуры в режиме прямого (а) и обратного (б) смещения *n-p*-перехода при разной освещенности

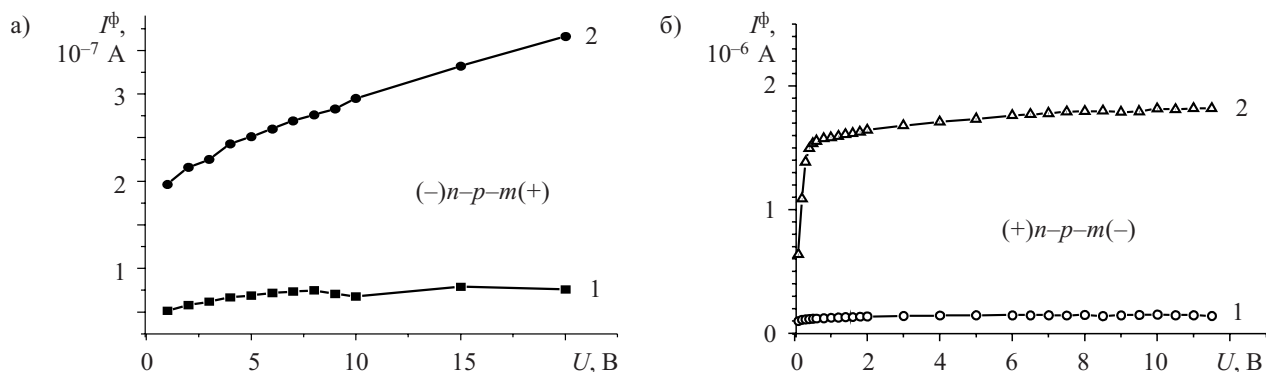


Рис. 4. Фототоки в гомопереходной структуре в режиме прямого (а) и обратного (б) смещения *n-p*-перехода при различной освещенности: 1 — 150 лк; 2 — 1000 лк

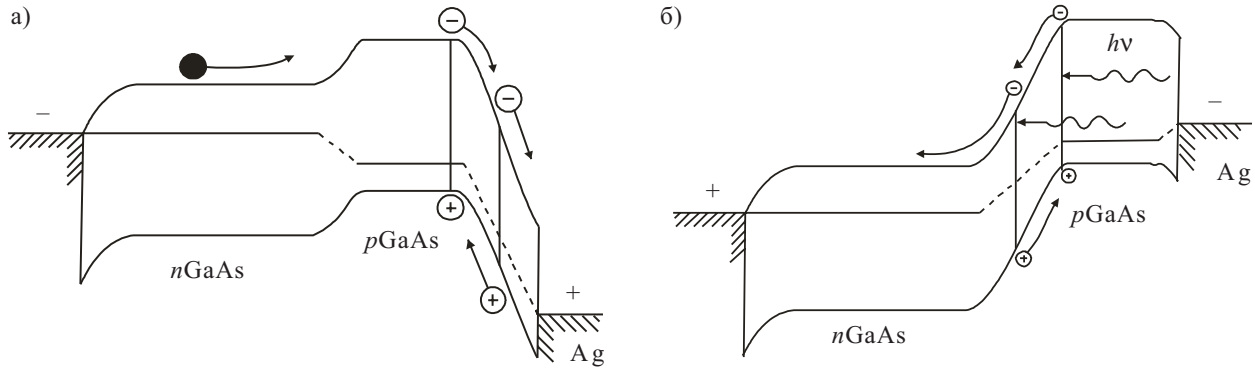


Рис. 5. Качественная энергетическая зонная диаграмма  $n\text{GaAs-pGaAs-Ag}$ -структуры при различных режимах включения:

*a* — прямого смещения; *б* — обратного смещения

При возбуждении структуры световым излучением от вольфрамовой лампы в режиме прямого смещения (рис. 4, *a*) фототок (разность значений светового и темнового токов) с увеличением напряжения увеличивается, т. е. имеет место внутреннее фотоэлектрическое усиление. Увеличение освещенности приводит к более резкому возрастанию фототока. Чем больше рабочее напряжение, тем больше коэффициент фотоэлектрического усиления.

При смене полярности рабочего напряжения (режим обратного смещения), когда происходит запирающее полупроводникового  $n-p$ -перехода, фототок не зависит от величины напряжения, но увеличивается пропорционально интенсивности светового сигнала. Чем больше интенсивность освещения, тем больше фототок. Наблюдаемую зависимость можно объяснить фототранзисторным эффектом, имеющим место в биполярном транзисторе с плавающей базой [12, с. 181—192].

Следует отметить, что в режиме фотоэлектрического усиления (рис. 4, *a*) фототок почти на порядок меньше, чем в фототранзисторном режиме (рис. 4, *б*). Как показывает энергетическая зонная диаграмма, в режиме прямого смещения  $n-p$ -перехода фотогенерированные дырки скапливаются в  $n-p$ -барьере (рис. 5, *a*). Фототок создается генерированными электронами. В случае запирающего  $n-p$ -перехода (рис. 5, *б*) в образовании фототока участвуют и электроны, и дырки, поэтому в этом режиме фототок больше. Другое отличие состоит в том, что в фототранзисторном режиме генерация фотоносителей осуществляется как из базовой области ( $p\text{GaAs}$ ), так и из области объемного заряда  $n-p$ -перехода. В режиме  $(-n-p-m(+))$  генерация фотоносителей осуществляется лишь из области объемного заряда барьера «металл—полупроводник».

\*\*\*

Таким образом, исследования фотоэлектрических характеристик показали, что предложенная гомопереходная  $n-p-m$ -структура на основе арсенида галлия в зависимости от режима включения может выполнять функцию как усилителя или приемника оптических сигналов (прямое смещение), так и оптического трансформатора (обратное смещение).

Такая многофункциональность структуры обуславливается совместным обеспечением процессов модуляции базовой области и генерации фотоносителей из области объемного заряда  $n-p$ -перехода, а также реализацией условий генерации фотоносителей барьером Шоттки.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Козлов В. А., Рожков А. В., Кардо-Сысоев А. Ф. Ударно-ионизационный волновой пробой и генерация пикосекундных сверхширокополосных и сверхвысокочастотных импульсов в дрейфовых диодах на основе GaAs с резким восстановлением // ФТП.— 2003.— Т. 37, вып. 12.— С. 1480—1481.
2. Транзисторы. Параметры, методы измерений и испытаний / Под ред. И. Г. Бергельсона, Ю. А. Каменецкого, И. Ф. Николаевского.— М.: Сов. радио, 1968. (<http://dvo.-sut.ru/libr/eqp/i001eqp1/2.htm>)
3. Fangmin Guo, Aizhen Li, Yanlan Zheng et al. DC and RF characteristics of MBE grown GaAs barrier diode // Journal of Crystal Growth.— 2001.— Vol. 227.— P. 223—227.
4. Алиев Р. Инжекционное усиление фототока в поликристаллических кремниевых  $p^+-n^-$ -структурах // ФТП.— 1997.— Т. 31, вып. 4.— С. 425—426.
5. Стоянов Н. Д., Журтанов Б. Е., Именков А. Н. и др. Высокоэффективные светодиоды на основе тиристорной гетероструктуры 11 типа  $n\text{-GaSb/p-GaSb/n-GaInSb/P-AlGaAsSb}$  // ФТП.— 2007.— Т. 41, вып. 7.— С. 878—882.
6. Sakai A., Naitoh M., Kobayashi M., Umeno M. InGaAsP/InP phototransistor-based detectors // IEEE Trans. Electron Devices ED-30.— 1983.— N 4.— P. 404—408.
7. Capasso F., Tsang W. T., Bethea C. G. et al. New graded band-gap picosecond phototransistor // Appl. Phys. Lett.— 1983.— N 42.— P. 93—95.
8. Солободчиков С. В., Салихов Х. М., Руссу Е. В., Малинин Ю. Г. Гашение тока светом в диодных структурах  $p\text{-Si-n}^+\text{-ZnO-n-ZnO-Pd}$  // ФТП.— 2001.— Т. 35, вып. 4.— С. 479—481.
9. Якимов А. И., Двуреченский А. В., Никифоров А. И., Прокураков Ю. Ю. Германий-кремниевые фотоприемники на квантовых точках // Природа.— 2001.— № 10.— С. 112. ([vivovoco.rsl.ru/VV/NEWS/PRIRODA/2001/PR\\_10\\_01.HTM](http://vivovoco.rsl.ru/VV/NEWS/PRIRODA/2001/PR_10_01.HTM)).
10. Войцеховский А. В., Коханенко А. П., Несмелов С. Н. и др. Пороговые характеристики ИК-фотоприемников на основе барьеров Шоттки PtSi- $p$ -Si с высоколегированным поверхностным слоем // Прикладная физика.— 2002.— № 6.— С. 67—73.
11. Якимов А. И., Двуреченский А. В., Кириенко В. В., Никифоров А. И. Ge/Si-фотодиоды и фототранзисторы со встроенными слоями квантовых точек Ge для волоконно-оптических линий связи // ФТТ.— 2005.— Т. 47, вып. 1.— С. 37—40.
12. Полупроводниковые приборы и их применение / Под ред. Я. А. Федотова. Вып. 25.— М.: Сов. радио, 1971.