

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 n GaSb- p GaSb- n GaInAsSb- PAI GaAsSb- p GaSb-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 n GaSb/ n GaInAsSb/ PAI GaAsSb-светодиода, излучающего в том же спектральном диапазоне.

В работе [8] была реализована p Si- n^+ ZnO- n ZnO-Pd-структура, позволяющая принимать световые сигналы. Каждый элемент этой структуры в отдельности (p Si- n^+ ZnO и n ZnO-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 p Si- 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- p Si (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 (неосновных 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 $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Концентрация же носителей в эпитаксиальном слое $p\text{GaAs}$ толщиной 1,5 мкм составляла $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. С тыльной стороны подложки $n\text{GaAs}$ толщиной 400 мкм был нанесен напылением в вакууме омический контакт на основе сплава $\text{In}+\text{Sn}$, а на поверхности эпитакси-

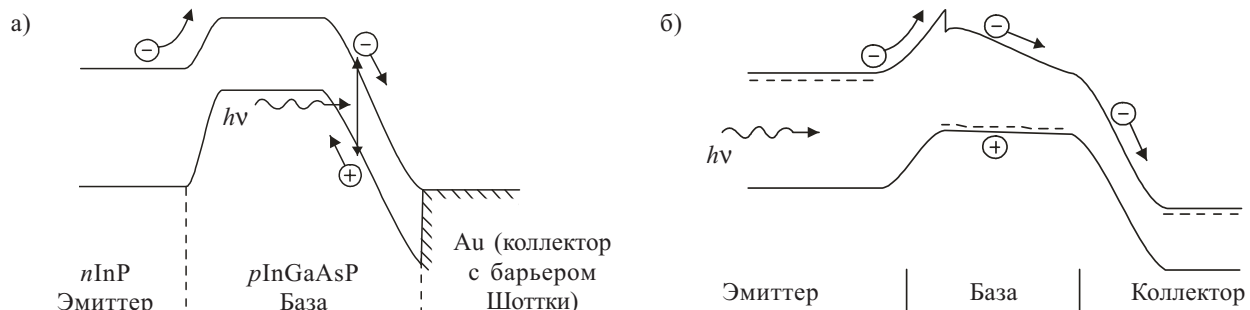


Рис. 1. Энергетические зонные диаграммы фототранзисторов с гетеропереходом (а) и варизонной базовой областью (б)

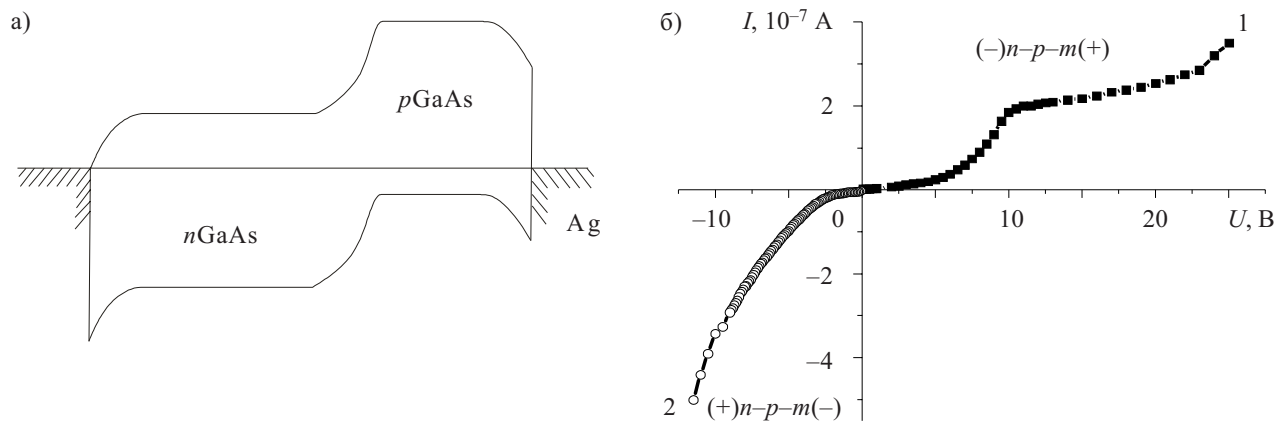


Рис. 2. Качественная энергетическая зонная диаграмма $n\text{GaAs}-p\text{GaAs}-\text{Ag}$ -структуры с гомопереходом в равновесном состоянии и ее вольт-амперная характеристика

ального слоя был сформирован выпрямляющий потенциальный барьер из полупрозрачного Ag. Площадь структуры составляла 24 мм². 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 запирающей 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.

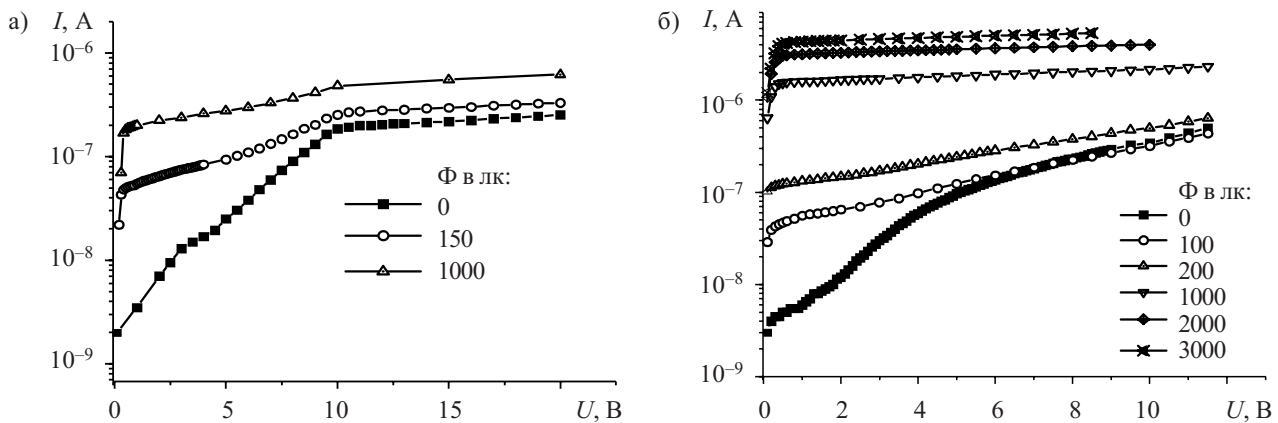


Рис. 3. Световые характеристики исследуемой структуры в режиме прямого (а) и обратного (б) смещения $n-p$ -перехода при разной освещенности

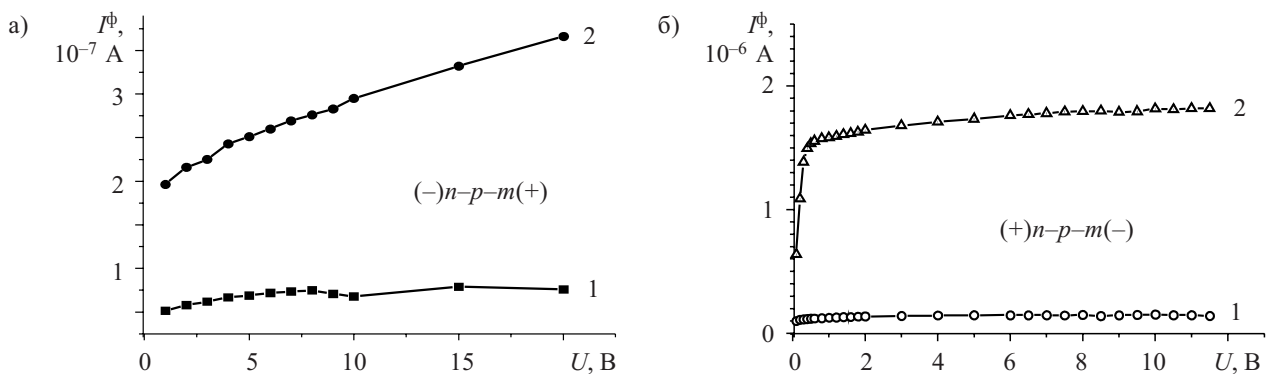


Рис. 4. Фототоки в гомопереходной структуре в режиме прямого (а) и обратного (б) смещения $n-p$ -перехода при различной освещенности:
1 — 150 лк; 2 — 1000 лк

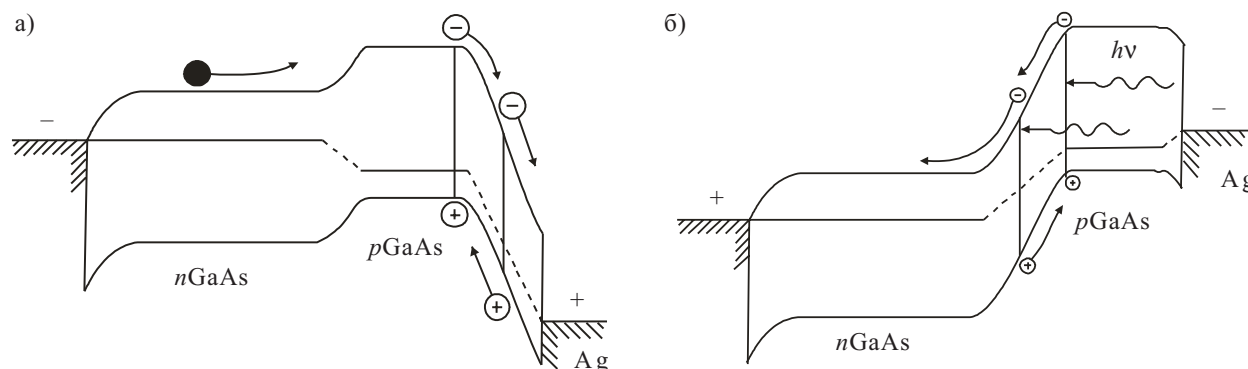


Рис. 5. Качественная энергетическая зонная диаграмма $n\text{GaAs-pGaAs-Ag}$ -структуры при различных режимах включения:

a — прямого смещения; b — 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 полупроводниковое 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, b). 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, b) 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., Проскуряков Ю. Ю. Германий-кремниевые фотоприемники на квантовых точках // Природа.— 2001.— № 10.— С. 112. (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.