

Фотопреобразователи на основе арсенидгаллиевых диффузионных $p-n$ -переходов, изготовленных на микрорельефной поверхности GaAs

© А.А. Акопян[†], Х.Н. Бахронов*, О.Ю. Борковская[†], Н.Л. Дмитрук^{†¶}, Д.М. Ёдгорова*, А.В. Каримов^{*¶}, Р.В. Конакова[†], И.Б. Мамонтова[†]

[†] Институт физики полупроводников им. В.Е. Лашкарева Национальной академии наук Украины, 03028 Киев, Украина

* Физико-технический институт НПО „Физика-Солнце“ Академии наук Республики Узбекистан, 700084 Ташкент, Узбекистан

(Получена 21 апреля 2008 г. Принята к печати 30 апреля 2008 г.)

С учетом анализа массопереноса легирующей примеси (Zn) через микрорельефную поверхность GaAs методом диффузии из газовой фазы изготовлены и исследованы $p-n$ -переходы, перспективные для фотопреобразователей. В зависимости от условий диффузии (масса диффузанта, время диффузии) возможно образование как $p-n$ -перехода в микрорельефе, так и плоского $p-n$ -перехода в объеме GaAs с сильно легированным приповерхностным p^+ -слоем. Приведены фотоэлектрические характеристики приборных структур с текстурированным $p-n$ -переходом и тонким широкозонным окном из $Al_xGa_{1-x}As$, полученным жидкофазной эпитаксией.

PACS: 68.55.Ac, 68.55.Jk, 85.30.Kk, 85.60.Dw

1. Введение

В настоящее время интенсивное развитие информационной техники требует создания сверхбыстродействующих систем приема и обработки полезного сигнала. Внимание исследователей обращено к разработке нового поколения приборов на основе нанотехнологии, многообещающей в области создания миниатюрных полупроводниковых приборов различного назначения и микрочипов. В этом аспекте представляет интерес изучение диффузионных процессов в полупроводниковых структурах с текстурированной поверхностью и микрорельефной границей раздела, которые в перспективе могут также служить основой для получения наноразмерных и плотноупакованных структур. Ожидается, что создание текстуры фотоприемной поверхности, повышающей поглощение оптического излучения, должно улучшить фотоэлектрические характеристики полупроводникового прибора. Однако, как показали исследования, высокие результаты могут быть получены лишь при согласовании оптических и электрических свойств во взаимосвязи с глубиной залегания $p-n$ -перехода и вида микрорельефа.

В работах [1–3] нами было показано, что фотопреобразователи (ФП), изготовленные на основе гетеропереходов AlGaAs–GaAs, в которых гетеропереход сформирован на текстурированной ростовой поверхности GaAs, обладают коэффициентом полезного действия по мощности, существенно превышающим эффективность ФП, изготовленных на обычных плоских гетеропереходах. Оказалось, однако, что изготовление гетеропереходов на текстурированных подложках является сложной физико-технологической задачей. Поэтому представляется це-

лесообразным поиск альтернативных гетеропереходам активных элементов для ФП с сохранением в них микрорельефных гетерограниц и соответствующих преимуществ фотопреобразования. Наиболее простым и доступным в эксперименте аналогом гетеропереходных структур с потенциальным барьером является диффузионный $p-n$ -переход.

В данном сообщении сделана попытка реализовать подобный арсенидгаллиевый $p-n$ -переход на микрорельефной поверхности GaAs и изготовить макет фотопреобразователя на его основе с фронтальным широкозонным окном. С этой целью был проведен анализ особенностей массопереноса легирующей примеси через текстурированную поверхность GaAs и методом диффузии Zn из газовой фазы вблизи микрорельефной поверхности GaAs был сформирован $p-n$ -переход.

Следует отметить, что, поскольку при текстурировании поверхности структур выявляются также грани, отличающиеся от поверхностной ориентации, процессы диффузии на образцах с текстурированной поверхностью будут отличаться от имеющих место в традиционных плоских структурах. Для исследования этого были изготовлены графитовые лодочки, позволяющие осуществлять в едином процессе диффузию примесей одновременно на структурах с плоской и микрорельефной поверхностями. Лодочка позволяла в любой момент открыть или перекрыть канал, соединяющий источник диффузанта с образцом, т.е. реализовать процесс диффузии в двух различных условиях: первый вариант — когда источник диффузанта и образец находятся в сообщающемся режиме во время набора температуры и в процессе диффузии (так называемая интегральная диффузия); второй — когда источник с диффузантом входят в сообщение лишь после достижения темпера-

[¶] E-mail: dmitruk@isp.kiev.ua

^{¶¶} E-mail: karimov@physic.uzsci.net

туры диффузии (селективная диффузия). Таким образом, селективная диффузия проводится при заданной температуре, а интегральная диффузия — в ходе нагрева и в выбранном интервале температур.

На основе сформированного p - n -перехода был изготовлен и исследован макет ФП. Для сравнения изготавливались аналогичные диффузионные p - n -переходы на плоской поверхности, а также на текстурированной, но с p - n -переходом в объеме GaAs (а не в микрорельефной области). Далее приведены некоторые результаты исследования таких ФП.

2. Моделирование процесса диффузии

Моделирование диффузии атомов (например, Zn) в полупроводник (например, арсенид галлия) осуществлялось применительно к неплоским границам раздела, представляющим собой специально сформированный

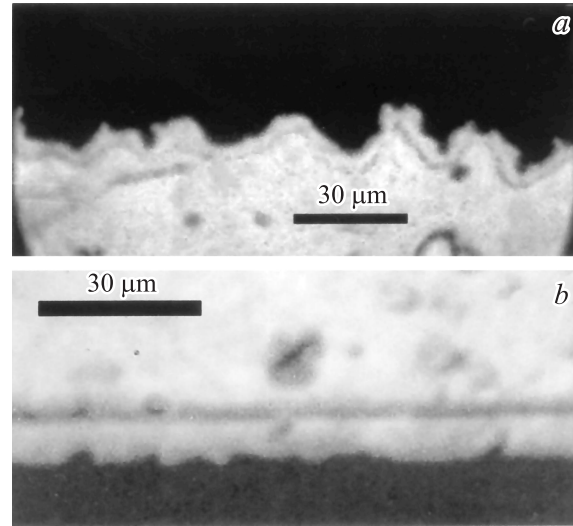


Рис. 2. Микрофотографии границы p - n -переходов, сформированных на GaAs с микрорельефной поверхностью при кратковременном (а) и продолжительном (б) процессе диффузии Zn.

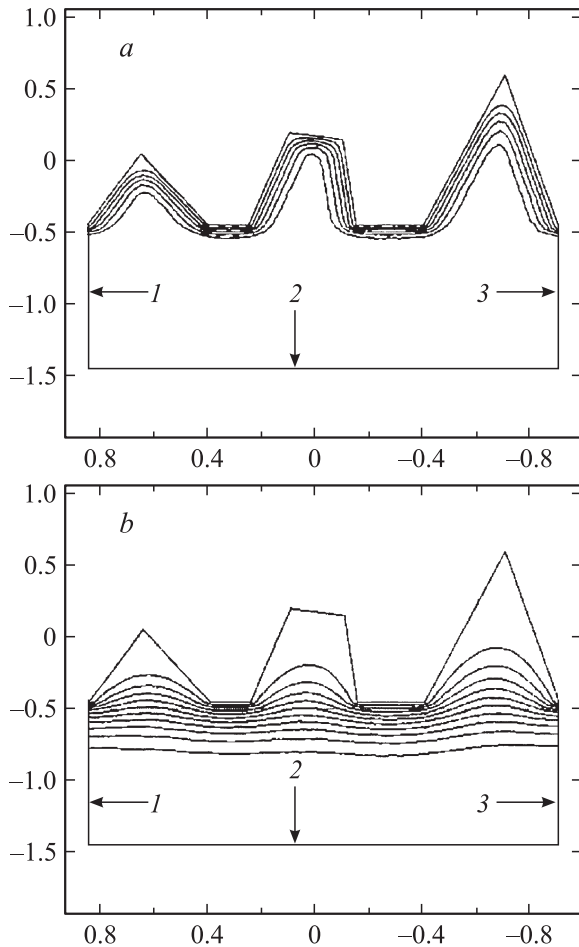


Рис. 1. Зависимость линий постоянного уровня металла от времени в полупроводнике при постоянной концентрации металла на границе полупроводника во время процесса диффузии. Временной интервал между кривыми в каждой серии одинаков, полное время диффузии $t/\tau = 0.002$ (а) и 0.03 (б). Шкалы условные, масштаб: $1 = 10$ мкм.

развитый микрорельф, простейший модельный фрагмент которого показан на рис. 1. Для описания диффузии Zn в GaAs в этой ситуации недостаточно решения диффузионного уравнения Фика в одномерном случае. Необходимо принять, что до начала диффузии в GaAs концентрация Zn в нем равна нулю, полупроводник граничит с источником диффузии по пилообразной поверхности, а на границах 1-3 (рис. 1) поток атомов Zn равен нулю, т.е. рассматриваемая область является частью бесконечно протяженного образца. В соответствии с моделью диффузии через микрорельефную поверхность, развитой в [2], был проведен численный расчет распределения Zn в GaAs. Оказалось, что профиль распределения цинка повторяет рельеф поверхности только при сравнительно небольших временах диффузии, естественно, зависящих от коэффициента диффузии и температуры.

На рис. 1 показана временная зависимость диффузионного процесса, развивающегося на микрорельефной поверхности на начальном этапе диффузии $t/\tau = 0.002$ (здесь время диффузии выражено в относительных единицах — абсолютное время t нормировано на характеристическое время диффузии τ) (рис. 1, а) и более протяженном, когда $t/\tau = 0.03$ (рис. 1, б). Масштабный коэффициент по осям координат одинаковый: $1 = 10$ мкм. Видно, что при увеличении относительного времени диффузии примерно на порядок профиль распределения Zn в GaAs выравнивается и практически соответствует плоскому случаю. Эти модельные представления качественно подтвердились в эксперименте при формировании p - n -перехода диффузией Zn из газовой фазы в микрорельефную поверхность GaAs.¹

¹ Эксперимент был проведен в ФТИ НПО „Физика-Солнце“ АН Узбекистана.

На рис. 2 приведены микрофотографии сколов с химически выявленным $p-n$ -переходом в GaAs, сформированным вблизи микрорельефной поверхности GaAs на начальном этапе диффузии, когда повторяется микрорельеф поверхности (а), и с практически плоским $p-n$ -переходом (б) после продолжительной диффузии через подобную микрорельефную поверхность GaAs. Технологические особенности изготовления таких $p-n$ -переходов описаны в [3].

Исследование нагрузочных характеристик фотопреобразователей с фронтальным широкозонным окном, изготовленных на подобных структурах, показало, что более эффективными параметрами фотопреобразования обладают ФП, сформированные на структурах с $p-n$ -переходом в микрорельефе (рис. 2, а). Коэффициент заполнения световой вольт-амперной характеристики в лучших образцах таких ФП ≈ 0.7 .

3. Экспериментальная часть

Селективная диффузия проводилась в квазизамкнутой графитовой кассете, в которой имеется заслонка между источником Zn и образцами. При достижении заданной температуры диффузии 800°C открывалась заслонка, подложка выдерживалась при этой температуре в течение 60, 50, 40 мин, а затем заслонка закрывалась. Процесс диффузии проводился в потоке водорода в реакционной камере установки жидкостной эпитаксии.

Интегральная диффузия проводилась в той же графитовой кассете при открытой заслонке. Для этого кассета с образцами и цинком помещалась в реакционную камеру и нагревалась по режиму эпитаксии до достижения 800°C , после чего осуществлялась выдержка в течение 60, 50, 40, 30 мин, далее осуществлялось охлаждение по режиму эпитаксии. Во всех экспериментах количество цинка было постоянным (146 мг). Результаты проведенной диффузии на сформированных $p-n$ -переходах приведены в табл. 1.

В этих экспериментах мы провели диффузию непосредственно в подложки с плоской и микрорельефной (квазирешеточной, дендритной, бирешеточной) поверхностью n -GaAs (концентрация электронов 10^{18} см^{-3}). На полученных структурах после диффузии выявляли $p-n$ -переходы (табл. 1). Следует отметить, что $p-n$ -переход, полученный диффузией цинка из газовой фазы через микрорельефную поверхность, повторяет рельеф поверхности.

Глубина залегания $p-n$ -перехода d от времени t диффузии цинка подчиняется закону $d \propto \sqrt{t}$. Сравнение селективной и интегральной диффузии свидетельствует о том, что при интегральной диффузии скорость больше, а глубины залегания в микрорельефных структурах сравнимы. При проведении диффузии цинка на текстурированных поверхностях интегральная диффузия оказывается более управляемой.

Таблица 1. Глубина залегания $p-n$ -перехода при диффузии Zn в GaAs-подложки

Режим диффузии	d , мкм		
	плоский	микрорельеф — квазирешетка	микрорельеф — дендрит
Интегральный	3–5	4	4
Селективный	1–1.5	1–1.5	–

Примечание. Масса диффузанта $m_{\text{Zn}} = 146$ мг, время диффузии — 60 мин, температура — 800°C .

Таблица 2. Параметры диффузии Zn в структуры с буферным слоем

№ образца	t , мин	m_{Zn} , мг
28	90	100
29	60	180
30	30	310
31	15	520

Примечание. Температура диффузии 800°C .

Диффузия идет по слабым местам структур (дефектам) и зависит от равномерности распределения их исходной концентрации по площади, плотности дислокаций, удельного сопротивления, неконтролируемых примесей, режима процесса и т.д. Следовательно, данные, полученные для конкретного типа образцов, нельзя один к одному распространить на другие образцы. Относительно выбора типа микрорельефа (квазирешетки, дендриты и т.д.) для каждой структуры требуется индивидуальный подход. Здесь эффект зависит от глубины, плотности ямок, текстуры и т.д.

Установлено, что, несмотря на единую технологию диффузионного процесса, для каждого типа структуры необходимо подбирать свой оптимальный режим. Глубина диффузии цинка оказывается различной при одном и том же режиме для разных типов структуры.

В результате на образцах ФП с плоской поверхностью, сформированных интегральной (селективной) диффузией, получили напряжения холостого хода от 0.2 до 0.6 В при освещенности $5 \cdot 10^4$ лк, а токи короткого замыкания составили 0.5–2.0 мА. На квазирешеточных образцах напряжение холостого хода составило 0.4–0.5 В, а ток короткого замыкания ~ 2.5 мА.

На втором этапе процессы диффузии цинка были проведены уже с использованием эпитаксиальных буферных слоев (табл. 2, рис. 3). На поверхности буферных слоев были созданы микрорельефы, а затем проведена диффузия цинка. На этом этапе также ожидалось повторение микрорельефа после диффузии на границе диффузионного $p-n$ -перехода. Цель — определение параметров диффузии цинка: дозы цинка и длительности времени для достижения заданной глубины залегания $p-n$ -перехода. Для этого на подложках n -GaAs (10^{18} см^{-3}) марки АГЧТ, с ориентацией (100),

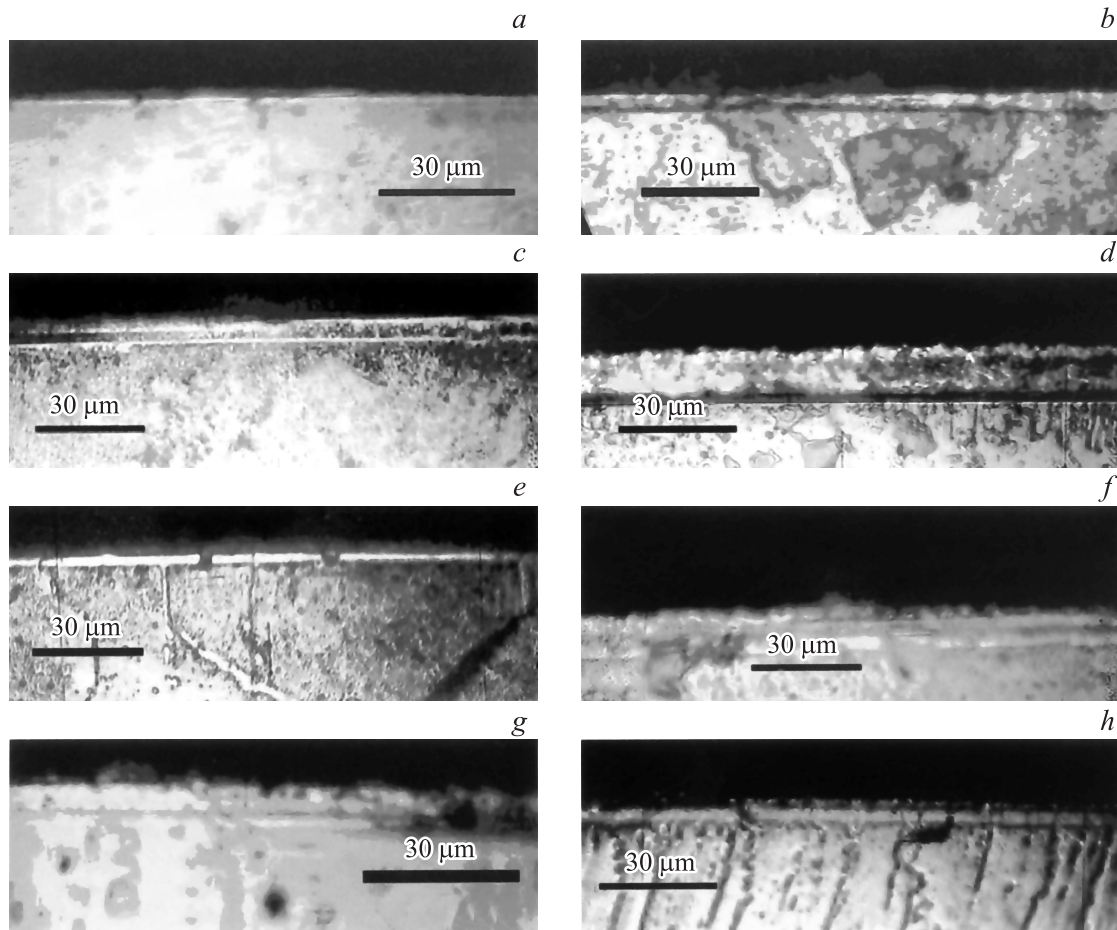


Рис. 3. Микрофотографии границы p - n -переходов, сформированных диффузией Zn в GaAs-структуры с буферным эпитаксиальным слоем. Образцы: a, b — 28; c, d — 29; e, f — 30; g, h — 31. (a, c, e, g) — плоская диффузионная поверхность, (b, d, f, h) — микрорельефная (дендритная) поверхность.

толщиной ~ 400 мкм, диаметром 36 мм, после нарезки на дискретные части площадью 1 см^2 выращивали буферные слои n -GaAs с концентрацией электронов 10^{17} см^{-3} . Температура начала роста буферного слоя составляла $T = 825\text{--}827^\circ\text{C}$, ее уменьшение в процессе выращивания — $\Delta T = 7\text{--}8^\circ\text{C}$. Толщина буферного слоя при этом составляла 10–12 мкм. На одном из выращенных буферных слоев осуществляли анизотропное травление в азотной кислоте при температуре 30°C в течение 20–30 с. Затем обе структуры, с плоской и дендритной поверхностью, помещали в устройство для диффузии. Диффузию проводили при 800°C , в результате получали структуру с гомопереходом (диффузионный слой p -GaAs, 10^{19} см^{-3})–(буферный слой n -GaAs, 10^{17} см^{-3})–(подложка n -GaAs, 10^{18} см^{-3}).

В предположении диссоциативного механизма диффузии цинка процесс диффузии проводили при различных дозах диффузанта m_{Zn} и соответствующих длительностях процесса t (табл. 2, рис. 3).

На каждой структуре выявляли границы p - n -переходов (рис. 3). Оказалось, что в случае дендритной поверхности при больших дозах цинка, 520 мг, и вре-

мени диффузии 15 мин на глубине 2 мкм видна прямая линия (в разрезе) и ниже на расстоянии 3–4 мкм дендритный рельеф повторяется. В случае же увеличения времени диффузии до 90 мин при дозе цинка 100 мг на глубине 2–3 мкм имеет место повтор рельефа дендрита, а глубже, на расстоянии 3–4 мкм от микрорельефной линии, получается сравнительно ровная линия. В обоих случаях имеем две границы диффузии цинка. При промежуточных дозах 180–310 мг и в интервале времени 30–60 мин получается одна линия, в частности повторение рельефа дендрита на глубине ~ 3 мкм. На основании этих данных можно заключить, что оптимальная доза цинка для нашего случая лежит в интервале 150–300 мг при времени диффузии в пределах 20–70 мин. Фронт диффузии, повторяющий поверхность текстуры, зависит от количества диффузанта, т. е. при определенных дозах (в нашем случае 100–200 мг) он сохраняется. При больших дозах до определенной глубины и достижения определенной концентрации примеси диффузия идет по другому закону, затем диффузия происходит по диссоциативному механизму; в крайних случаях (образцы 28 и 31) образуется p^+ - p -переход.

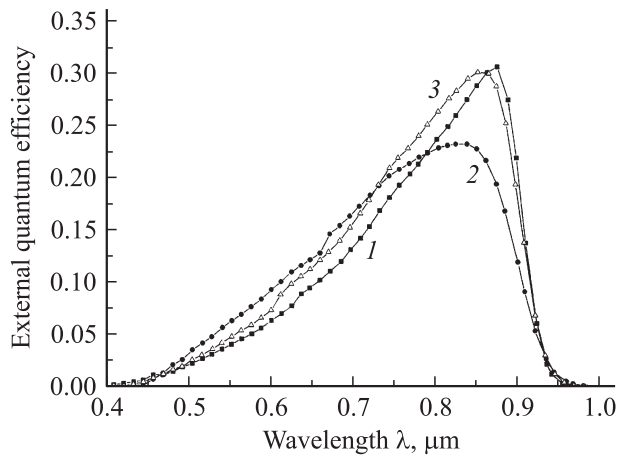


Рис. 4. Спектры внешней квантовой эффективности диффузионных структур $p-n$ -GaAs: 1 — плоская поверхность; 2 — поверхность с микрорельефом типа квазирешетки; 3 — структура с буферным эпитаксиальным слоем.

Оказалось, что и в буферных эпитаксиальных слоях можно сохранять задаваемые на поверхности микрорельефы в виде скрытых диффузионных $p-n$ -переходов. Меняя режимы процесса диффузии, можно управлять глубиной залегания $p-n$ -перехода.

Исследования нагрузочных характеристик полученных структур показали, что коэффициент заполнения больше 0.6–0.7 получается в образцах, в которых концентрация носителей буферного слоя находится в пределах $\lesssim 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Глубина залегания $p-n$ -перехода, по расчетным данным, должна быть $\sim 2 \text{ мкм}$. Однако в эксперименте для микрорельефных структур она составляет 3 мкм при температуре 800°C и времени диффузии цинка 60 мин. При этом граница диффузионного перехода повторяет микрорельеф поверхности буферного слоя. Увеличение концентрации носителей тока в буферном слое выше 10^{17} см^{-3} приводит к уменьшению коэффициента заполнения световой вольт-амперной характеристики. Что касается напряжения холостого хода, то его величина на микрорельефных структурах при освещенности 19 200 лк достигает 0.7 В. В целом для двух типов структур наблюдается противоположный характер поведения: если при данном режиме для плоских структур имеет место улучшение параметров, то для микрорельефных наблюдаем некоторое ухудшение, и наоборот.

Спектры фототока короткого замыкания полученных структур (представленного как внешняя квантовая эффективность) показаны на рис. 4. Они имеют вид довольно узкой полосы, что свидетельствует о большой толщине диффузионного p -слоя по сравнению с длиной диффузии неосновных носителей заряда в нем. В результате это приводит к невысоким значениям фототока короткого замыкания и соответственно квантовой эффективности таких структур. Видно, что введение в структуру буферного слоя и особенно микрорельеф по-

верхности и границ раздела способствуют расширению спектрального диапазона фототока.

Дополнительное увеличение фототока короткого замыкания структур в коротковолновой области спектра может быть получено за счет уменьшения скорости поверхностной рекомбинации с помощью эпитаксиального слоя $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, выполняющего роль широкозонного окна. При этом толщина эпитаксиального слоя $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ должна быть также $< 1 \text{ мкм}$, чтобы сохранить преимущества оптических характеристик микрорельефной поверхности, глубина рельефа которой не превышает 1–3 мкм (в зависимости от морфологических параметров микрорельефа). На рис. 5 показаны фотоэлектрические характеристики таких структур, полученных в одном цикле создания диффузионного арсенидгаллиевого $p-n$ -перехода и выращивания на нем слоя $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ методом жидкофазной эпитаксии. Видно, что как сама величина, так и спектральная область максимальной квантовой эффективности гетероэпитаксиальных структур выше, чем в случае

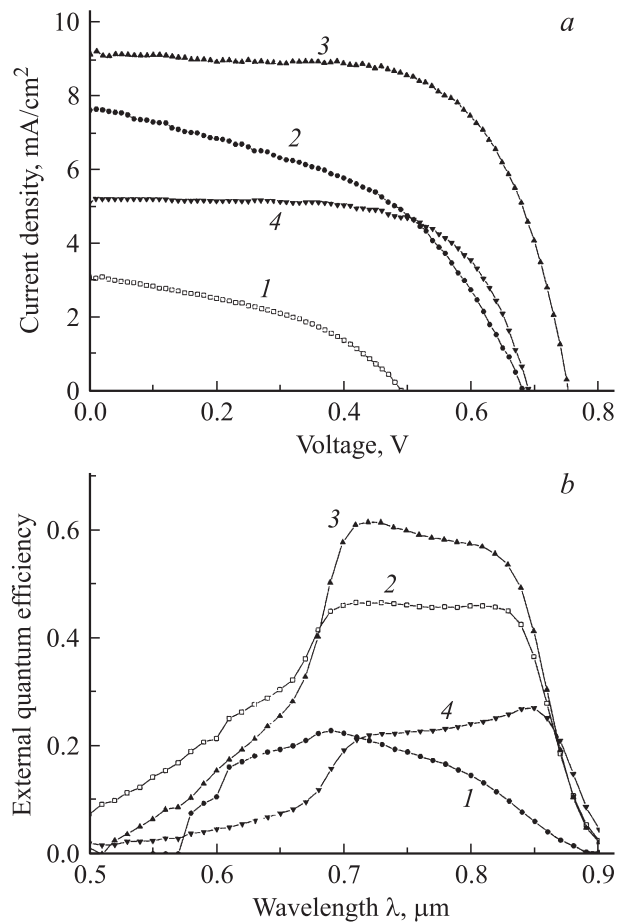


Рис. 5. Световые вольт-амперные характеристики (a) и спектры внешней квантовой эффективности (b) структур $p^+-\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/p\text{-GaAs}/n\text{-GaAs}/n^+-\text{GaAs}$. 1 — образец 23, плоская поверхность; 2 — образец 23 с микрорельефом дендритного типа; 3 — образец 25, плоская поверхность; 4 — образец 25 с микрорельефом дендритного типа.

диффузионных структур (рис. 4). Последнее связано, по-видимому, не только с уменьшением скорости поверхностной рекомбинации на гетерогранице, но и с уменьшением толщины диффузионного слоя p -GaAs в процессе гетероэпитаксии. При этом сохранение микрорельефа фронтальной поверхности и границ раздела влияет на характер спектральной зависимости фототока (рис. 5, b), приводя к его относительному увеличению в длинноволновой области спектра в случае микрорельефа дендритного типа. Для дальнейшего расширения спектральной области фоточувствительности и увеличения квантовой эффективности структур требуется оптимизация режима диффузии и эпитаксии применительно к выбранному характеру микрорельефа.

4. Заключение

Согласно модельному расчету, при формировании p - n -перехода в полупроводнике (n -GaAs) диффузией легирующей примеси (Zn) из газовой фазы профиль p - n -перехода повторяет рельеф поверхности только при сравнительно небольших временах диффузии. Экспериментальное исследование зависимости профиля p - n -перехода в структурах с текстурированной поверхностью n -GaAs от условий диффузии Zn (интегральный или селективный режим, масса диффузанта, время диффузии) показало, что в зависимости от соотношения массы диффузанта и времени диффузии возможно как образование двух границ раздела, одна из которых плоская, а вторая повторяет профиль рельефа поверхности, так и формирование одной рельефной границы p - n -перехода. Исследование фотоэлектрических характеристик структур с таким переходом p - n -GaAs, в том числе и с широкозонным окном (эпитаксиальный $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$), показало, что оптимальный режим диффузии в случае текстурированной поверхности должен дополнительно корректироваться в соответствии с выбранной морфологией микрорельефа.

Список литературы

- [1] И.Н. Арсентьев, А.В. Бобыль, О.Ю. Борковская, Д.А. Винокуров, Н.Л. Дмитрук, А.В. Каримов, В.П. Кладько, Р.В. Конова, С.Г. Конников, И.Б. Мамонтова. ФТП, **40** (7), 876 (2006).
- [2] A.A. Akopyan, O.Yu. Borkovskaya, N.L. Dmitruk, A.V. Karimov, R.V. Konakova, V.V. Milenin, A.V. Sachenko, M.N. Tursunov, D.M. Yodgorova. *Photoconverters with AlGaAs-GaAs heterojunction on textured GaAs substrates* (Tashkent, Fan Publishers, 2004).
- [3] А.В. Каримов, Д.М. Ёдгорова. *Физические явления в арсенидгаллиевых структурах с микрослойным квазипериодическим переходом* (Ташкент, ФАН, 2005).

Редактор Л.В. Шаронова

Photoconverters based on gallium arsenide diffusion p - n junctions made on a microrelief GaAs surface

A.A. Akopyan[†], Kh.N. Bachronov*,
O.Yu. Borkovskaya[†], N.L. Dmitruk[†], D.M. Yodgorova*,
A.V. Karimov*, R.V. Konakova[†], I.B. Mamontova[†]

[†] Institute of Semiconductor Physics,
National Academy of Sciences of Ukraine,
03028 Kiev, Ukraine

* Physical-Technical Institute
of the Scientific Association „Physics-Sun“,
Academy of Sciences of Uzbekistan,
700084 Tashkent, Uzbekistan

Abstract Using the technique of diffusion from a gas phase, we fabricated and investigated p - n junctions those are promising for application in photoconverters. Mass transfer of dopant impurity (Zn) via microrelief GaAs surface was taken into account. Depending on the diffusion conditions (diffusant mass, time of diffusion), it was possible to form a p - n junction in the microrelief, as well as a planar p - n junction in the GaAs bulk with a heavily doped near-surface p^+ -layer. The photoelectric characteristics of device structures with a textured p - n junction and thin wide-gap window made of $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ obtained by the liquid-phase epitaxy technique are presented.