

А. Б. КОНДРАТ, д. ф.-м. н. Н. И. ДОВГОШЕЙ,
Я. М. ПОЛЯК, Ю. Й. СИДОР, Р. М. ПОВЧ

Украина, Ужгородский нац. университет
E-mail: pmm@univ.uzhgorod.ua

Дата поступления в редакцию
18.04 2001 г.

Оппоненты д. ф.-м. н. В. Т. МАСЛЮК,
д. т. н. В. А. МОКРИЦКИЙ

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТРУКТУР Si – X – Ge₃₃As₁₂Se₅₅ (X: Sb, Bi, In, Pb) С РАЗЛИЧНЫМИ КОНТАКТАМИ

Предложен технологический прием модифицирования гетероперехода для целенаправленного изменения высоты энергетического барьера и скорости рекомбинации на границе раздела.

Исследование явления переноса носителей заряда в гетероструктурах дает важную информацию об их энергетической структуре. При этом необходимо учитывать процессы, которые происходят как на границе раздела двух полупроводников, так и на границе раздела «металл – полупроводник».

Одним из возможных методов управления границей раздела «металл – полупроводник» является ее модификация определенными примесями. Граница раздела «подложка – пленка» является объектом локализации электрически активных дефектов, выступающих в роли поверхностных состояний, ловушек, дислокаций и т. д. [1]. Уменьшая влияние этих факторов можно существенно улучшить необходимые параметры.

В настоящей работе была проведена модификация переходного слоя в структурах «кремний – аморфная пленка Ge₃₃As₁₂Se₅₅» путем образования нанослоя Sb, Bi, In, Pb на границе раздела гетероструктуры и исследованы характеристики полученных структур.

Пленки толщиной 1,0 мкм напылялись методом дискретного термического испарения [1, с. 82] стеклом Ge₃₃As₁₂Se₅₅ на неподогретые подложки *n*-Si, на которые предварительно были нанесены термическим испарением нанослой (10 нм) In, Pb, Sb, Bi. Скорость осаждения пленок составляла 5,0±0,1 нм/с. Контакты из Sb были изготовлены путем напыления Sb через маску с круглыми отверстиями диаметром 1,0±0,1 мм. Контакты из In были нанесены на Si непосредственно перед проведением эксперимента. В качестве электродов использовались контакты, полученные также путем термического осаждения алюминия на обе стороны такой структуры.

Исследование ВАХ заключалось в измерении зависимости тока от приложенного к образцу напряжения при прямом и обратном смещении [2].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

1. Вольт-амперные характеристики.

Структура M – Ge₃₃As₁₂Se₅₅ – M.

Большинство параметров гетероструктур "аморфный полупроводник – кристаллический полупроводник" определяются процессами переноса носителей заряда на границе раздела [3].

Была исследована ВАХ "сэндвич"-структур *M – Ge₃₃As₁₂Se₅₅ – M* (где *M* – Sb и In), работа выхода которых соответственно равна 4,08 и 3,8 эВ [4]. Их анализ показал, что при использовании контактов из Sb ВАХ описывается степенным законом $j \sim U^n$, где j – плотность тока, U – напряжение, $n=2,7$ (n – показатель степенной зависимости). В данном случае это может свидетельствовать о наличии токов, ограниченных пространственным зарядом. При использовании контактов из In ВАХ этих структур описывается экспоненциальным законом $J \sim \exp(\text{const } U)$, что может свидетельствовать об образовании на контакте барьера Шоттки [5].

Переход In – p-Si и гетероструктура Ge₃₃As₁₂Se₅₅ – p-Si.

Вольт-амперная характеристика перехода "In – Si *p*-типа" хорошо описывается уравнением Шоттки для тока, текущего через барьер, и имеет вид [6, с. 207]

$$I = I_0 [\exp(qU/\eta kT) - 1], \quad (1)$$

где

$$I_0 = AT^2 \exp(-q\Phi_B/kT); \quad (2)$$

A – квазиконстанта Ричардсона;

T – температура;

q – заряд электрона;

Φ_B – высота барьера;

k – постоянная Больцмана;

η – коэффициент неидеальности.

Таким образом, прохождение тока на переходе In – *p*-Si определяется барьером на контакте «металл – полупроводник». При использовании контактов из Sb ВАХ перехода Sb – *p*-Si имели линейную зависимость.

На **рис. 1** приведена ВАХ гетероструктуры Ge₃₃As₁₂Se₅₅ – *p*-Si при прямом и обратном смещении с электродами из In (*a*) и Sb (*б*).

При использовании блокирующих контактов (In) ВАХ при прямом смещении ("плюс" приложен к Ge₃₃As₁₂Se₅₅) может быть описана уравнением,

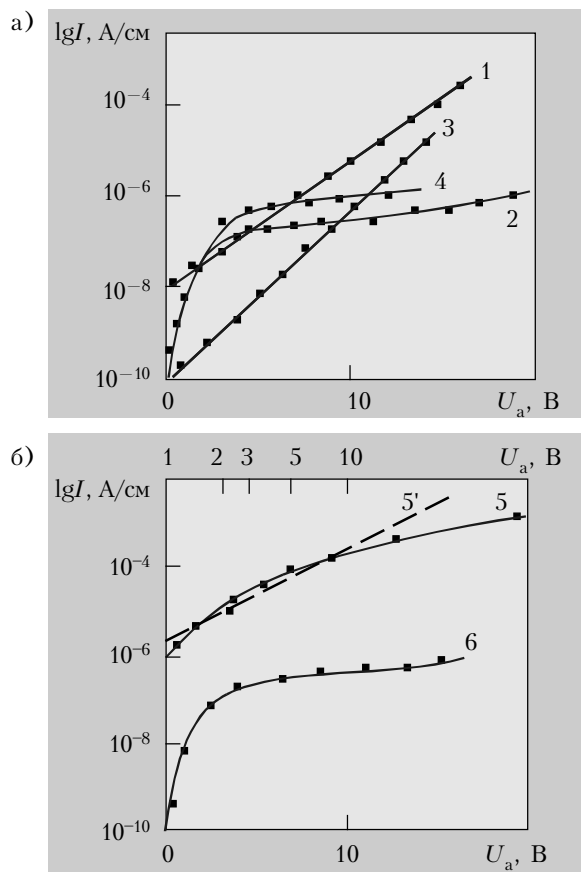


Рис. 1. Вольт-амперная характеристика гетероструктуры $M-Ge_{33}As_{12}Se_{55}-Si-M$ ($M - In$ и Sb) при прямом (1, 3, 5, 5') и обратном (2, 4, 6) смещении для толщины пленки $Ge_{33}As_{12}Se_{55}$ 0,1 (мкм) (1, 2) и 0,5 мкм (3–6). Пунктиром (кривая 5') показана кривая 5, построенная в логарифмическом масштабе

подобным (1), но с коэффициентом неидеальности η для пленок $Ge_{33}As_{12}Se_{55}$ толщиной 0,1 и 0,5 мкм, равным соответственно 2,6 и 3,3 (рис. 1, прямые 1, 3). При обратном смещении при $U_a > 2$ В наблюдается переход к насыщению тока. Прохождение тока через гетероструктуру при использовании инжектирующих контактов при прямом смещении определяется механизмом переноса заряда в аморфной пленке, а при обратном — высотой барьера на гетеропереходе. Подобная ВАХ характерна для изотипных гетеропереходов с учетом состояний на границе раздела [7]. При использовании инжектирующих контактов (Sb) ВАХ при прямом смещении выражается степенным законом $j \sim U^n$, где $n=2$ (рис. 1, кривая 5').

Ограничение тока через гетероструктуру при прямом смещении, определяющееся проводимостью аморфной пленки, можно объяснить на основании модели, учитывающей D -центры [8, с. 531]. Полагается, что D^+ -центры в аморфных полупроводниках образуют донорные состояния в верхней половине запрещенной зоны, аналогично мелким уровням, а центры D^- — акцепторные состояния, размещенные в нижней половине запрещенной зоны. С обеих сторон от уровня Ферми размещены два глубоких уровня, связанных с D^0 -центрами. Как и для ряда релак-

сационных полупроводников [9, с. 93], можно предположить, что при инжекции неосновных носителей заряда в аморфной пленке вблизи контактов существует область обеднения основными носителями заряда, удельное сопротивление которой превышает объемное удельное сопротивление пленки.

При малом напряжении большая часть его приходится на объем пленки. С увеличением уровня инжекции неравновесные носители заряда начинают захватываться D -центрами, в результате чего увеличивается концентрация D^0 -центров. Это приводит к ограничению тока пространственным зарядом. Это также приводит к резкому росту тока через планарную структуру, который (рост) связан с предельным заполнением ловушек. С увеличением напряжения обедненные слои распространяются в объем пленки, что приводит к квадратичной зависимости ВАХ по закону Мотта — Генри [5, с. 61].

Структура $Ge_{33}As_{12}Se_{55}-X-n-Si$.

На рис. 2 приведены в логарифмических координатах вольт-амперные характеристики структур $Ge_{33}As_{12}Se_{55}-X-n-Si$ с промежуточными нанослоями (X) In , Pb , Sb , Bi . Измерения проведены в области слабых электрических полей ($10^2 - 10^4$ В/см). Здесь же приведена характеристика без нанослоя (кривая 1). Как видно, при значениях напряжений $U_a \leq 1$ В ($E \leq 10^4$ В/см) она линейна и симметрична.

Наличие нанослоя In приводит к тому, что вольт-амперная характеристика при напряжении выше

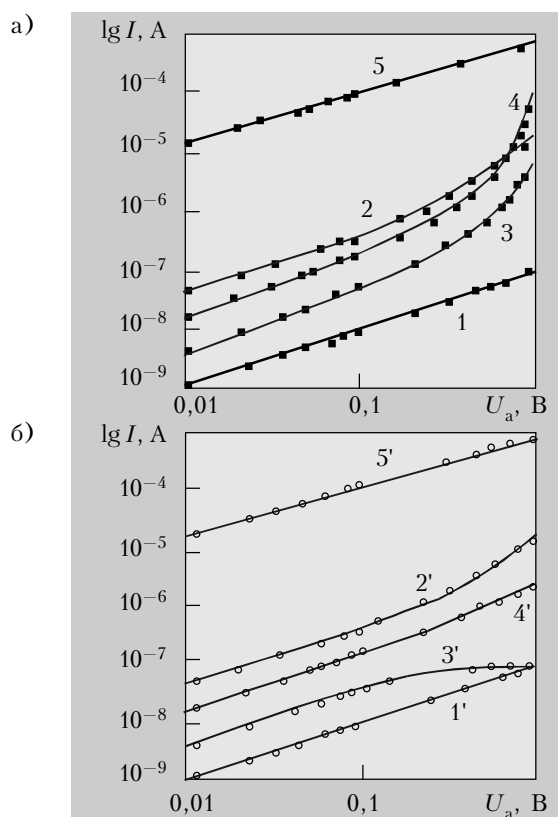


Рис. 2. Прямые (а) и обратные (б) ветви вольт-амперных характеристик гетероструктуры $Ge_{33}As_{12}Se_{55}-X-n-Si$: 1, 1' — без переходного нанослоя; 2, 2' — In ; 3, 3' — Pb ; 4, 4' — Sb ; 5, 5' — Bi

0,2 В становится сверхлинейной и остается практически симметричной (кривые 2, 2'). Нарушение симметричности вольт-амперной характеристики структур происходит при использовании нанослоев из Pb (кривые 3, 3') и Sb (кривые 4, 4'). Наибольший коэффициент выпрямления ($m \sim 80$ при $U_a = 1$ В) наблюдается для структур с нанослоем Bi, причем при обратном смещении их вольт-амперная характеристика становится сублинейной. Нанослой из Bi не влияет на линейность и симметричность характеристики, однако ток, протекающий через такую структуру, на 2 порядка больше токов, протекающих через другие структуры (кривые 5, 5').

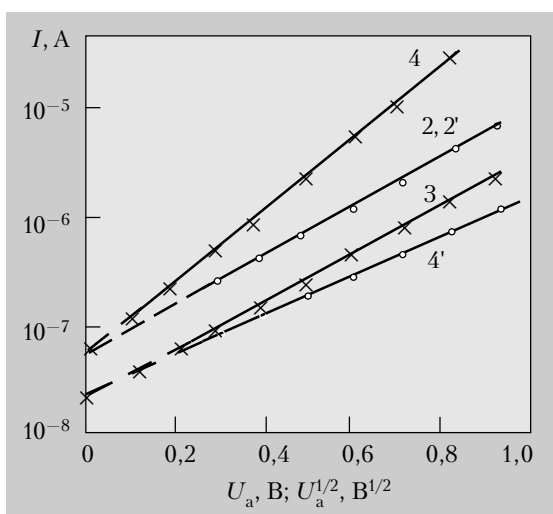


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики гетероструктур с переходным слоем (нумерация кривых соответствует обозначениям на рис. 2):
 o – для U_a ; x – для $(U_a)^{1/2}$

С целью определения механизма переноса носителей заряда через исследуемые структуры в области нелинейности вольт-амперных характеристик они были построены в различных координатах. На рис. 3 изображены характеристики, построенные в полулогарифмических координатах для структур с нанослоями из In (кривые 2, 2'), Pb (3) и Sb (4, 4'). Как видно, для структур с нанослоями из Pb и Sb вольт-амперные характеристики при прямом смещении ("плюс" приложен к пленке $Ge_{33}As_{12}Se_{55}$) выпрямляются, если их построить в координатах $\lg I - U_a$ (кривые 3, 4). Вольт-амперные характеристики структур с нанослоем из In, а также структур с нанослоем из Sb выпрямляются, если их построить в координатах $\lg I - (U_a)^{1/2}$ (кривые 2, 2', 4').

2. Вольт-фарадные характеристики.

Структура $Ge_{33}As_{12}Se_{55} - X - n-Si$.

На рис. 4 изображены вольт-фарадные характеристики структуры $Ge_{33}As_{12}Se_{55} - X - n-Si$ с промежуточным нанослоем и без него. Как видно, наиболее существенное изменение емкости наблюдается в структурах с нанесенным на границу раздела нанослоем Sb (в таких структурах наблюдается также и максимальная нелинейность вольт-амперных характеристик – см. рис. 2). Структуры с переходным

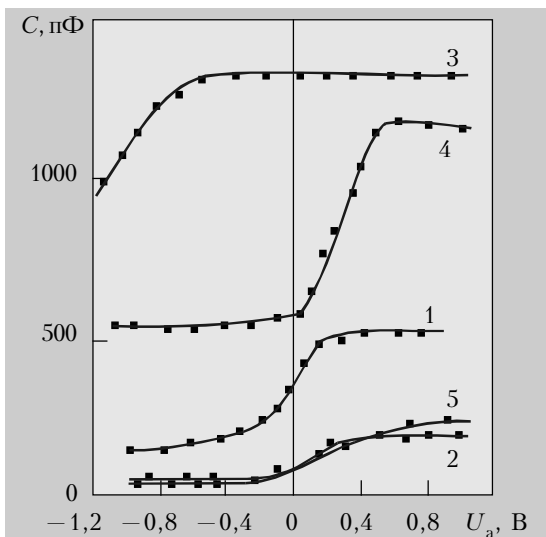


Рис. 4. Вольт-фарадные характеристики гетероструктур $Ge_{33}As_{12}Se_{55} - X - n-Si$:
 1 – гетероструктура без нанослоя; 2 – In; 3 – Pb; 4 – Sb; 5 – Bi

нанослоем из Pb имеют повышенное значение емкости при $U_a = 0$, а область начала ее уменьшения лежит в отрицательной области напряжений смещения (для этих структур вольт-амперные характеристики нелинейны, причем при обратном смещении наблюдается область насыщения – см. рис. 2). Минимальное изменение емкости структур наблюдается при использовании нанослоев из Bi и In. Для этих структур вольт-амперные характеристики симметричны (см. рис. 1).

На рис. 5 для этих же структур приведены вольт-фарадные характеристики, построенные в координатах $1/C^2 - U_a$ для области зависимости емкости от напряжения смещения U_a . Экстраполяция зависимости $C^{-2} - U_a$ к значению $C^{-2} = 0$ позволяет определить величину контактной разности потенциалов U_D .

Как видно из рис. 5, величина U_D для разных структур различна. Для структур без нанослоя $qU_D =$

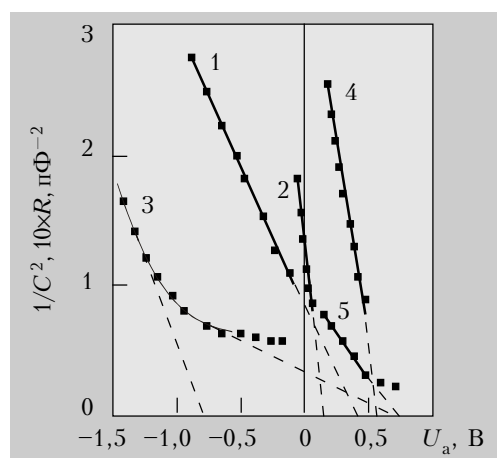


Рис. 5. Вольт-фарадные характеристики гетероструктур $Ge_{33}As_{12}Se_{55} - X - n-Si$:
 1 – без переходного слоя; 2 – In; 3 – Pb; 4 – Sb; 5 – Bi

=0,35 эВ (кривая 1); максимальное значение этой величины имеют структуры с нанослоем из Вi ($qU_D=0,80$ эВ, кривая 5), а минимальное — структуры с нанослоем из In ($qU_D=0,15$ эВ, кривая 2). При использовании в структурах нанослоев из Pb и Sb значение qU_D одинаковы и составляют 0,60 эВ (кривые 3, 4).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Вольт-амперные характеристики структур с нанослоем из In могут быть описаны в рамках модели, учитывающей рекомбинацию и туннелирование через состояния на границе раздела симметричного барьера [10], для которой плотность тока описывается выражением

$$j = j_0 \exp(AU_a), \tag{3}$$

где A почти не зависит от температуры и имеет относительно высокое значение по сравнению с множителем η , который входит в выражение, описывающее ток при прямом смещении для рекомбинационной модели Долега [11]. Согласно этой модели,

$$j = j_0 \exp(qU_a / \eta kT), \tag{4}$$

где η меняется от 1 до 2 в зависимости от отношения концентраций примеси.

По величине угла наклона вольт-амперных характеристик определены коэффициент неидеальности η и коэффициент A (указанный ниже в скобках). Для структур с нанослоями из In и Pb они соответственно равны 7,47 (5,23) и 7,08 (5,47), а для структур с нанослоями из Sb при прямом смещении принимают значения 5,56 (6,97) и при обратном смещении — 9,10 (4,25). Путем экстраполяции прямых на рис. 3 к $U_a=0$ определена плотность потока электронов j_0 со стороны металла в полупроводник. Для исследованных структур с нанослоем из In, а также со слоем из Sb при прямом смещении $j_0=1,1 \cdot 10^{-6}$ А/см². Для структур с нанослоем из Pb при прямом смещении и структур с нанослоем из Sb при обратном смещении $j_0=0,7 \cdot 10^{-6}$ А/см².

Анализ экспериментальных результатов показал, что ток в исследуемых структурах не может быть связан с процессами на границе раздела "металл — полупроводник", т. к. коэффициент η значительно отличается от 1. Перенос носителей заряда в структурах с нанослоем из Sb качественно может быть объяснен на основании модели, которая учитывает туннелирование на границе раздела между двумя полупроводниками, поскольку прямая и обратная ветви их вольт-амперной характеристики описываются соответственно формулами [6, с. 62, 63]

$$j = j_0 \exp[-B(U_D - K_2 U_a)] \tag{5}$$

и

$$j = j_0 (-U_a) \exp[-Cq(U_D - U_a)^{1/2}], \tag{6}$$

где K_2 — коэффициент, который учитывает падение напряжения в широкозонном полупроводнике;

C — коэффициент, учитывающий зависимость ширины запрещенной зоны полупроводника и энергии активации его примесных уровней от температуры.

Для структур с нанослоем из Pb вольт-амперные характеристики могут быть описаны в рамках классической модели Андерсона для гетеропереходов [12]. В данной модели прямой ток I меняется в зависимости от приложенного напряжения U_a по экспоненциальному закону согласно выражению

$$I = V \exp[qU_{D2} / kT] \exp(qK_2 U_a / kT), \tag{7}$$

где U_{D2} — искривление зон в широкозонном полупроводнике.

Для обратной ветви вольт-амперной характеристики теория предусматривает насыщение тока при больших напряжениях.

Значительный рост тока через структуру с нанослоем из Вi может быть связан с переходом от дырочного к электронному типу проводимости пленок Ge₃₃As₁₂Se₅₅ в результате диффузии атомов Вi.

Известно, что для гетероструктур энергетический разрыв валентной зоны определяется выражением [6, с. 61]

$$\Delta E_v = U_D + \delta_n + \delta_p - E_{gn}, \tag{8}$$

где δ_n и δ_p — энергия примесного уровня в полупроводнике соответственно n - и p -типа;

E_{gn} — ширина запрещенной зоны полупроводника n -типа.

Для n -Si энергия примесного уровня при легировании его атомами фосфора равна $\delta_n=0,044$ эВ [6, с. 54]. Для Ge₃₃As₁₂Se₅₅ величина $\delta_p \sim 0,9$ эВ, если допустить, что дефектные центры находятся вблизи середины ширины оптической зоны $E_{gp}=1,80$ эВ [14]. Величина E_{gn} для Si равна 1,11 эВ [6, с. 22].

Используя формулу (8), для структуры без нанослоя получим значение $\Delta E_v=0,18$ эВ. Максимальное значение $\Delta E_v=0,64$ эВ получено для структуры с Вi, а минимальное — для структуры с In ($\Delta E_v \sim 0$). При наличии на границе раздела нанослоев из Pb и Sb величина ΔE_v равна 0,44 эВ. Для таких структур вольт-амперные характеристики несимметричны (см. рис. 2).

Энергетический разрыв зоны проводимости ΔE_c для гетероструктур определяется выражением [7]

$$\Delta E_c = E_{gp} - E_{gn} - \Delta E_v. \tag{9}$$

Минимальное значение $\Delta E_c=0,05$ эВ имеют структуры с нанослоями из Вi. Если учитывать, что перенос носителей зарядов в такой структуре определяется потоком электронов, то становится понятным значительное увеличение тока (см. рис. 2), поскольку для него практически отсутствует барьер на границе раздела. Максимальное значение $\Delta E_c=0,69$ эВ получено для структур с нанослоем In. Для структур без переходного слоя получено значение $\Delta E_c=0,51$ эВ, а для структур с нанослоями из Pb и Sb они равны 0,25 эВ. Следует отметить, что и работа выхода электронов для этих материалов приблизительно одинакова и составляет 4,02 и 4,08 эВ, соответственно.

ВЫВОДЫ

Разработаны и исследованы новые гетероструктуры со стабильными во времени параметрами и характеристиками. Показано, что перенос носителей

заряда через гетероструктуру "аморфная пленка $\text{Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55}$ — эпитаксиальный $p\text{-Si}$ " при использовании контактов из In в основном определяется барьером на границе раздела "металл — аморфная пленка". При использовании контактов из Sb перенос носителей заряда через пленку $\text{Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55}$ и гетероструктуру " $p\text{-Si}$ — $\text{Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55}$ " при прямом смещении определяется токами, ограниченными пространственным зарядом, а при обратном смещении — высотой барьера на гетеропереходе.

Контакты из Sb могут быть рекомендованы для получения омических контактов с пленкой $\text{Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55}$.

Получено качественное согласование экспериментальных данных при исследовании вольт-амперных и вольт-фарядных характеристик структур "аморфная пленка $\text{Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55}$ — кристаллический полупроводник $n\text{-Si}$ " с промежуточным нанослоем из Sb, Bi, In и Pb. Показано существенное влияние таких нанослоев на механизм переноса носителей заряда через исследуемую структуру.

Установлено, что максимальное значение величины контактной разности потенциалов получено для структуры с нанослоем из Bi ($qU_{\text{д}}=0,80$ эВ), а минимальное — для структуры с нанослоем из In ($qU_{\text{д}}=0,15$ эВ). При использовании в структурах нанослоев из Pb и Sb значения $qU_{\text{д}}$ составляют 0,60 эВ.

Предложенный технологический прием модифицирования гетероперехода может быть применен для целенаправленного изменения высоты энергетического барьера и скорости рекомбинации на границе раздела.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Свечников С. В., Химинец В. В., Довгошей Н. И. Сложные некристаллические халькогениды и халькога-

логениды и их применение в оптоэлектронике // Киев: Наукова думка, 1992.

2. Свойства структур металл — диэлектрик — полупроводник / Под ред. А. В. Ржанова. — М.: Наука, 1976.

3. Андриеш А. М., Циуляну Д. И. Электрофизические свойства гетеропереходов стеклообразный полупроводник — кристалл / В кн.: Аморфные полупроводники-78, Пардубице. — 1978. — С. 601—608.

4. Довгошей Н. И., Качер И. Э., Кондрат А. Б. Физические аспекты формирования переходного слоя пленки $\text{Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55}$ с подложкой Si // Тонкие пленки в электронике: Матер. VI Междунар. симпози., Москва — Киев — Херсон. — 1995. — С. 103—104.

5. Ламберт М., Марк П. Инжекционные токи в твердых телах // М.: Мир, 1973.

6. Милнс А., Фойхт Д. Гетеропереходы и переходы металл — полупроводник // М.: Мир, 1975.

7. Savchenko N. D. Energy band diagram for the $\text{Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55}$ — Si heteroboundary // Inst. Phys. Conf. Ser. IOP Publishing Ltd. 152. — 1998. — P. 723.

8. Мотт Н., Дэвис Э. Электронные процессы в некристаллических веществах. Т. 1, 2. — М.: Мир, 1982.

9. Као К., Хуанг В. Перенос электронов в твердых телах. Ч. 2. — М.: Мир, 1973.

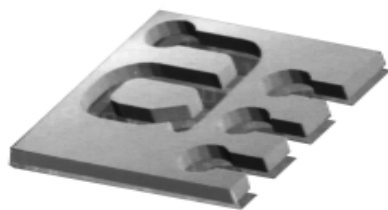
10. Donnelly I. P., Milnes A. G. Current-voltage characteristics for Ge—Si and Ge—GaAs heterojunctions // Proc. IEE (London). — 1996. — Vol. 113. — P. 1468.

11. Dolega V. Theory of p — n -heterojunctions between semiconductors with variable crystalline lattices // Zs. Naturforsch., 13. — 1963. — P. 653.

12. Anderson R. L. Experiments on Ge—GaAs heterojunction // Solid-State Electron. — 1962. — Vol. 5. — P. 341—346.

13. Хогарт К. Кремний / В кн.: Материалы, используемые в полупроводниковых приборах. — Под ред. К. Хогарта. — М.: Мир, 1968.

14. Savchenko N., Shchurova T., Kondrat A., Dovgoshey N. Radiation stable infrared optical components // Proc. of SPIE. — 1998. — Vol. 3359. — P. 87.



5-я международная специализированная выставка

АВТОМАТИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОНИКА ЭЛЕКТРО

МИНСК
26—29 марта
2002

220035 Минск пр. Машерова, 14
Тел./факс ++(37517) 226 91 93
Факс ++(37517) 226 91 92
E-mail: borovik@brm.by
minskexpo@brm.minsk.by
www.minskexpo.com.by