

06;12

Спектральные и вольт-амперные характеристики $\text{Si-Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ гетероструктур, полученных методом жидкофазной эпитаксии

© А.С. Саидов, А. Кутлимратов, Б. Сапаев, У.Т. Давлатов

Физико-технический институт НПО "Физика-Солнце" АН РУз, Ташкент

Поступило в Редакцию 1 ноября 2000 г.

Рассмотрены спектральные и вольт-амперные характеристики (ВАХ) $\text{Si-Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ гетероструктур, полученных на кремниевых подложках методом жидкофазной эпитаксии. Приведены зависимости длинноволновой границы их фоточувствительности от состава варизонного твердого раствора. Показана возможность использования варизонных твердых растворов в качестве переходных буферных слоев между кремниевой подложкой и структурой, получаемой из другого полупроводникового материала. Такие структуры вполне успешно могут быть использованы в качестве составного элемента, преобразующего часть ИК солнечного излучения в структурах каскадных солнечных элементов, а также фотоприемников для волоконно-оптических линий связи, регистрирующих световые сигналы с длиной волны $\lambda = 1.33$ и $1.5 \mu\text{m}$.

Кремний, а также твердые растворы на его основе, остается одним из основных материалов, широко используемых в современной полупроводниковой электронике. Это связано с тем, что кремний является относительно дешевым полупроводниковым материалом с хорошо отработанной технологией, обладающим некоторыми преимуществами, такими как относительно низкая плотность, высокая теплопроводность, механическая прочность и т. д., перед другими полупроводниками [1–3]. Так как параметры кристаллических решеток разных полупроводниковых материалов имеют различные значения, невозможно получить приборные структуры, отвечающие требованиям современной полупроводниковой микроэлектроники. Поэтому для согласования последних и получения на Si подложках хороших приборных структур, отвечающих требованиям современной микроэлектроники и полупроводникового приборостроения, между подложкой и приборными структурами выра-

щают промежуточный буферный слой. В зависимости от состава и вида выращиваемых структур буферные слои состоят из твердых растворов подложечного материала с переменным составом, компонентом которых является элемент выращиваемой пленки, т. е. полупроводниковый материал, из которого будет изготовлена рабочая структура. Одним из ряда составов твердых растворов для буферных слоев является ряд варизонных твердых растворов $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$, полученных на Si подложках. Но при этом необходимо учесть тот факт, что при изготовлении приборных структур на таких буферных слоях последние сами могут оказать влияние на их выходные характеристики. Следовательно, для получения приборов с высокими эксплуатационными характеристиками следует тщательно исследовать свойства буферных слоев и их влияния на параметры структур, получаемых на них.

Ранее нами были сделаны сообщения об условиях получения варизонных твердых растворов $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ методом жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ) на кремниевых подложках [4,5] и о некоторых их свойствах [6]. Настоящая работа посвящается исследованию влияния параметров эпитаксиальных пленок $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ на спектральные и вольт-амперные характеристики Si-Si_{1-x}Ge_x гетероструктур, полученных методом жидкофазной эпитаксии. Показана возможность практического применения таких гетероструктур в качестве буферного слоя в конкретных приборных структурах, например в качестве узкозонного элемента каскадного фотопреобразователя, для преобразования части инфракрасного (ИК) солнечного излучения, фотоприемников волоконно-оптических линий связи (ВОЛС), регистрирующих оптические сигналы с длиной волны $\lambda = 1.3$ и $1.55 \mu\text{m}$ [7] и т. д. Для достижения поставленной цели твердые растворы $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ были выращены методом ЖФЭ на монокристаллических кремниевых подложках марки КЭФ-5 с удельным сопротивлением $\rho = 5.0 \Omega \cdot \text{cm}$ и кристаллографической ориентацией (111). С целью установления зависимости характеристик структур от состава раствора-расплава эпитаксиальные пленки выращивались как из галлиевого, так и оловянного растворов-расплавов. Для получения пленок с хорошей зеркальностью и улучшения электрофизических характеристик в раствор-расплав добавлялись свинец (Pb) и алюминий (Al) в незначительном количестве (менее 1 at.%) [8].

Морфологические и холловские исследования выращенных $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ твердых растворов показали, что пленки, полученные как из галлиевого, так и из оловянного растворов-расплавов, имеют акцепторный тип проводимости, а их состав меняется плавно от 100% Si на гетерогранице до

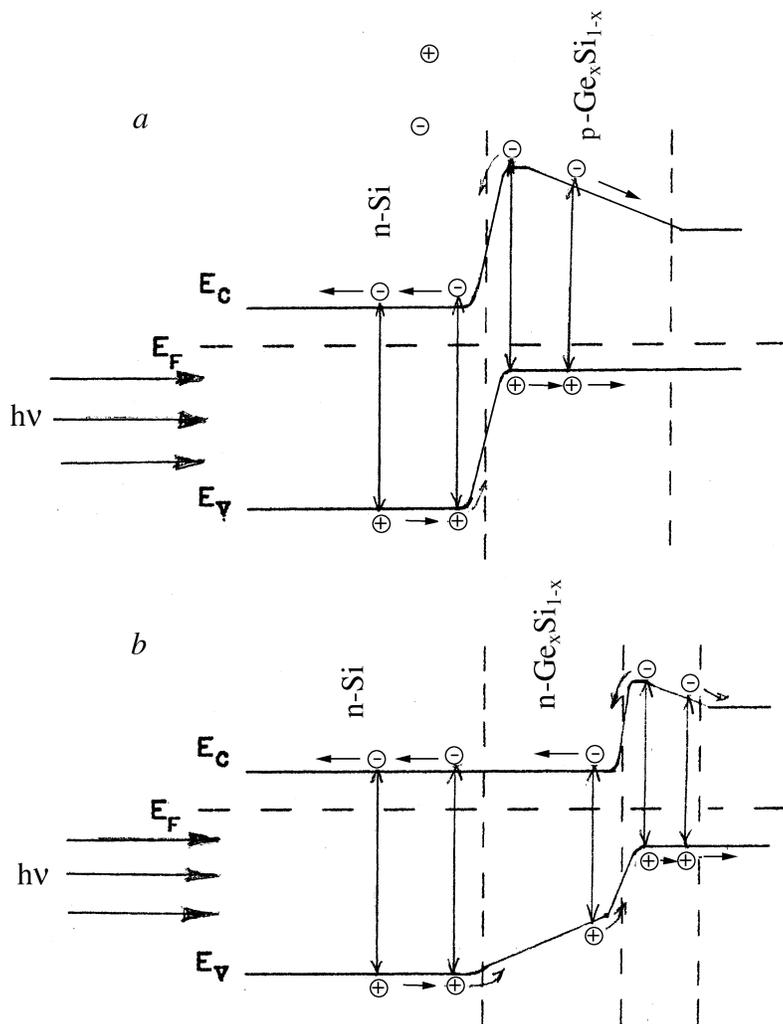


Рис. 1. Диаграммы энергетических зон эпитаксиальных гетероструктур: $(n)\text{Si}-(p)\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ (a) и $(n)\text{Si}-(n)\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x-(p)\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ (b).

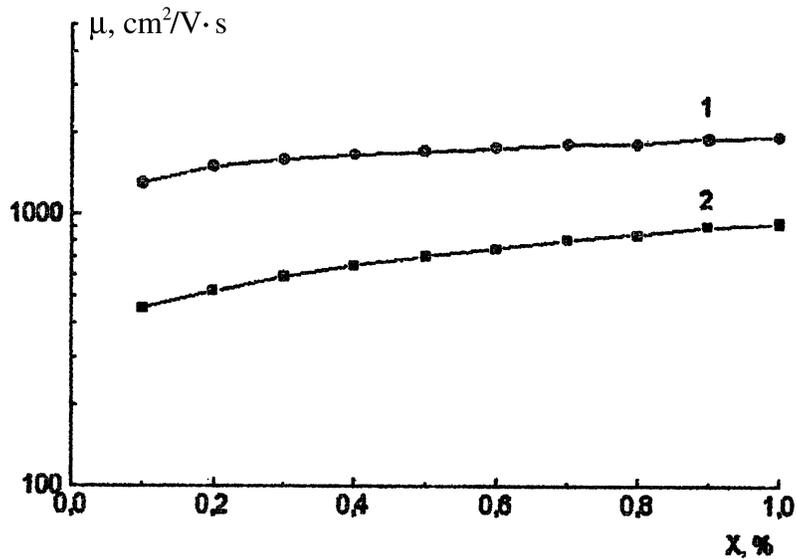


Рис. 2. Зависимость подвижностей электронов (1) и дырок (2) от состава твердого раствора $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$.

100% Ge на поверхности пленки. Соответственно ширина запрещенной зоны твердого раствора также меняется плавно от $E_{g,\text{Si}} = 1.1 \text{ eV}$ у подложки до $E_{g,\text{Ge}} = 0.71 \text{ eV}$ на поверхности эпитаксиальной пленки. Приведенная на рис. 1, а энергетическая диаграмма таких гетероструктур $(n)\text{Si}-(p)\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ показывает, что это приводит к изменению основных параметров, таких как удельное сопротивление ρ , концентрации мелких акцепторов N_a и доноров N_d , подвижности носителей тока μ и т. д.

На рис. 2 приведены зависимости подвижностей электронов μ_n и дырок μ_p от состава твердого раствора "x", полученные холловскими измерениями. Видно, что значения μ_n и μ_p возрастают с ростом плотности атомов Ge в твердом растворе. Это легко объяснить тем, что μ_n и μ_p в Ge больше, чем в Si для определенной концентрации примеси. При этом следует отметить, что рост подвижности с увеличением "x" был бы еще более высоким. Однако с ростом концентрации носителей подвижности уменьшаются. В результате как μ_n , так μ_p незначительно увеличиваются с увеличением "x".

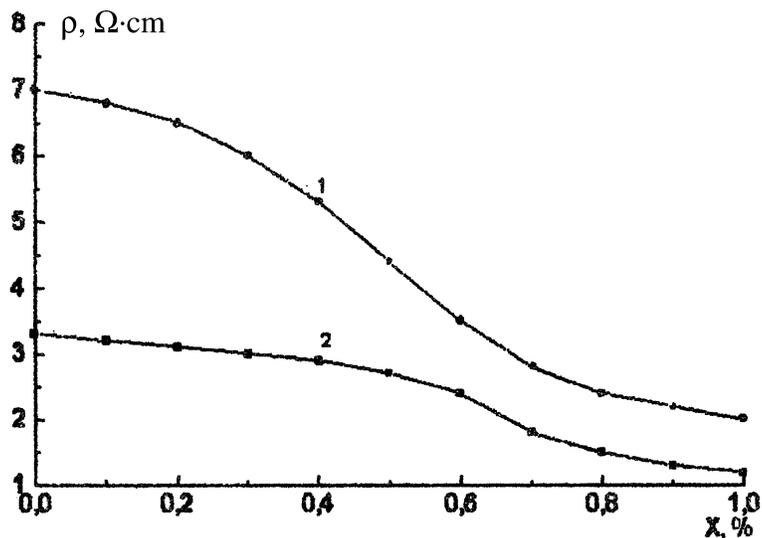


Рис. 3. Зависимость удельного сопротивления (ρ) пленок варизонных твердых растворов $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$, выращенных из оловянного (1) и галлиевого (2) растворов-расплавового состава.

Рис. 3 представляет зависимость удельного сопротивления от состава твердого раствора в виде $\rho = f(x)$, измеренного при 300 К четырехзондовым методом путем послойного удаления слоев [9] для пленок, выращенных из оловянного и галлиевого растворов-расплавов. Видно, что сопротивления пленок, выращенных из оловянного раствора-расплава, выше, чем у пленок, выращенных из галлиевого раствора-расплава. В то же время удельное сопротивление таких типов пленок нелинейно убывает с увеличением Ge в составе твердого раствора, что связано с ростом подвижностей μ_n и μ_p (рис. 2) и с тем, что Sn и Ga в Si образуют более глубокие акцепторные уровни (0.27 и 0.072 eV), чем в Ge (0.12 и 0.011 eV) [10].

С целью определения диапазона спектральной чувствительности гетероструктур $(n)\text{Si}-(n)\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x-(p)\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ был исследован их фототок в режиме тока короткого замыкания на монохроматоре МДР-4. Источником света служила галогеновая лампа накаливания с мощно-

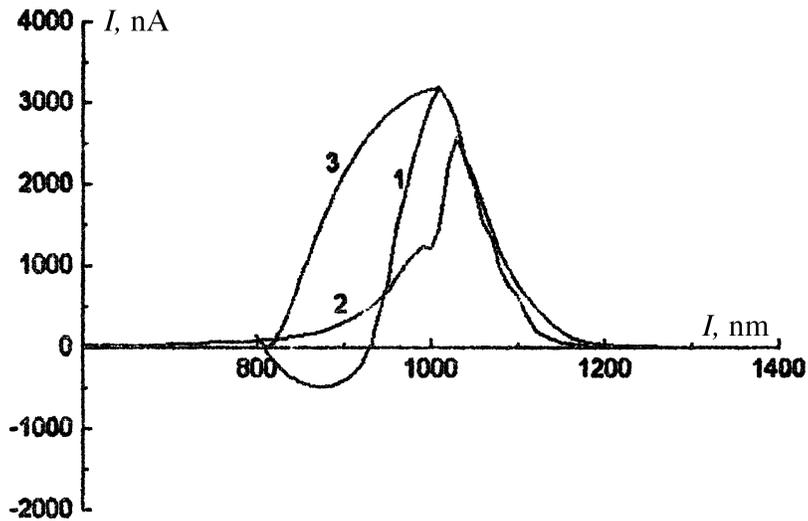


Рис. 4. Зависимость фотоотклика $\text{Si-Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ гетероструктур, полученных на кремниевых подложках из галлиевого (1,3) и оловянного (2) растворов-расплавов: 1 — до и 2 — после термообработки.

стью 100 W, питаемая от стабилизированного источника тока Б5-20. Образцы освещались со стороны подложки. Корректировка спектрального состава осуществлялась с помощью калиброванного стандартного кремниевого фотоприемника.

На рис. 4 приведены типичные спектральные характеристики $(n)\text{Si}-(p)\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ гетероструктур, полученных из галлиевого и оловянного растворов-расплавов. Анализ рис. 4 показывает, что для структуры, полученной из галлиевого раствора-расплава, имеет место инверсия знака фотоотклика при $\lambda = 930$ и 820 nm. Аналогичный результат был получен ранее Доннелли и Милнсом [11] на анизотипных резках $(n)\text{Si}-(p)\text{Ge}$ гетеропереходах, у которых инверсия знака происходит при значениях длин волн $\lambda = 1.2$ и $1.8 \div 1.9 \mu\text{m}$. Ван Опдорп и Враккинг [12] объяснили этот результат переходами зона-зона в Ge и Si и фотоэмиссией электронов из состояний на границе раздела и из валентной зоны Ge в зону проводимости Si. Для таких структур соответствует модель, представляющая гетеропереход в виде двух диодов, включенных навстречу друг другу.

Однако в нашем случае инверсия знака фототока происходит при длинах волн $\lambda = 930$ и 820 nm (рис. 4), что связано с тем, что рассмотренные Доннелли и Милнсом гетеропереходы резкие, а полученные нами гетеропереходы плавные. Как видно из рис. 4, в структурах, выращенных из оловянного раствора-расплава, инверсия знака фотоотклика не наблюдается, что, по-видимому, связано с относительно высокой плотностью состояний на гетерогранице между подложкой и эпитаксиальной пленкой. Соответственно вклад в фото-э.д.с. дают лишь электронно-дырочные пары, генерированные светом на расстоянии от $p-n$ -перехода, меньшем, чем диффузионная длина неравновесных носителей (L_d) (рис. 1). Как видно из рис. 1, основная часть фотонов, прошедших через толщину Si подложки, начинает поглощаться варизонным твердым раствором в слое с E_g , соответствующим квантам с энергией $h\nu \geq E_g$. При этом из-за уловакивающего действия квазиэлектрического тянущего поля, обусловленного варизонностью слоя, электроны, генерированные вне области объемного заряда, не могут участвовать в генерации фото-э.д.с. Поэтому для использования варизонных твердых растворов $Si_{1-x}Ge_x$ в целях преобразования ИК части солнечного излучения следует создать $p-n$ -переход в слое варизонного твердого раствора на определенной глубине (d), соответствующей максимальной эффективности преобразования. На рис. 1, *b* показана равновесная диаграмма энергетических зон варизонных $(n)Si-(n)Si_{1-x}Ge_x-(p)Si_{1-x}Ge_x$ гетероструктур. В этом случае длинноволновая граница спектральной чувствительности смещается в сторону ИК излучения. В таблице приведены измеренные значения граничной длины волны λ в зависимости

Данные исследования длинноволновой границы λ в зависимости от состава варизонного твердого раствора $Si_{1-x}Ge_x$

№	Состав "x" твердого раствора $Si_{1-x}Ge_x$	λ , μm	E_g , eV
1	0.05	1.15	1.07
2	0.10	1.25	1.01
3	0.20	1.28	0.97
4	0.35	1.38	0.90
5	0.50	1.47	0.84
6	0.70	1.54	0.81
7	0.90	1.60	0.77

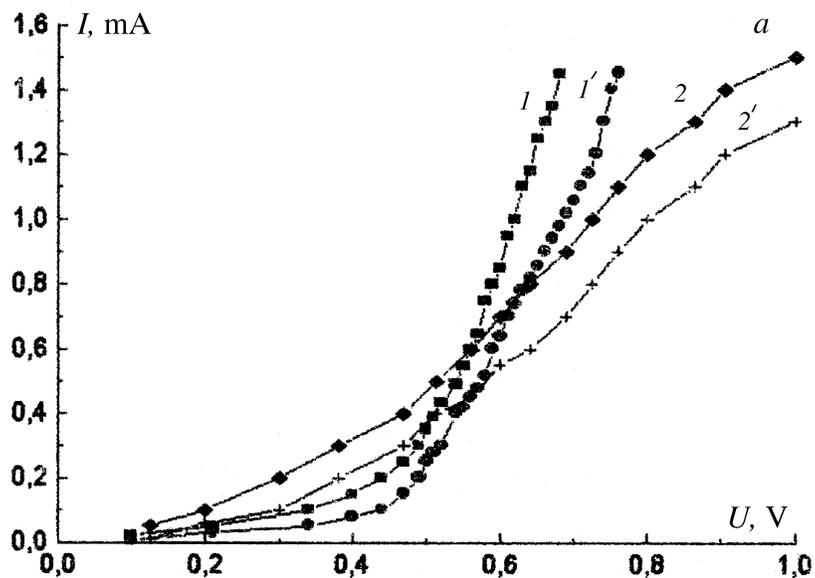


Рис. 5. Прямые (а) и обратные (b) темновые вольт-амперные характеристики $\text{Si-Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ гетероструктур, выращенных на кремниевых подложках из галлиевого (I, I') и оловянного ($2, 2'$) растворов-расплавов до (I, I') и после ($2, 2'$) термообработки соответственно.

от состава "x" твердого раствора и вычисленные значения E_g по выражению $E_g = 1.241/\lambda$ eV.

Из данных таблицы видно, что эпитаксиальные пленки варизонных твердых растворов $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ обладают фоточувствительностью в интервале длин волн от 1.15 до $1.6 \mu\text{m}$, следовательно, гетероструктуры $(n)\text{Si}-(n)\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x-(p)\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ могут быть успешно применены в качестве узкозонного элемента каскадного фотопреобразователя, преобразующего часть ИК солнечного излучения. Кроме того, при создании определенных условий, присущих лавинным фотодиодным структурам, возможно также успешное применение вышеприведенных структур для создания фотоприемников, регистрирующих световые сигналы с длиной волны $1.3 \div 1.5 \mu\text{m}$ [7].

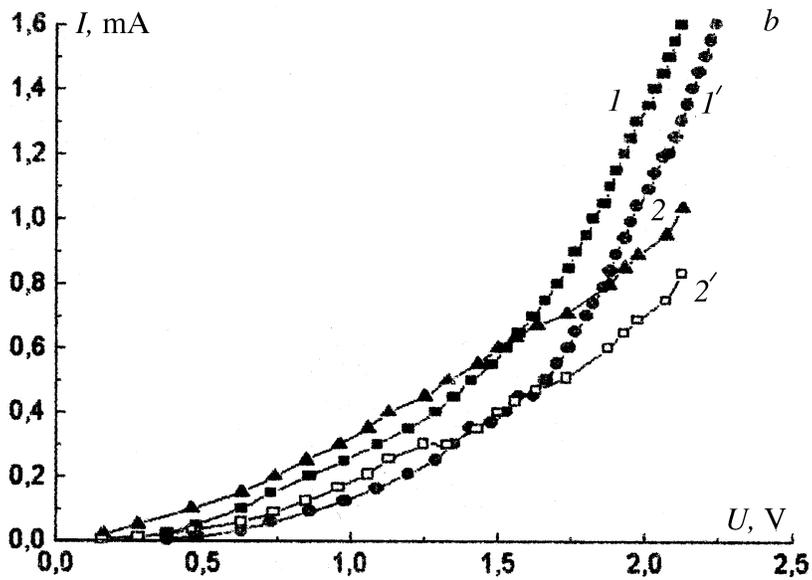


Рис. 5 (продолжение).

Показателем качества $p-n$ -перехода является его ВАХ. На рис. 5 приведены прямые (рис. 5, *a*) и обратные (рис. 5, *b*) темновые ВАХ $\text{Si-Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ гетероструктур, полученных как из галлиевого, так и из оловянного растворов-расплавов. Анализ ВАХ показывает, что, как и предполагалось, на гетерогранице имеются рекомбинационные центры, обуславливающие утечку носителей заряда через гетеропереход. Кроме того, еще из рисунка видно, что структуры, полученные из галлиевого раствора-расплава, имеют лучшую характеристику (кривые 1 на рис. 5, *a* и *b*), чем структуры, полученные из оловянного раствора-расплава (кривые 2 на рис. 5, *a* и *b*). Тем не менее из этих кривых видно, что имеются большие утечки, особенно в прямом включении. С целью исследования влияния температурного воздействия на ВАХ образцы подвергались термообработке в потоке очищенного водорода при температуре $650-700^\circ\text{C}$ в течение 20–30 min. Исследования ВАХ и спектрального отклика показали улучшение характеристик образцов

(рис. 5, *a* и *b*, кривые 3 и 4), которые объясняются тем, что образованные на гетерогранице рекомбинационные центры рассасываются под влиянием высокотемпературного воздействия. Кроме того, после температурного воздействия заметно улучшалась спектральная характеристика структур, полученных из галлиевого раствора-расплава. Исчезла инверсия знака тока короткого замыкания, и тем самым расширился диапазон спектрального отклика в коротковолновую сторону. Заметного изменения спектрального отклика структур, полученных из оловянного раствора-расплава после термообработки, не произошло.

Таким образом, из анализа полученных результатов можем заключить, что структуры $\text{Si-Si}_{1-x}\text{Ge}_x$, полученные из галлиевого и оловянного растворов-расплавов, имеют различные плотности состояний на гетерогранице между подложкой и эпитаксиальной пленкой. Однако несмотря на это, они могут быть вполне успешно использованы как для изготовления узкозонных элементов каскадных фотопреобразователей, преобразующих часть ИК спектра солнечного излучения, так и в качестве фотоприемников для ВОЛС в области длин волн $\lambda = 1.3$ и $1.55 \mu\text{m}$. Кроме этого, они также могут быть успешно использованы в качестве буферного слоя для других полупроводниковых структур, получаемых из других полупроводниковых материалов.

Список литературы

- [1] Лидоренко Н.С., Евдокимов В.М. // Гелиотехника. 1994. № 1. С. 3–10.
- [2] Wetting W. // Solar Energy Materials and Solar Cells. 1995. V. 38. P. 487–500.
- [3] Саидов М.С. // Гелиотехника. 1997. № 5–6. С. 57–67.
- [4] Саидов А.С., Сапаев Б., Кошчанов Э.А., Сапаров Д.В. // ДАН РУз. 1994. № 11. С. 18–19.
- [5] Саидов А.С., Лейдерман А.Ю., Сапаев Б., Каражанов С.Ж. // ФТП. 1993. Т. 27. В. 2. С. 256–259.
- [6] Саидов А.С., Лейдерман А.Ю., Сапаев Б., Каражанов С.Ж., Сапаров Д.В. // ФТП. 1996. Т. 30. В. 6. С. 1036–1038.
- [7] Техника оптической связи: Фотоприемники: Пер. с англ. / Под. ред. У. Тсанга. М.: Мир, 1988. 526 с.
- [8] Саидов А.С., Сапаев Б. // ДАН РУз. 1989. № 3. С. 24–25.
- [9] Павлов Л.П. Методы измерения параметров полупроводниковых материалов: Уч. для вузов по спец. "Полупроводниковые и микроэлектронные приборы". М.: Выш. шк., 1987. 239 с.

- [10] *Zu C.* Физика полупроводниковых приборов: В 2 кн. Кн. 1 / Пер. с англ. М.: Мир, 1984. 456 с.
- [11] *Donnelly J.P., Milnes A.G.* // Solid State Electron. 1966. V. 9. P. 174.
- [12] *Van Opdorp C., Vrakking J.* // Solid State Electron. 1967. V. 10. P. 955.