

# Влияние диффузии Те из подложки $n\text{-GaSb:Te}$ на свойства твердых растворов $\text{GaInAsSb}$ , выращенных в присутствии свинца

© Т.И. Воронина, Т.С. Лагунова, А.Ф. Липаев, Е.В. Куницына,  
Я.А. Пархоменко<sup>¶</sup>, М.А. Сиповская, Ю.П. Яковлев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 3 августа 2004 г. Принята к печати 19 августа 2004 г.)

Исследовано влияние диффузии Те из подложки  $n\text{-GaSb:Te}$  на транспортные и фотоэлектрические свойства твердых растворов  $\text{GaInAsSb}$ , выращенных из содержащих свинец растворов-расплавов. Показано, что наибольшее влияние диффузии Те из подложки наблюдается в эпитаксиальных слоях твердых растворов толщиной 1–2 мкм. В данных образцах при освещении их светом в области собственного поглощения возникает большой сигнал фотоэдс.

## 1. Введение

В работах [1,2] было показано, что при выращивании нелегированных эпитаксиальных слоев (толщиной до 5 мкм) твердых растворов  $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$  ( $0 < x < 0.22$ ,  $0 < y < 0.18$ ) на подложках  $n\text{-GaSb:Te}$  в процессе роста происходит диффузия теллура из подложки. При этом теллур действует двояко: с одной стороны, создает мелкие донорные уровни, а с другой — наряду с присущими твердому раствору  $\text{GaInAsSb}$  акцепторными уровнями с энергией активации  $E_{A1} = 0.035$  эВ и  $E_{A2} = 0.07$  эВ, обусловленными природными дефектами, создает новый акцепторный уровень с энергией активации  $E_{A3} = 0.1$  эВ, связанный с образованием структурного дефекта  $V_{\text{Ga}}\text{Te}$ . Было также установлено, что примесь Те, диффундирующего из подложки, сильно уменьшает подвижность дырок в твердом растворе, приводит к возрастанию поперечного ( $\mathbf{H} \perp \mathbf{j}$ ,  $\mathbf{j}$  — вектор плотности тока в образце) магнитосопротивления  $(\frac{\Delta\rho}{\rho})^\perp$  (при этом коэффициент магнитосопротивления  $B_r = (\frac{\Delta\rho}{\rho})^\perp / (\frac{\mu\mathbf{H}}{c})^2 > 1$ ), возникновению продольного ( $\mathbf{H} \parallel \mathbf{j}$ ) магнитосопротивления  $(\frac{\Delta\rho}{\rho})^\parallel$ , к появлению отрицательной фотопроводимости и долговременной релаксации фотопроводимости. Эти явления могут быть объяснены существованием в материале неоднородно распределенных заряженных центров, возникающих в результате диффузии теллура и приводящих к образованию кластерных скоплений. Таким образом, теллур, диффундирующий из подложки, изменяет свойства твердых растворов  $\text{GaInAsSb}$ .

## 2. Результаты исследований

Исследование свойств выращенных без использования свинца твердых растворов  $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$  в зависимости от состава показало [1,2], что при содержании индия  $x = 0.15$  в таких твердых растворах наблюдается

минимум концентрации дырок (рис. 1, кривая 1), обусловленный, по-видимому, возрастанием степени компенсации из-за уменьшения концентрации комплекса дефектов  $V_{\text{Ga}}\text{GaSb}$  с энергиями активации  $E_{A1}$  и  $E_{A2}$ . Именно в таких твердых растворах с  $x = 0.15$  влияние диффузии Те из подложки наиболее заметно.

В таких образцах при освещении их светом кроме фотопроводимости возникает большой сигнал фотоэдс (ФЭДС). Для увеличения чувствительности при измерении фотосигналов спектральные исследования проводились с использованием модулированного освещения образца. Возникающий при этом переменный сигнал регистрировался селективным усилителем и синхронным детектором на входе. Изучение ФЭДС проводилось для двух типов образцов: твердые растворы  $p\text{-Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$  ( $x = 0.15$ ), которые выращивались на подложках  $n\text{-GaSb:Te}$  с дополнительным изолирующим подслоем  $p\text{-GaSb}$  и без него. Спектральные зависимости ФЭДС, измеренные при  $T = 80$  и  $300$  К, представлены на рис. 2. Длинноволновая граница кривых соответ-

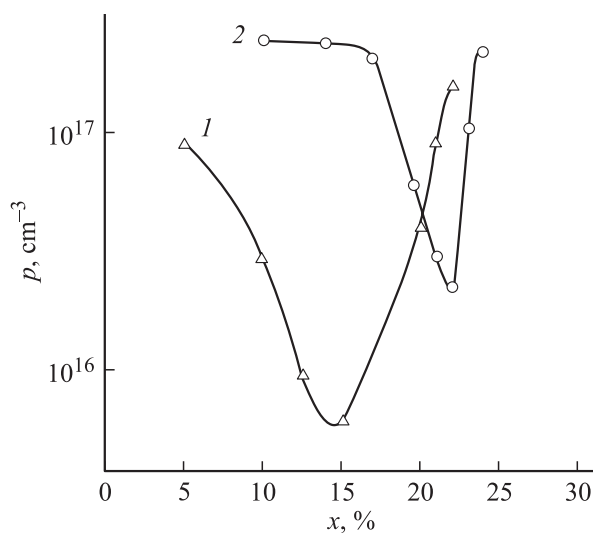
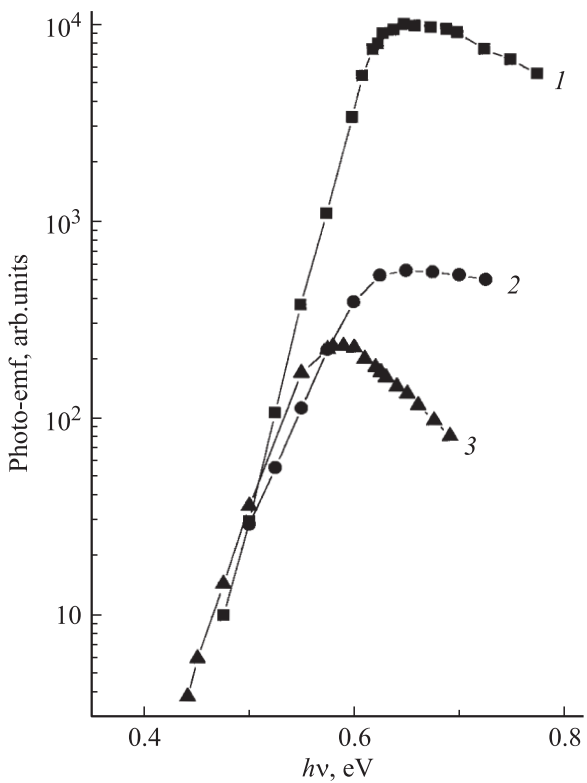


Рис. 1. Зависимости концентрации дырок от содержания индия ( $x$ ) в твердых растворах  $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ : 1 — без нейтрального растворителя Pb, 2 — в присутствии Pb.

<sup>¶</sup> E-mail: parkhomen@mail.ioffe.ru

№ образца	Наличие подслоя	$x$	Толщина, мкм	300 К			77 К				$E_{Ai}$ , эВ	$K = \frac{N_D}{N_A}$	ФЭДС, услед.			
				Тип проводимости	$\sigma$ , Ом <sup>-1</sup> см <sup>-1</sup>	$R$ , см <sup>3</sup> /Кл	$\mu_{300}$ , см <sup>2</sup> /(В·с)	Тип проводимости	$\sigma$ , Ом <sup>-1</sup> см <sup>-1</sup>	$R$ , см <sup>3</sup> /Кл			$\mu_{77}$ , см <sup>2</sup> /(В·с)	$B_r$	300 К	77 К
1	Есть	0.18	1.7	$p$	120	4.68	562	$p$	115	20.8	2400	1.0	0.023 0.07	0.1	3	5
2	Нет	0.18	5.0	$p$	46	5.6	233	$p$	14	26	366	5.2	0.02 0.06 0.11	0.61	11	25
3	Нет	0.18	2.0	$n$	—	—	2940	$p$	11	14.4	157	11.8	0.023 0.067	0.65	14	307
4	Есть	0.215	1.7	$p$	51	1.08	55	$p$	2.8	137.5	385	—	0.03 0.07	0.84	8	26
5	Нет	0.215	1.7	$n$	—	—	3330	$n$	—	—	450	—	—	—	11	360

ствует краю собственного поглощения. Ширина запрещенной зоны материала составляет  $E_g = 0.606$  эВ при  $T = 80$  К. Появление небольшой ФЭДС при  $T = 80$  К в образце с изолирующим подслоем ( $p_{77} = 6 \cdot 10^{15}$  см<sup>-3</sup>,  $\mu_{77} = 1950$  см<sup>2</sup>/(В·с) — рис. 2, кривая 2) связано с неоднородным распределением компенсирующих примесей и структурных дефектов в твердом растворе с  $x = 0.15$ . Выращивание твердых растворов без изолирующего подслоя из-за диффузии Те из подложки



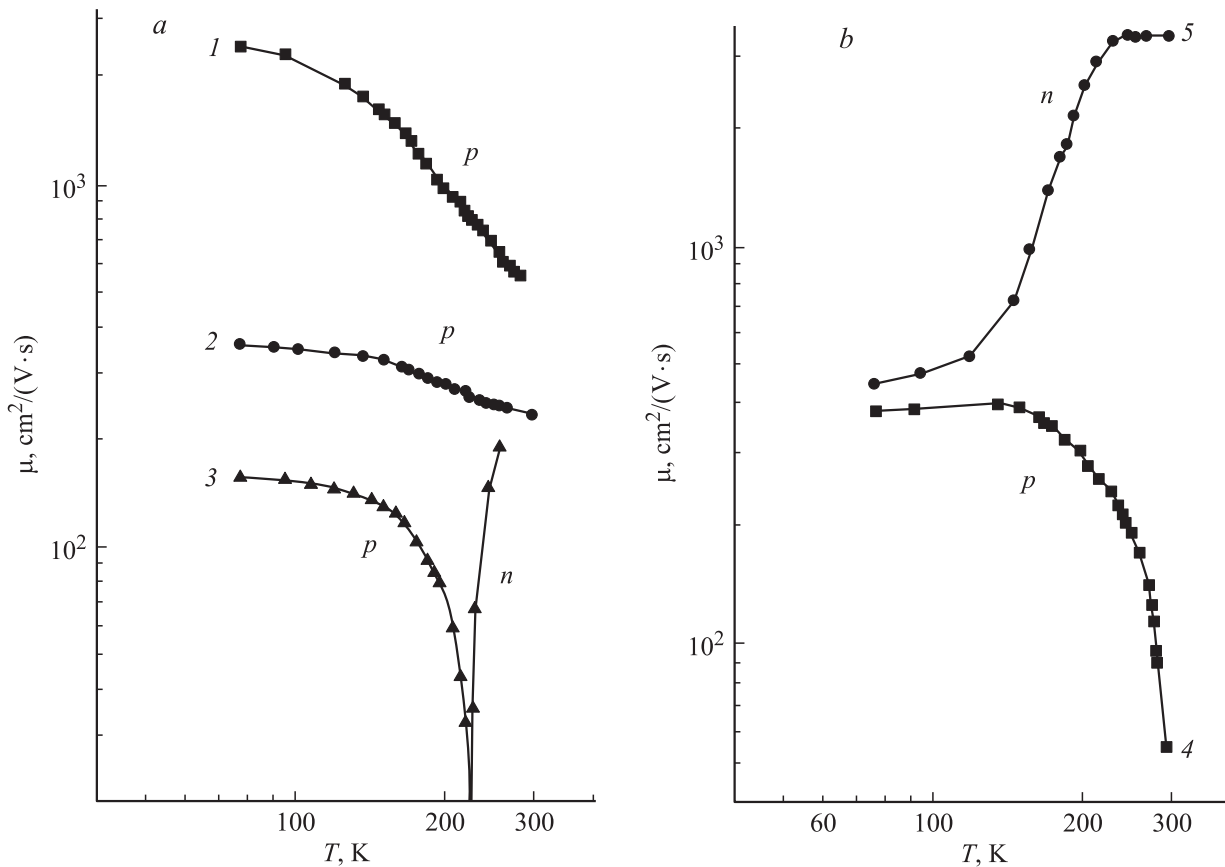
**Рис. 2.** Спектральные зависимости фотоэдс в твердых растворах  $Ga_{1-x}In_xAs_ySb_{1-y}$  ( $x = 0.15$ ), выращенных без использования свинца: 1, 3 — без изолирующего подслоя, 2 — с изолирующим подслоем. 1, 2 —  $T = 80$  К; 3 —  $T = 300$  К.

в слой приводит к образованию структурного дефекта  $V_{Ga}Te$ . Данный дефект представляет собой неоднородно распределенные заряженные центры, образующие кластерные скопления, что и создает значительные потенциальные барьеры в объеме полупроводника. В образце без дополнительного изолирующего подслоя ( $p_{77} = 3.3 \cdot 10^{16}$  см<sup>-3</sup>,  $\mu_{77} = 377$  см<sup>2</sup>/(В·с) — рис. 2, кривая 1) — там, где была возможна диффузия Те — сигнал ФЭДС возрастал более чем на порядок. Это можно объяснить существованием в материале значительных энергетических барьеров, разделяющих избыточные носители заряда полем. Следует отметить, что сигнал ФЭДС с ростом температуры падает на порядок (рис. 2, кривые 1 и 3) в результате уменьшения объема и высоты потенциальных барьеров, а также усиления термической ионизации центров.

Далее рассмотрим результаты исследований влияния Те, продифундировавшего из подложки  $n-GaSb:Te$ , на транспортные и фотоэлектрические свойства эпитаксиальных слоев твердых растворов  $GaInAsSb$ , выращенных из **содержащих свинец** растворов-расплавов, и приведем сравнение со свойствами твердых растворов, выращенных на подложке  $n-GaSb:Te$  без использования свинца.

Свинец играет важную роль в получении твердых растворов  $Ga_{1-x}In_xAs_ySb_{1-y}$  в области составов с  $x > 0.22$ , так как позволяет получать твердые растворы с высоким содержанием индия в твердой фазе  $x = 0.22-0.27$  [3]. Такие твердые растворы имеют ширину запрещенной зоны  $E_g = 0.49-0.52$  эВ ( $T = 300$  К) и могут быть использованы для создания оптоэлектронных приборов в области длин волн  $\lambda = 2.3-2.7$  мкм.

В работе [3] нами было показано, что в твердых растворах  $Ga_{1-x}In_xAs_ySb_{1-y}$ , выращенных из свинцовых растворов-расплавов на подложках  $n-GaSb:Te$  с дополнительным изолирующим подслоем  $p-GaSb$  (подслоем с параметрами  $p = 6 \cdot 10^{14}$  см<sup>-3</sup> при  $T = 77$  К,  $\rho \gtrsim 400$  Ом·см был получен из свинцового раствора-расплава), минимум концентрации дырок наблюдается



**Рис. 3.** Температурные зависимости подвижности носителей тока для твердых растворов  $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ , полученных в присутствии свинца:  $a - x = 0.18$ ,  $b - x = 0.215$ . Номера кривых соответствуют номерам образцов в таблице.

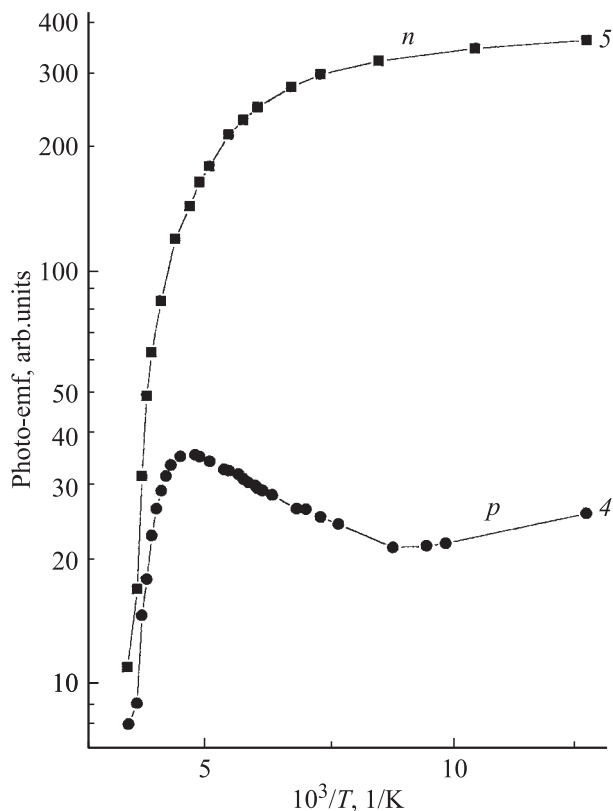
при содержании  $\text{In } x = 0.22$  (рис. 1, кривая 2). Принимая во внимание подобие зависимостей 1 и 2 на этом рисунке, мы ожидаем, что при выращивании твердых растворов  $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$  из свинцовых растворов-расплавов  $\text{Te}$ , диффундирующий из подложки, будет оказывать наибольшее влияние на свойства материала в области составов с  $x \approx 0.22$ .

Рассмотрим, как влияет  $\text{Te}$  из подложки на свойства твердых растворов  $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$  с  $x = 0.18$  и  $0.215$ , выращенных с использованием свинца. Были исследованы две группы образцов: эпитаксиальные слои твердых растворов, выращенные на дополнительном изолирующем подслое (образцы 1 и 4, см. таблицу), и слои, выращенные непосредственно на подложке  $n\text{-GaSb}:\text{Te}$  (образцы 2, 3, 5). Изменялись электропроводность ( $\sigma$ ), коэффициент Холла ( $R$ ), подвижность ( $\mu$ ), поперечное магнитосопротивление  $(\frac{\Delta\rho}{\rho})^\perp$  и ФЭДС при температурах  $T = 77\text{--}300$  К. Результаты измерений приведены в таблице и на рис. 3 и 4.

Как видно из таблицы, для твердого раствора с  $x = 0.18$  в образце 1 имеет место высокая подвижность дырок  $\mu_{77} = 2400 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ , обусловленная рассеянием на ионах примеси и колебаниях решетки. Температурная зависимость коэффициента Холла позволяет определить в данном материале уровни с энергиями активации

$E_{A1} = 0.023$  эВ и  $E_{A2} = 0.07$  эВ. Магнитосопротивление в образце 1 невелико:  $B_r = (\frac{\Delta\rho}{\rho})^\perp / (\frac{\mu H}{c})^2 = 1$ ; продольное магнитосопротивление отсутствует; ФЭДС практически отсутствует.

Совсем другая картина наблюдается для того же твердого раствора с содержанием индия  $x = 0.18$ , но выращенного без дополнительного подслоя, когда теллур диффундирует из подложки в твердый раствор. Если толщина образца 5 мкм (образец 2), то диффузия теллура происходит не на всю толщину слоя. При этом образец сохраняет  $p$ -тип проводимости, но значения подвижности меньше, чем в образце 1 как при 77, так и при 300 К (рис. 3,  $a$ , ср. кривые 2 и 1). Поперечное магнитосопротивление  $(\frac{\Delta\rho}{\rho})^\perp$  возрастает, при этом  $B_r = (\frac{\Delta\rho}{\rho})^\perp / (\frac{\mu H}{c})^2$  достигает 5 и появляется ФЭДС. Все эти эффекты указывают на существование крупных неоднородностей, возникших из-за проникновения теллура из подложки в эпитаксиальный слой. Самые существенные изменения свойств твердого раствора  $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$  ( $x = 0.18$ , дополнительный подслоя отсутствует) наблюдаются, когда толщина слоя составляет  $\sim 2$  мкм (образец 3). В данном случае  $\text{Te}$  проникает на всю глубину слоя, создавая крупные кластерные скопления. Из-за высокой степени компенсации тип проводимости



**Рис. 4.** Температурные зависимости фотоэдс для твердого раствора  $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$  ( $x = 0.215$ ): 4 — с изолирующим подслоем; 5 — без изолирующего подслоя. Номера кривых соответствуют номерам образцов в таблице.

изменяется с дырочного на электронный при  $T > 200$  К. В таких образцах наблюдается очень большая ФЭДС, достигающая 307 усл.ед. при  $T = 77$  К (см. таблицу). Данная величина намного больше, чем в таких же образцах, выращенных с дополнительным подслоем.

Рассмотрим твердые растворы  $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$  с содержанием индия  $x = 0.215$  (толщина слоев  $\sim 1.7$  мкм), выращенные из свинцовых растворов-расплавов как на дополнительном изолирующем подслое (образец 4), так и непосредственно на подложке  $n\text{-GaSb:Te}$  (образец 5). В образце 4 (рис. 3, б, кривая 4) тип проводимости — дырочный, однако подвижность значительно ниже, чем в образце 1 с  $x = 0.18$ , выращенном на дополнительном подслое (рис. 3, а, кривая 1). Это связано с тем, что при  $x \approx 0.22$  наблюдается максимум степени компенсации, что приводит к сильной неоднородности материала (рис. 1, кривая 2). Из температурной зависимости коэффициента Холла можно определить энергии активации  $E_{A1} = 0.03$  эВ и  $E_{A2} = 0.07$  эВ. ФЭДС в образце 4 составляла при  $T = 77$  К 26 усл.ед., а при  $T = 300$  К — 8 усл.ед.

Для твердых растворов  $\text{GaInAsSb}$  с содержанием индия  $x = 0.215$ , выращенных непосредственно на подложке  $n\text{-GaSb:Te}$  (образец 5), тип проводимости — электронный при  $77 < T < 300$  К. Подвижность при

$T = 77$  К равна  $\mu_{77} = 450 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ , а при температурах выше 150 К наблюдался резкий рост холловской подвижности из-за перехода к собственной проводимости (рис. 3, б, кривая 5). ФЭДС при  $T < 150$  К составляла 360 усл.ед. (рис. 4, кривая 5). При повышении температуры ФЭДС медленно уменьшалась, а затем резко падала и при  $T = 300$  К составляла 11 усл.ед. Такой ход температурной зависимости объясняется наличием в образце потенциальных барьеров, которые понижаются с повышением температуры, а также из-за усиления термической ионизации центров.

Важно отметить, что такие большие значения ФЭДС наблюдались только в образцах, выращенных без дополнительного подслоя (рис. 4, кривая 5). В образцах, выращенных с дополнительным подслоем, ФЭДС была на порядок ниже (рис. 4, кривая 4).

### 3. Заключение

Исследовано влияние диффузии теллура из подложки  $n\text{-GaSb:Te}$  на электрические и фотоэлектрические свойства твердых растворов  $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ , выращенных как без использования свинца ( $x = 0.15$ ), так и из растворов-расплавов, содержащих свинец ( $x = 0.18$  и  $0.215$ ).

Получены следующие результаты.

1. Наибольшее влияние диффузии теллура из подложки наблюдается в твердых растворах  $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$  с содержанием индия  $x = 0.15$ , изготовленных без использования свинца, и с  $x = 0.215$ , полученных в присутствии свинца, обладающих низкими концентрацией и подвижностью дырок.

2. Диффузия теллура из подложки  $n\text{-GaSb:Te}$  в твердые растворы  $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ , выращенные без дополнительного подслоя, приводит к возникновению большой ФЭДС при освещении образцов светом в области собственного поглощения. Наибольший сигнал ФЭДС наблюдался при  $T = 77$  К в тонких образцах с  $x = 0.15$ , выращенных без использования свинца, и с  $x = 0.215$  — в присутствии свинца.

Наблюдаемый эффект возникновения ФЭДС требует подробного исследования, так как может представлять интерес для изготовления высокочувствительных фотоэлементов.

### Список литературы

- [1] А.Н. Баранов, А.Н. Дахно, Б.Е. Джуртанов, Т.С. Лагунова, М.А. Сиповская, Ю.П. Яковлев. ФТП, **24**, 98 (1990).
- [2] А.Н. Баранов, Т.И. Воронина, А.Н. Дахно, Б.Е. Джуртанов, Т.С. Лагунова, М.А. Сиповская, Ю.П. Яковлев. ФТП, **24**, 1072 (1990).
- [3] Т.И. Воронина, Т.С. Лагунова, Е.В. Куницына, Я.А. Пархоменко, Д.А. Васюков, Ю.П. Яковлев. ФТП, **35**, 941 (2001).

Редактор Т.А. Полянская

## Influence of the tellurium diffusion from a $n$ -GaSb:Te substrate on properties of GaInAsSb solid solutions grown from lead-containing melts

*T.I. Voronina, T.S. Lagunova, A.F. Lipaev,  
E.V. Kunitsyna, Ya.A. Parkhomenko, M.A. Sipovskaya,  
Yu.P. Yakovlev*

Ioffe Physicotechnical Institute,  
Russian Academy of Sciences,  
194021 St. Petersburg, Russia

**Abstract** The influence of tellurium diffusion from a  $n$ -GaSb:Te substrate on transport and photoelectric properties of GaInAsSb solid solutions grown from lead-containing melts has been investigated for the first time. It is shown, that the strongest influence of the tellurium diffusion from the substrate is observed in epitaxial layers of 1–2  $\mu\text{m}$  of thickness solid solutions having both low hole concentration and low hole mobility. In these samples a high photo-emf signal has been observed under light illumination in the region of the bandgap absorption.