

где  $\sigma = 5,669 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}^4$  — постоянная Стефана-Больцмана;  
 $T_f = 295 \text{ К}$  — температура фона;  
 $T_0 = 77 \text{ К}$  — температура фотоприемника;  
 $\xi = 0,688$  — коэффициент пропускания окна из ZnSe;  
 $\eta = 0,7$  — квантовый выход;  
 $2\theta = 18,5^\circ$  — угол поля зрения.  
 Получим  $\Phi = 5,0 \cdot 10^{-7} \text{ Вт}$  и  $S = 1,92 \text{ А/Вт}$ .

### Заключение

Продемонстрирована технология изготовления меза-фотодиодов путем имплантации ионов мышьяка в гетероэпитаксиальные слои КРТ *n*-типа. Отработана методика двухстадийного отжига, включающая в себя активацию мышьяка и заполнение генерируемых при этом вакансий ртути. Параметры тестовых фотодиодов сравнимы с лучшими достигаемыми параметрами для *p-n*-переходов с длинноволновой границей чувствительности 9,7 мкм.

Работа поддержана комплексным интеграционным проектом СО РАН 3.20.

### Литература

1. Рогальский А. Инфракрасные детекторы. — Новосибирск: Наука, 2003.
2. Мынбаев К. Д., Иванов-Омский В. И. // ФТП. 2006. Т. 40. С. 3—22.
3. Lopes V. C., Syllaios A. S. and Chen M. C. // Sem. Sci. Technol. 1993. V. 8. P. 824.
4. Васильев В. В., Придеин А. В. // Прикладная физика. 2005. № 6. С. 118—124.
5. Сидоров Ю. Г., Дворецкий С. А., Михайлов Н. Н. и др. // Оптический журнал. 2000. Т. 67. № 1. С. 39—45.
6. Bubulac L. O., Lo D. S., Tennant W. E., Edwall D. D., Chen J. C., Ratusnik J., Robinson J. C. and Bostrup G. // Appl. Phys. Lett. 1987. V. 50. P. 22.
7. Bubulac L. O., Edwall D. D., McConnell D., DeWames R. E., Blazejewski E. R. and Gertner E. R. // Semicond. Sci. Technol. 1990. V. 5. P. 45—48.

Статья поступила в редакцию 11 октября 2006 г.

## The photodiodes fabrication on a basis of *n*-HgCdTe by As<sup>+</sup> implantation

V. V. Vasiliev, V. S. Varavin, T. I. Zakhaiash, D. Yu. Protasov, R. N. Smirnov,  
 D. G. Ikusov

Institute of Semiconductor Physics SB RAS, Novosibirsk, Russia

*The p<sup>+</sup>-n-junction were fabricated by arsenic ion implantation into MBE n-HgCdTe/GaAs layers. The profiles of the arsenic distribution were measured by SIMS. For electric activation of the arsenic's atoms a two-stage annealing was used. The test diodes were fabricated using mesa-technology. For obtained photodiodes a dark current density is 0.04 A/cm<sup>2</sup> at reverse bias V = -0,1 V. The value of product R<sub>0</sub>·A lays in a range 20—28 Ω·cm<sup>2</sup> for wavelength cutoff λ<sub>s</sub> = 9.7 μm. The estimation of a integral amper-watt sensitivity gives value of S = 1.92 A/W.*

УДК 621.315

## Электрофизические и фотоэлектрические свойства МДП-структур на основе варизонного КРТ МЛЭ

А. В. Войцеховский, С. Н. Несмелов, С. М. Дзядух  
 СФТИ при ТГУ, г. Томск, Россия

В. С. Варавин, С. А. Дворецкий, Н. Н. Михайлов, Ю. Г. Сидоров,  
 В. В. Васильев, Т. И. Захарьяш, Ю. П. Машуков  
 Институт физики полупроводников СО РАН, г. Новосибирск, Россия

*Экспериментально исследовано влияние сопротивления объема и приповерхностных варизонных слоев на электрофизические и фотоэлектрические характеристики МДП-*

**структур, созданных на основе гетероэпитаксиального КРТ, выращенного методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ). Показано, что для структур без варизонного слоя при составе  $x = 0,22$  в сильной инверсии дифференциальное сопротивление ОПЗ ограничено процессами туннельной рекомбинации через глубокие уровни.**

Узкозонный твердый раствор  $Hg_xCd_{1-x}Te$  (КРТ) является основным материалом для создания высокочувствительных инфракрасных (ИК) детекторов, действующих в спектральных диапазонах окон прозрачности атмосферы 3—5 и 8—12 мкм [1—3]. Использование метода МЛЭ предоставляет возможности создания пленок  $HgCdTe$  с заданными профилями распределения по толщине компонентного состава и легирующей примеси. Интерес к МДП-структурам на основе варизонного эпитаксиального  $HgCdTe$  обусловлен необходимостью пассивации поверхности матриц фотодиодов на основе  $HgCdTe$ , а также дополнительными возможностями, предоставляемыми варизонными структурами для разработки монолитных конструкций детекторов.

В данной работе приведены результаты экспериментальных исследований зависимостей фото-ЭДС, емкости и проводимости от напряжения, частоты и температуры для МДП-структур  $HgCdTe/SiO_2/Si_3N_4$  и  $HgCdTe/AOP$ .

### Образцы и методики эксперимента

Исследуемые МДП-структуры изготавливались на основе  $HgCdTe$  дырочного ( $x = 0,22$ ) и электронного ( $x = 0,21—0,32$ ) типов проводимости,

выращенного методом МЛЭ на подложках из  $GaAs(013)$ . При выращивании гетероструктур с обеих сторон рабочего слоя (толщина 7,7—8,3 мкм, состав 0,21—0,32) создавались варизонные слои с повышенным компонентным составом  $CdTe$  (толщина приповерхностного варизонного слоя 0,5—0,7 мкм, причем состав у поверхности достигал 0,43—0,48). Перед нанесением диэлектрических покрытий методом Холла определялись электрические параметры материала, а время жизни неосновных носителей  $\tau$  определялось методом релаксации фотосигнала с помощью бесконтактной СВЧ-методики.

Для исследованных образцов  $n$ - $HgCdTe$  подвижность основных носителей изменялась от 16000 до 78000  $cm^2 \cdot V^{-1} \cdot c^{-1}$ , время жизни — от 0,03 до 10 мкс, концентрация основных носителей — от  $2 \cdot 10^{14}$  до  $4,9 \cdot 10^{16} cm^{-3}$ . Для образцов  $p$ -типа ( $x = 0,22$ ) подвижность основных носителей изменялась от 420 до 508  $cm^2 \cdot V^{-1} \cdot c^{-1}$ , время жизни не превышало 10 нс, концентрация основных носителей составляла  $8,4 \cdot 10^{14} \div 3 \cdot 10^{16} cm^{-3}$ . Исходная проводимость для исследованных образцов изменялась от 0,63 до 116  $Om^{-1} \cdot cm^{-1}$ . Основные электрические параметры гетероструктур приведены в таблице, а пример распределения состава по толщине эпитаксиальной пленки показан на рис. 1.

Исходные параметры гетероструктур

| № структуры | $x$   | $n(p), cm^{-3}$     | $\mu, cm^2 \cdot V^{-1} \cdot c^{-1}$ | $\sigma, Om^{-1} \cdot cm^{-1}$ | $\tau, мкс$ | $d, мкм$ | $d_I, мкм$  |
|-------------|-------|---------------------|---------------------------------------|---------------------------------|-------------|----------|-------------|
| 1           | 0,221 | $1,8 \cdot 10^{14}$ | 78000                                 | 2,6                             | 2—3         | 7,7      | 0,5         |
| 2           | 0,214 | $2,4 \cdot 10^{14}$ | 85000                                 | 3,5                             | 5—7         | 7,8      | 0,5         |
| 3           | 0,23  | $3,7 \cdot 10^{14}$ | 70000                                 | 4,5                             | 6,5—7       | 8,3      | 0,7         |
| 4           | 0,23  | $1 \cdot 10^{15}$   | 90000                                 | 15                              | 2—2,5       | 7,0      | 0,5         |
| 5           | 0,22  | $4,6 \cdot 10^{15}$ | 72000                                 | 53                              | 0,25        | 6,7      | 0,45        |
| 6           | 0,226 | $9,2 \cdot 10^{15}$ | 33000                                 | 50                              | 7—10        | 8,5      | 0,5         |
| 7           | 0,22  | $1,3 \cdot 10^{16}$ | 58000                                 | 116                             | 0,04        | 7,0      | 0,6         |
| 8           | 0,22  | $4,9 \cdot 10^{16}$ | 21000                                 | 160                             | 4—5         | 12,4     | 0,4         |
| 9           | 0,292 | $2 \cdot 10^{14}$   | 28000                                 | 0,9                             | 5,5—8       | 7,0      | 0,4         |
| 10          | 0,295 | $2,5 \cdot 10^{14}$ | 25000                                 | 1                               | 10          | 7,5      | 0,4+0,3CdTe |
| 11          | 0,324 | $4,1 \cdot 10^{14}$ | 16000                                 | 1,1                             | 10          | 8,1      | 0,5         |
| 12          | 0,312 | $5,5 \cdot 10^{14}$ | 20000                                 | 1,8                             | >10         | 7,3      | 0,4         |
| 13          | 0,22  | $7,2 \cdot 10^{15}$ | 490                                   | 0,63                            | 0,022       | 8        | 0,4         |
| 14          | 0,226 | $8,4 \cdot 10^{15}$ | 455                                   | 0,63                            | <0,01       | 8,2      | 0,3         |
| 15          | 0,221 | $8,8 \cdot 10^{15}$ | 502                                   | 0,72                            | 0,006       | 8,1      | 0,45        |
| 16          | 0,221 | $1,1 \cdot 10^{16}$ | 480                                   | 0,87                            | <0,01       | 8,8      | 0,5         |
| 17          | 0,227 | $3 \cdot 10^{16}$   | 420                                   | 2                               | <0,01       | 7        | 0,9         |

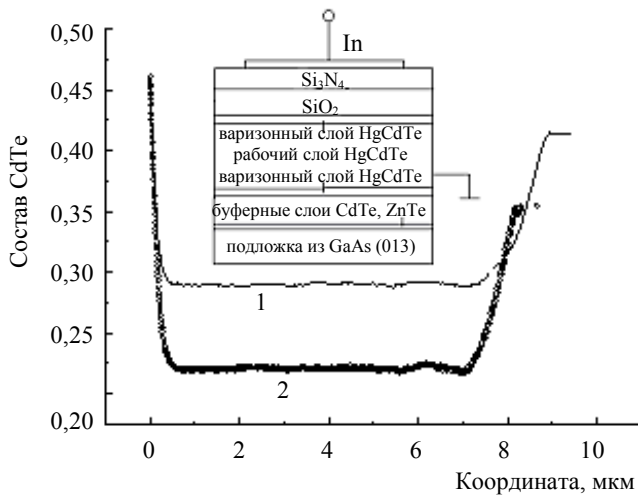


Рис. 1. Распределение состава по толщине эпитаксиальной пленки для структур № 5 (1) и № 9 (2), измеренное автоматическим эллипсометром в процессе роста.

На вставке приведена схема поперечного сечения МДП-структуры с двухслойным диэлектриком

В таблице использованы следующие обозначения:  $x$  — состав CdTe в рабочем слое HgCdTe;  $n(p)$ -концентрация основных носителей (гальваномагнитные измерения проводились при магнитной индукции  $B = 0,05$  Тл);  $\mu$  — подвижность основных носителей;  $\sigma$  — проводимость;  $\tau$  — время жизни неосновных носителей;  $d$  — толщина рабочего слоя структуры HgCdTe;  $d_1$  — толщина верхнего варизонного слоя HgCdTe.

В качестве пассивирующего покрытия для структур № 2, 4—12, 14—17 использовался двухслойный низкотемпературный диэлектрик  $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ , для структур № 1 — в качестве диэлектрика использовалась анодно-оксидная пленка (АОП), полученная при использовании аммиачного или КОН-источника. Для МДП-структур № 3 в качестве пассивирующих покрытий использовались АОП и  $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ . Гетероструктуры № 1—12 имели электронный тип проводимости, а № 13—17 — дырочный.

Диэлектрические покрытия (анодно-оксидная пленка или низкотемпературный плазмохимический диэлектрик  $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ ) для части гетероструктур наносились поверх варизонного слоя, а для других гетероструктур — после удаления приповерхностного варизонного слоя путем травления в  $\text{HBr}-\text{Br}_2$ . На поверхности диэлектрика каждого образца формировалось более 50 индиевых электродов толщиной 0,5 мкм и размером 0,5×0,5 мм. Тыловой контакт создавался на поверхности эпитаксиальной пленки после локального удаления диэлектрика.

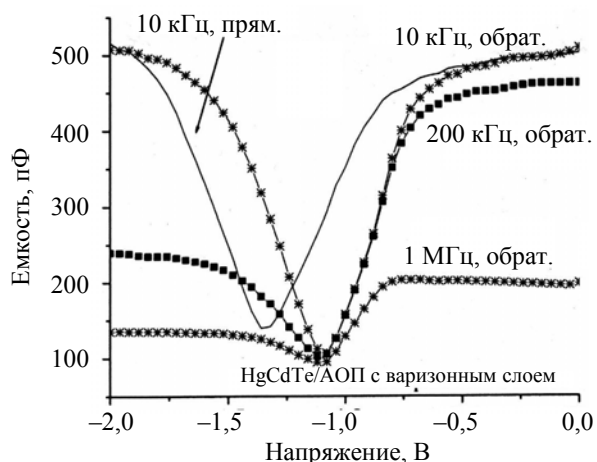
Для исключения дефектообразующей операции распайки структур была создана измерительная

камера, позволяющая измерять при температурах 80—300 К характеристики структур при использовании управляемого микрометрическими винтами тонкого (диаметром 60 мкм) вольфрамового зонда. При исследовании влияния засветки на электрофизические характеристики, а также при измерении фотоэлектрических характеристик проводилось освещение МДП-структур через подложку (с обратной стороны) или с фронтальной стороны излучением с длиной волны 0,94 мкм.

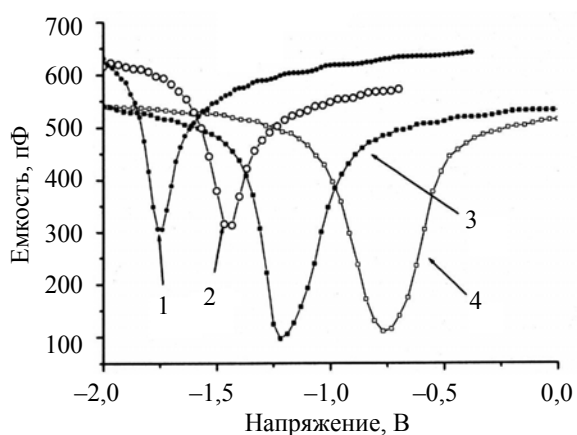
Измерялись зависимости фотоЭДС от напряжения, частоты модуляции светового потока и температуры, а также вольт-фарадные и вольт-сименсные характеристики МДП-структур на разных частотах. За прямое направление развертки принималось изменение напряжения от отрицательных значений к положительным, а за обратное направление — от положительных к отрицательным. Скорость изменения напряжения смещения при измерениях не превышала 0,015 В/с.

### Особенности электрофизических характеристик, обусловленные сопротивлением объема эпитаксиальной пленки

На рис. 2, а приведены типичные зависимости емкости от напряжения смещения для МДП-структуры HgCdTe/АОП. Как следует из рис. 2, а, вольт-фарадные характеристики (ВФХ) исследованных МДП-структур имеют низкочастотный или промежуточный вид при частотах до 2 МГц, для ряда структур наблюдался спад емкости в сильной инверсии и в сильном обогащении. Для всех исследованных образцов имело место уменьшение емкости в сильной инверсии при увеличении частоты тестового сигнала. Дифференциальное сопротивление структуры уменьшалось при увеличении частоты, причем на полевых зависимостях сопротивления наблюдался максимум в области обеднения — слабой инверсии. Различные виды зависимостей при прямой и обратной развертках напряжения связано с подвижным зарядом в диэлектрике. Для МДП-структур HgCdTe/ $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$  емкость диэлектрика составляла менее 100 пФ, отмечено уменьшение емкости в обогащении на высоких частотах, дифференциальное сопротивление в несколько раз превышает значения сопротивления для МДП-структур HgCdTe/АОП, увеличение сопротивления в максимуме зависимости сопротивления от напряжения менее значительно.



a



б

Рис. 2. ВФХ МДП-структуры HgCdTe/АОП, измеренные на разных частотах (а), и ВФХ МДП-структур n-HgCdTe/АОП серий 1, 2 — с варизонным слоем и без варизонного слоя, измеренные на частоте 10 кГц (б): 1 — без слоя, КОИ-источник; 2 — без слоя, аммиачный источник; 3 — слой, КОИ-источник; 4 — слой, аммиачный источник

Объяснить вид экспериментальных характеристик можно с помощью метода эквивалентных схем [4]. Частотные зависимости измеряемых в обогащении емкости и проводимости МДП-структур на основе эпитаксиального слоя HgCdTe определяются влиянием сопротивления объема эпитаксиальной пленки.

Отметим, что при нулевом значении сопротивления объема измеряемая емкость и проводимость не зависят от частоты тестового сигнала. Влияние сопротивления объема на измеряемую емкость можно исключить путем соответствующей обработки экспериментальных данных. Для этого необходимо по экспериментальным данным найти значения параметров эквивалентной схемы и рассчитать ВФХ при нулевом значении сопротивления объема. Влияние сопротивления объема приводит к значительному изменению измеряемой

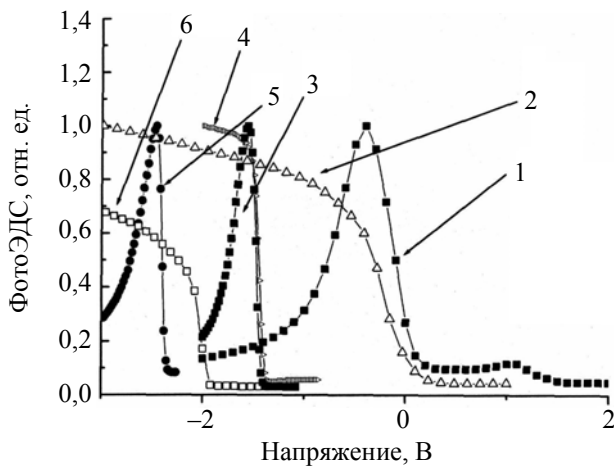
емкости в режимах обогащения и сильной инверсии и незначительно влияет при напряжениях, соответствующих минимуму ВФХ. По данным измерения емкости и проводимости МДП-структур в режиме обогащения, легко найти значения сопротивления объема и емкости диэлектрика.

### Особенности электрофизических и фотоэлектрических характеристик, обусловленные наличием приповерхностных варизонных слоев

Рассмотрим влияние наличия варизонных слоев на вольт-фарадные характеристики МДП-структур. На рис. 2, б приведены ВФХ МДП-структур на основе n-HgCdTe/АОП серий 1, 2 с варизонным слоем и без варизонного слоя, измеренные на частоте 10 кГц. Из рисунка следует также, что наличие варизонного слоя приводит к увеличению глубины и ширины провала на ВФХ. Это связано с изменением условий генерации неосновных носителей в приповерхностном слое полупроводника при уменьшении собственной концентрации в широкозонном варизонном слое.

Другой особенностью ВФХ МДП-структур на основе варизонного HgCdTe является отсутствие частотной зависимости емкости в минимуме ВФХ, для МДП-структур на основе HgCdTe без приповерхностных варизонных слоев емкость в минимуме ВФХ уменьшается при увеличении частоты тестового сигнала. Аналогичные изменения ВФХ наблюдались и для варизонных структур с двухслойным диэлектриком. Наличие варизонного слоя приводит к увеличению гистерезиса ВФХ для МДП-структур с двухслойным диэлектриком (также для АОП), что может быть связано с захватом электронов на ловушки в пограничном слое, который при наличии варизонного слоя обогащен оксидами кадмия. Для всех МДП-структур HgCdTe/АОП типичен положительный фиксированный заряд, который может быть связан с вакансиями кислорода в АОП. Для МДП-структур с двухслойным диэлектриком возможны различные знаки и величины фиксированного заряда, что предоставляет возможности управления напряжением плоских зон.

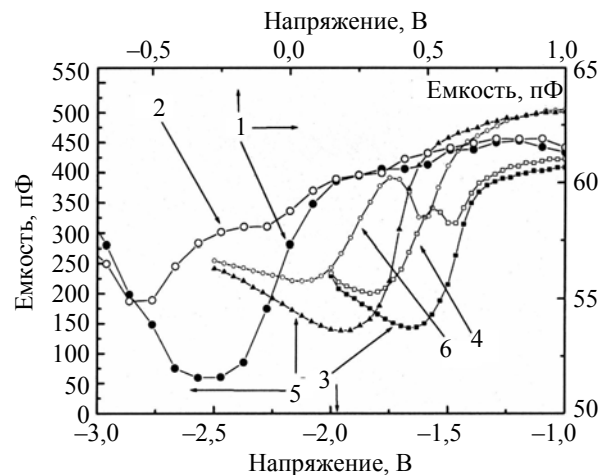
На рис. 3 приведены зависимости фотоЭДС от напряжения смещения, измеренные при засветке с обратной стороны на частоте 2 кГц при температуре 80 К, для образцов МДП-структур, изготовленных из одной пластины МЛЭ n-HgCdTe. Исследовались МДП-структуры на основе HgCdTe с варизонными слоями, а также МДП-структуры на основе HgCdTe без варизонного слоя.



**Рис. 3. Зависимости фотоЭДС от напряжения для МДП-структур на основе HgCdTe ( $x = 0,22-0,23$ ) с варизонным слоем и без варизонного слоя для структур № 3:** кривая 1 — для МДП-структуры HgCdTe/SiO<sub>2</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> без варизонного слоя; 2 — HgCdTe/SiO<sub>2</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> с варизонным слоем; 3 — для МДП-структуры HgCdTe/AOP с варизонным слоем; 4 — HgCdTe/AOP без варизонного слоя; 5 — HgCdTe/AOP с варизонным слоем; 6 — HgCdTe/AOP без варизонного слоя. Кривые 3 и 4 измерены для МДП-структур с анодным оксидом, выращенным при использовании аммиачного источника, а кривые 5 и 6 — при использовании КОН-источника

Для сравнения влияния свойств диэлектрика и границы раздела на фотоэлектрические характеристики исследовались МДП-структуры с различными диэлектрическими покрытиями (SiO<sub>2</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, а также анодно-оксидные пленки, выращенные при использовании аммиачного или КОН-источника). Как видно из рис. 3, в случае наличия варизонного слоя на поверхности типичен классический вид зависимости фотоЭДС от напряжения: рост в обеднении и слабой инверсии и насыщение в сильной инверсии. В случае отсутствия варизонных слоев типичен спад фотоЭДС в сильной инверсии, т. е. на зависимости фотоЭДС от напряжения наблюдается максимум при напряжениях, соответствующих обеднению — слабой инверсии. Спад фотоЭДС в сильной инверсии не связан с типом использованного диэлектрического покрытия, а определяется свойствами полупроводника.

Интересным фактом оказалось то, что для МДП-структур с наибольшим спадом фотоЭДС в режиме сильной инверсии при освещении на вольт-фарадных и вольт-сименсных характеристиках появлялись особенности, связанные с проявлением емкости, обусловленной глубоким уровнем (рис. 4). Без освещения данные особенности вольт-фарадных характеристик отсутствовали для некоторых образцов, а для некоторых наблюдалась "полочка" на ВФХ при напряжениях, соответствующих обеднению. Для образцов, изготовленных из других пластин, данной особенности вольт-фарадных характеристик при освещении не наблюдалось.



**Рис. 4. Зависимости емкости от напряжения для МДП-структур HgCdTe/AOP и HgCdTe/SiO<sub>2</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> без варизонного слоя без освещения и при освещении (№ 3):** кривая 1 — ВФХ для МДП-структуры HgCdTe/SiO<sub>2</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> без варизонного слоя в темноте; 2 — HgCdTe/SiO<sub>2</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> при освещении; 3 — HgCdTe/AOP в темноте; 4 — HgCdTe/AOP при освещении; 5 — HgCdTe/AOP в темноте; 6 — HgCdTe/AOP при освещении

### Влияние концентрации основных носителей, а также наличия варизонных слоев на объемное время жизни неосновных носителей заряда для МДП-структур на основе $n$ -HgCdTe

На рис. 5, а показаны зависимости времени жизни неосновных носителей заряда от концентрации электронов для  $n$ -HgCdTe ( $x = 0,22$  и  $0,29$ ), измеренные бесконтактным СВЧ-методом (полые кружки —  $x = 0,29$ , черные квадраты  $x = 0,22$ ), а также по частотному спаду фотоЭДС МДП-структур на основе  $n$ -HgCdTe ( $x = 0,22$ ) с варизонным слоем (полые треугольники) и без варизонного слоя (полые ромбы). Расчетная зависимость при Оже-рекомбинации обозначена сплошной линией.

Из рис. 5, а видно, что для  $n$ -HgCdTe с  $x = 0,22$  при концентрациях основных носителей больше  $10^{15}$  см<sup>-3</sup> наблюдается уменьшение времени жизни, обратно пропорциональное квадрату концентрации основных носителей, а при концентрации электронов меньше, чем  $10^{15}$  см<sup>-3</sup> — явная зависимость времени жизни от концентрации отсутствует. Прямой представлена зависимость от концентрации времени жизни (для состава  $x = 0,22$ ), при его ограничении межзонной Оже-рекомбинацией, рассчитанная при использовании формул из работ [5—7] при величине интеграла перекрытия блоховских функций, равной 0,11. Данные СВЧ-метода измерений хорошо согласуются с данными, полученными при измерениях частотных зависимостей фотоЭДС для МДП-структур с варизон-

ными слоями. Для МДП-структур с  $x = 0,29$  при концентрациях, меньших, чем  $10^{15} \text{ см}^{-3}$ , зависимость времени жизни от концентрации отсутствует. Для МДП-структур без варизонных слоев времена жизни значительно меньше, чем для структур с варизонными слоями (3—5 мкс), и не превышают 1 мкс.

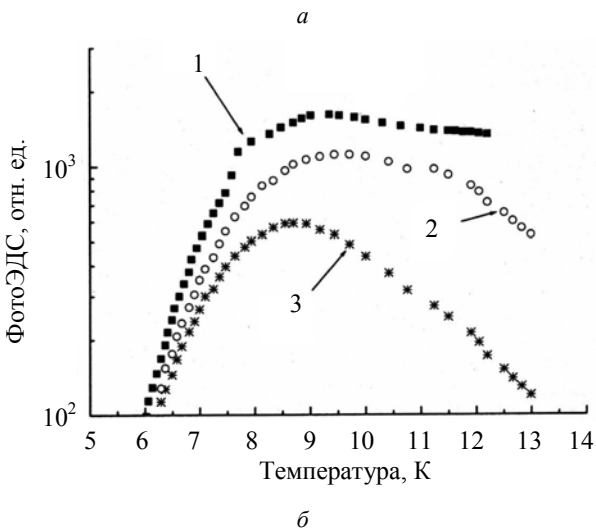
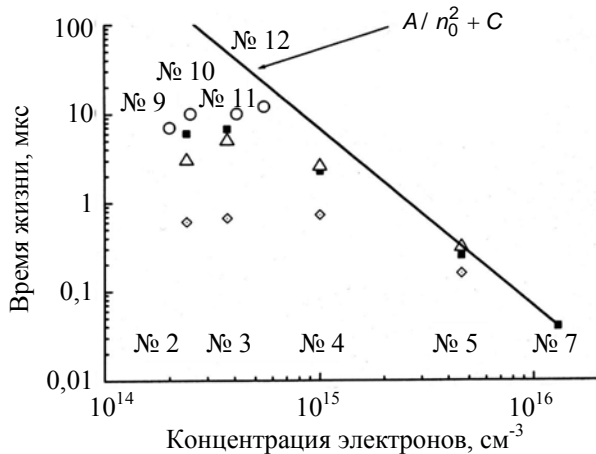


Рис. 5. Зависимости времени жизни неосновных носителей заряда от концентрации электронов для  $n\text{-HgCdTe}$  ( $x = 0,22$  и  $0,29$ ) (а); фотоЭДС от температуры для МДП-структур на основе  $n\text{-HgCdTe}$  № 6 без варизонного слоя (1—0 В) и с варизонным слоем (2 — максимум фотоЭДС,  $V = 2$  В; 3 — сильная инверсия,  $V = -4$  В) (б)

На рис. 5, б приведены температурные зависимости фотоЭДС для МДП-структуры на основе  $n\text{-HgCdTe}$  ( $x = 0,22$ ) с варизонным слоем (для этой структуры нулевое напряжение соответствует сильной инверсии) и без варизонного слоя при различных напряжениях: соответствующих максимуму полевой зависимости фотоЭДС ( $V = -2$  В) и при сильной инверсии ( $V = -4$  В).

Из приведенных графиков видно, что наличие варизонного слоя не приводит к различиям высокотемпературного спада фотоЭДС, а особенности проявляются лишь при низких температурах. Для

образцов без варизонного слоя фотоЭДС в сильной инверсии заметно растет при увеличении температуры от 77 до 100 К, этот подъем наблюдался также при измерении температурной зависимости фотоЭДС для напряжений, соответствующих максимуму фотоЭДС (хотя в этом случае относительные изменения фотоЭДС не так велики). Для образцов на основе  $n\text{-HgCdTe}$  ( $x = 0,29$ , варизонный слой) типичен рост фотоЭДС при увеличении температуры от 77 до 100 К, участок насыщения в диапазоне температур 100—180 К, а затем спад фотоЭДС при температурах, превышающих 180 К. Особенность температурных зависимостей фотоЭДС МДП-структур на основе  $p\text{-HgCdTe}$  — отсутствие роста фотоЭДС при увеличении температуры от 77 до 100 К, для таких структур типичен спад фотоЭДС начиная от 77 К, или участок насыщения с последующим высокотемпературным спадом.

### Выводы

Выявлены особенности ВФХ, связанные с большими значениями сопротивления объема эпитаксиальной пленки, а также с наличием приповерхностных варизонных слоев.

Показано, что при 77 К зависимости фотоЭДС от напряжения МДП-структур на основе  $n\text{-HgCdTe}$  ( $x = 0,21—0,23$ ) с приповерхностными варизонными широкозонными слоями имеют классический вид, а для МДП-структур на основе  $n\text{-HgCdTe}$  ( $x = 0,22$ ) без варизонных слоев — спад фотоЭДС в области сильной инверсии, обусловленный уменьшением дифференциального сопротивления области пространственного заряда за счет туннельной генерации через глубокие уровни. Отмечено проявление глубоких уровней на вольт-фарадных и вольт-сименсных характеристиках при освещении исследуемых МДП-структур. По данным фотоэлектрических и электрофизических измерений, энергия глубокого уровня составляет 0,04—0,05 эВ от потолка валентной зоны.

Показано, что время жизни неосновных носителей заряда в МДП-структурах на основе  $n\text{-HgCdTe}$  при температурах, близких к 77 К, ограничено Оже-рекомбинацией при концентрациях основных носителей более  $10^{15} \text{ см}^{-3}$ . Из МДП-измерений подтверждено, что наличие варизонных слоев приводит к увеличению времени жизни неосновных носителей заряда в квазинейтральном объеме МДП-структур за счет уменьшения влияния поверхностной рекомбинации.

Анализ температурных зависимостей фотоЭДС МДП-структур на основе  $n\text{-HgCdTe}$  ( $x = 0,22$ ) с варизонным слоем и без него показал, что наличие варизонного слоя приводит к различиям данных

зависимостей при низких температурах из-за исключения в случае наличия варизонного слоя туннельной генерации через глубокие уровни. При увеличении температуры спад fotocувствительности связан с процессами диффузии неосновных носителей заряда из объема эпитаксиальной пленки и не зависит от наличия варизонных слоев.

#### Литература

1. Рогальский А. Инфракрасные детекторы: Пер. с англ./ Под ред. А. В. Войцеховского. — Новосибирск: Наука, 2003. — 636 с.

2. Овсяк В. Н., Курьшев Г. Л., Сидоров Ю. Г. и др. Матричные фотоприемники инфракрасного диапазона. — Новосибирск: Наука, 2001. — 376 с.

3. Войцеховский А. В., Давыдов В. Н. Фотоэлектрические МДП-структуры из узкозонных полупроводников. — Томск: Радио и связь, 1990. — 327 с.

4. Войцеховский А. В., Несмелов С. Н., Дзядуч С. М. // Известия вузов. Сер. Физика. 2005. № 6. С. 31—37.

5. Lopes V. C., Syllaios D., Chen M. C. // Semicond. Sci. Technol. 1993. V. 8. P. 824—841.

6. Войцеховский А. В. // Изв. вузов. Сер. Физика. 1994. № 2. С. 99—104.

7. Барышев Н. С., Гельмонт Б. Л., Ибрагимова М. И. // ФТП. 1990. Т. 24. № 2. С. 209—224.

Статья поступила в редакцию 11 октября 2006 г.

## The electro-physical and photoelectrical properties of MIS-structures in base of graded-band MBE MCT

A. V. Voitsekhovskiy, S. N. Nesmelov, S. M. Dzyadukh  
Siberian Physical-Technical Institute, Tomsk, Russia

V. S. Varavin, S. A. Dvoretzky, N. N. Mikhailov, Yu. G. Sidorov, V. V. Vasiliev,  
T. I. Zakharyash, Yu. P. Mashukov  
Institute of Semiconductor Physics, Novosibirsk, Russia

*The influence of bulk resistance and near-layer graded-band layers on electrophysical and photoelectrical properties of MIS-structures in base of hetero-epitaxial MCT created by molecular-beam epitaxy was experimental investigated. It is shown that differential resistance of space-charge region in strong inversion for structure in base of MCT with  $x = 0.22$  without graded-band layers is limited of tunnel recombination via deep levels.*

УДК 621.383

## Неохлаждаемый ФЭМ-детектор на основе CdHgTe для приема CO<sub>2</sub>-лазерного излучения

А. А. Алиев, Т. И. Ибрагимов, Н. Д. Исмаилов, И. А. Насибов, Э. К. Гусейнов  
Институт физики НАН Азербайджана, Баку, Азербайджан

*Рассмотрены состояние и перспективы развития неохлаждаемых фотоэлектромагнитных приемников излучения на основе КРТ-соединений.*

Неохлаждаемые фотоэлектромагнитные приемники излучения (ФЭМ-детекторы) на основе твердых растворов теллурида кадмия ртути составов  $x < 0,2$  находят применение в оптоэлектронных системах с использованием излучения CO<sub>2</sub>-лазера с длиной волны 10,6 мкм [1]. К преимуществам таких детекторов можно отнести отсутствие внешнего электрического питания, что снижает уровень шумов и значительно уменьшает тепловую нагрузку на фотоприемник, а также высокое

быстродействие, что позволяет использовать их в гетеродинных системах регистрации.

В работе [2] нами был проведен теоретический расчет и представлены результаты разработки и исследования неохлаждаемого ФЭМ-приемника на основе Cd<sub>x</sub>Hg<sub>1-x</sub>Te состава  $x = 0,2$  для области спектра 6—7 мкм. В основу работы были заложены исследования параметров ФЭМ-детектора в зависимости от уровня акцепторного легирования полупроводника.