

Полученные результаты моделирования свидетельствуют о выполнении технических требований к мультиплексорам, что подтверждает

правильность предложенных схемотехнических решений.

Статья поступила в редакцию 23 ноября 2004 г.

## Silicon CMOS 1×128 multiplexers for multi-element photorezistors based on PbS and PbSe

I. D. Burlakov, A. V. Zaslavsky, P. A. Kuznetsov, E. A. Klimanov,  
S. S. Khromov, Shchukin S. V.  
ORION Research-and-Production Association, Moscow, Russia

*Results of developments of two types of cooled silicon CMOS 1×128 multiplexers applied for signal amplification and commutation from multi-element photorezistors based on PbS and PbSe are reported. Circuit engineering of multiplexers were discussed in this paper. Results of PC modeling are reported.*

УДК 621.315.592

## Формирование гетероструктур на основе соединений кадмий—ртуть—теллур в системе полупроводник—электролит

В. Б. Божевольнов, А. М. Яфясов, П. П. Коноров  
НИИ Физики им. В. А. Фока СПбГУ. С.-Петербург, Петродворец, Россия

*Показано, что путем электрохимической модификации состава твердого раствора кадмий—ртуть—теллур могут быть сформированы гетероструктуры, обладающие совершенной границей раздела с малым числом локализованных электронных состояний. Такие структуры могут быть использованы в качестве фотоприемников и фотопреобразователей, обладающих высокой чувствительностью в ИК-области спектра.*

Гетероструктуры на основе непрерывных твердых растворов изовалентного замещения кадмий—ртуть—теллур (КРТ) представляют большой научный и практический интерес в связи с возможностями их применения в качестве фотоэлектрических приемников и фотопреобразователей для ИК-области спектра. Такие структуры образуются путем формирования контакта двух материалов КРТ различного состава. Распространенные методы формирования гетероструктур, такие как молекулярно-лучевая эпитаксия и молекулярное наслаждение, оказываются малопригодными для формирования гетероструктур на основе КРТ из-за неустойчивости их состава и отсутствия контроля за их изменениями в процессе получения гетероструктур. Задача данной работы — изучение возможностей формирования гетероструктур на основе КРТ-материалов путем электрохимической модификации их состава при поляризации образцов в специально подобранным электролите с одновременным

контролем характеристик формируемого состава с помощью метода эффекта поля в электроли- тах [1].

Перспективность использования КРТ-мате- риалов для создания гетероструктур определяется сильной зависимостью их электронных ха- рактеристик от состава, что позволяет формировать гетероструктуры путем создания контакта мате- риалов КРТ с разным составом. При этом малое изменение постоянной решетки  $a_0$  при измене- нии состава КРТ и, следовательно, слабое нару- шение периодичности атомной структуры в об- ласти гетероперехода обеспечивают низкую плотность локализованных электронных состоя- ний и как следствие низкую скорость рекомби- нации и захвата неравновесных носителей заряда, что должно обеспечивать высокую чувствитель- ность структур к их фотогенерации. Сказанное выше иллюстрируется таблицей, в которой приведены основные параметры материалов  $Cd_xHg_{1-x}Te$  трех различных составов.

Электрофизические параметры соединений  $Cd_xHg_{(1-x)}Te$ 

$Cd_xHg_{(1-x)}Te$	$a_0$ , нм	$m_e/m_0$	$E_g$ , эВ	$m_h/m_0$	$\epsilon_{sc}$	$\mu$ , см <sup>2</sup> /Вс	$\chi$ , эВ	$n_i$ , см <sup>-3</sup>	$E_C - E_F$ , мэВ	$\lambda_e$ , нм
$x = 0,15$	0,64633	0,007	0,080	0,50	18	32000	5,40	$2,3 \cdot 10^{16}$	-35	59
$x = 0,20$	0,64641	0,020	0,150	0,45	17	20000	5,33	$7,1 \cdot 10^{15}$	12	55
$x = 0,32$	0,64663	0,030	0,320	0,45	16	7000	5,18	$2,5 \cdot 10^{14}$	105	45

Обозначения:  $m_e$  и  $m_h$  — эффективная масса электрона и дырки, соответственно;  $m_0$  — масса свободного электрона,  $\epsilon_{sc}$  — диэлектрическая проницаемость полупроводника;  $\chi$  — электронное сродство;  $E_g$  — ширина запрещенной зоны;  $n_i$  — собственная концентрация носителей тока [2, 3].

В настоящей работе в качестве исходного материала использовались образцы КРТ с составом, соответствующим  $x = 0,32$ . Предварительно поверхность образцов подвергалась химико-динамическому травлению в 8%-ном растворе брома в метаноле [1].

Изменение состава материала КРТ и одновременное (*in situ*) измерение электрофизическими характеристик получаемых структур осуществлялись в электрохимической ячейке, содержащей водный электролит. Для изменения состава материала в электролит вводился комплексообразователь, подобранный таким образом, чтобы возникающие в процессе катодной поляризации комплексы кадмия были устойчивы в широком интервале электродных потенциалов, задаваемых внешней поляризацией образца, и могли беспрепятственно уходить в раствор. Катодная поляризация одновременно препятствовала уходу комплексов Hg в раствор, а высокая подвижность атомов ртути в материале КРТ приводила к замене атомов Cd на атомы Hg в решетке КРТ. При этом в некоторой области электродных потенциалов, определяемой условиями катодной поляризации, происходило обеднение поверхности КРТ кадмием за счет преимущественного ухода комплексов кадмия в раствор и образование поверхностного слоя, обогащенного ртутью [4, 5]. Возникающий слой характеризовался составом с  $x = 0,20$  и представлял собой материал с меньшей шириной запрещенной зоны по сравнению с исходным материалом (см. таблицу). В результате происходило формирование двухслойной гетероструктуры, представляющей собой слой узкозонного полупроводника на поверхности образца КРТ исходного состава.

Для определения характеристик и осуществления контроля за электрофизическими свойствами структур в процессе их формирования использовали метод эффекта поля в электролитах (метод ЭПЭ) [1], основанный на изменении плотности заряда  $Q$  ионов, electrostatically adsorbed on the surface of the semiconductor during its polarization in the electrolyte. Основным проявлением этого эффекта является изменение электродного  $V$  и, соответственно, поверхностного  $V_s$  потенциалов полупроводникового электрода. Происходящие при этом изменения в об-

ласти пространственного заряда (ОПЗ) полупроводника отражаются на вольт-амперных (ВАХ) и вольт-фарадовых (ВФХ) характеристиках границы полупроводник—электролит. Последняя представляет собой зависимость дифференциальной емкости полупроводникового электрода от его электродного потенциала и позволяет определить состав слоя и его толщину непосредственно в процессе формирования гетероструктуры, т. е. *in situ* [1].

В данной работе ВФХ измерялись по четырехэлектродной схеме при потенциостатическом задании электродного потенциала [1]. Измерения проводились на импульсном сигнале длительностью ~1 мкс с усреднением значения не менее чем по 32 импульсам при каждом задаваемом электродном потенциале. Дополнительный контроль параметров узкозонного полупроводника на поверхности исходного материала КРТ осуществлялся с помощью ИК-поглощения, которое измерялось на "сухой" структуре при комнатной температуре в атмосфере сухого азота. При этом была использована оптическая схема с модуляцией монохроматического луча на частоте 10–15 Гц. Регистрация сигнала осуществлялась дифференциальным болометром с помощью моста переменного тока. Время накопления сигнала составляло до 32 с для каждой длины волны ИК-излучения.

На рис. 1 представлены ВФХ, полученные в модифицирующем электролите при изменении электродного потенциала в потенциостатическом режиме и отражающие процесс формирования гетероструктуры, обусловленный изменением состава КРТ в приповерхностной области. Здесь приведены расчетные зависимости емкости ОПЗ от поверхностного потенциала для исходного материала КРТ состава  $x = 0,32$ . При малой катодной поляризации исходного образца (см. область "A" на рис. 1) происходит растворение его поверхности с сохранением исходного соотношения между всеми компонентами тройного соединения. Об этом свидетельствует обратимость ВФХ и их соответствие изменениям емкости ОПЗ в материале КРТ исходного состава ( $x = 0,32$ ). Область "B" характеризуется резким необратимым уменьшением емкости, связанным с необратимым изменением состава материала КРТ, обусловленным продолжающимся обогащением поверхности ртутью.

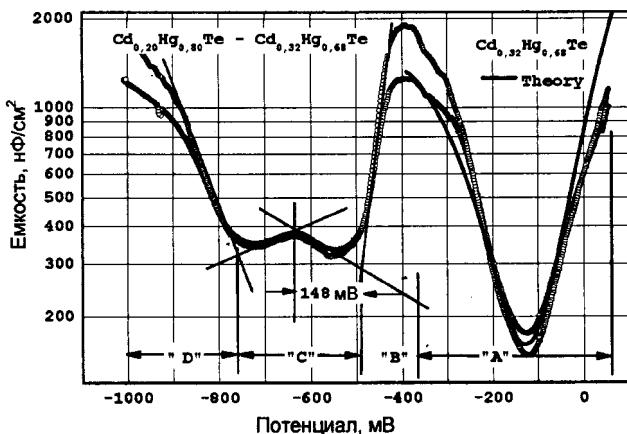


Рис. 1. Вольт-фарадные характеристики  $C_{inf}(V)$  системы КРТ-электролит для двух образцов.

Теоретическая зависимость емкости ОПЗ КРТ ( $x = 0,32$ ) от поверхностного потенциала смещена по потенциальному совмещению с экспериментальными ВФХ от электродного потенциала

В диапазоне потенциалов от  $-600$  до  $-750$  мВ вновь наблюдается область обратимого изменения ВФХ (см. область "С" на рис. 1).

При электродных потенциалах, меньших  $-800$  мВ, происходит необратимое разрушение материала электрода (см. область "D" на рис. 1).

Уменьшение емкости при переходе в область "С" и обратимый характер изменения ВФХ в этой области могут быть интерпретированы как возникновение устойчивой структуры, а характер этого изменения является типичным для двухслойной гетероструктуры, содержащей изолирующий слой. Оценка толщины этого слоя, полученная из экспериментальных значений емкости, дает величину 36–41 нм в предположении, что диэлектрическая постоянная слоя ( $\epsilon_{sc}$ ) лежит в характерном для материала КРТ интервале. Отметим, что указанная толщина слоя сопоставима с длиной волны электрона ( $\lambda_e$ ) в КРТ-материале (см. таблицу), что может являться причиной размерного квантования электронного газа в области гетероперехода.

На рис. 2 приведены результаты измерения ИК-поглощения на сформированной структуре. На приведенном спектре (см. рис. 2, а) имеются две особенности при длинах волн 3900 и 7800 нм. Наличие этих особенностей подтверждает образование двухслойной структуры и свидетельствует о том, что эта структура состоит из подложки, имеющей состав  $x = 0,32$ , и полупрозрачного слоя с составом  $x = 0,20$ . Толщина этого слоя, оцененная по поглощению с учетом коэффициента преломления в КРТ ( $n = 3,6$  [2]), составила от 200 до 400 нм. Результат дифференцирования кривой спектра поглощения свидетельствует о

существовании в области полупрозрачного слоя квантово-размерного электронного газа.

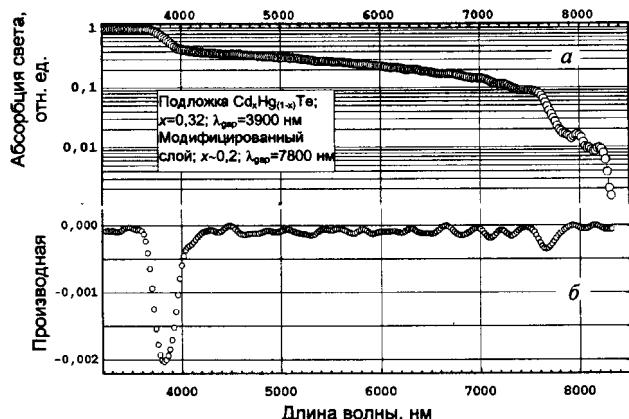
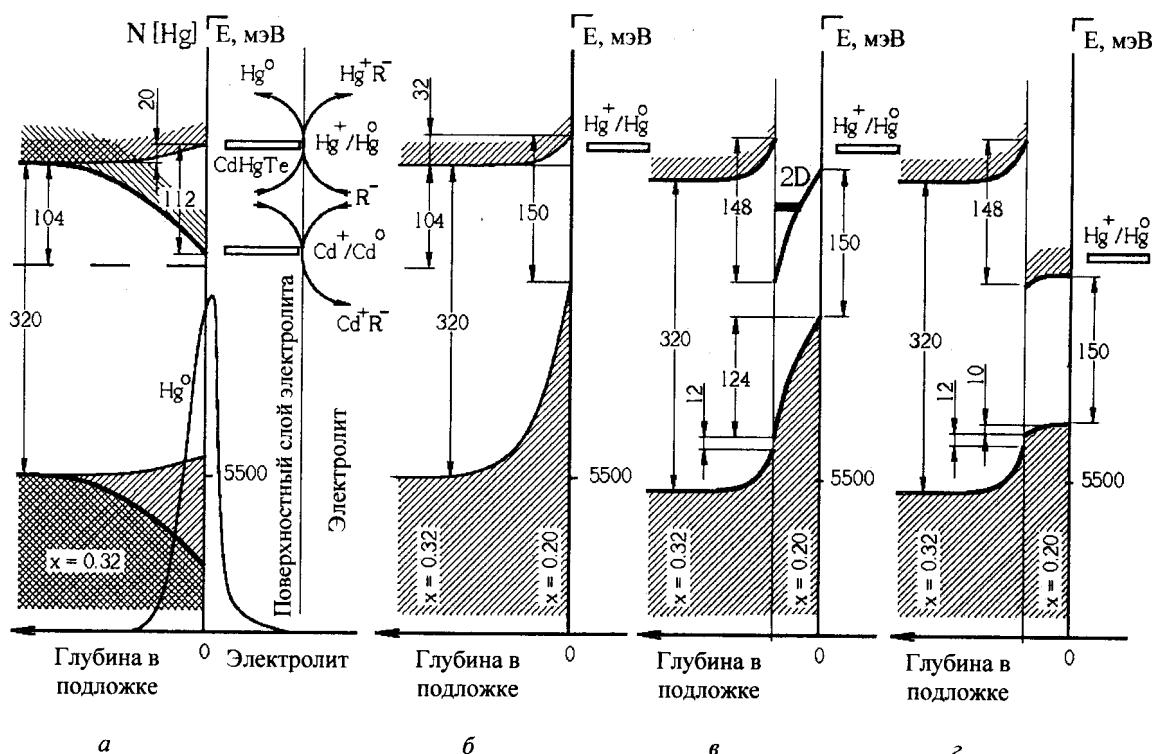


Рис. 2. Спектр ИК-поглощения структуры КРТ-подложка — модифицированный поверхностный слой (а); результат дифференцирования спектра ИК-поглощения — производная спектра ИК-поглощения (б)

Полученные данные указывают на образование гетероперехода, который возникает на границе подложки с поверхностным слоем КРТ, соответствующим составу  $x = 0,20$ . На рис. 3 дано пояснение процесса возникновения гетероструктуры. Поверхностный потенциал подложки задается электрохимической реакцией растворения  $Cd_{0,32}Hg_{0,68}Te$ . Изменение потенциала в процессе поляризации будет ограничено потенциалом разряда комплекса ртути на поверхности электрода с образованием атомарной ртути ( $Hg^0$ ) (см. рис. 3, а), которая легко проникает в приповерхностный объем КРТ, изменяя его состав. Изменение состава КРТ электрода на поверхности приводит к изменению его коррозионного потенциала, что влечет за собой изменение поверхностного потенциала. Таким образом, в системе "электролит —  $Cd_{0,20}Hg_{0,80}Te$  —  $Cd_{0,32}Hg_{0,68}Te$ " фиксированными оказываются потенциалы в объеме электрода  $Cd_{0,32}Hg_{0,68}Te$  и на поверхности  $Cd_{0,20}Hg_{0,80}Te$ . Зонная структура системы "поверхностный слой состава  $Cd_{0,20}Hg_{0,80}Te$  — подложка состава  $Cd_{0,32}Hg_{0,68}Te$ " соответствует либо варизонной (см. рис. 3, б), либо резкой гетероструктуре (см. рис. 3, в, г). Однако варизонный характер структуры противоречит данным ИК-поглощения (см. рис. 2) и образованию изолирующего слоя, который проявляется на ВФХ (см. рис. 1). В пользу модели резкого гетероперехода говорят также уменьшение емкости в области "С" и появление осцилляций вблизи края поглощения пленки (см. рис. 2, б) за счет размерного квантования электронного газа, возникающего в области гетероперехода.



*Рис. 3. Процесс формирования гетероструктуры и ее возможные типы:  
а — обогащение поверхности подложки ртутью; б — варизонный тип;  
в — резкий смещенный гетеропереход; г — несмешенный гетеропереход*

Проявление размерного квантования электронного газа при комнатной температуре свидетельствует о высокой степени совершенства атомной структуры гетероперехода и, соответственно, о малой плотности локализованных электронных состояний, способных являться центрами рекомбинации и захвата неравновесных носителей заряда.

Возвращаясь к рис. 1, отметим, что правая ветвь экстраполированного прямым линиями участка ВФХ в области "С" отражает процесс формирования поверхностного слоя Cd<sub>0,20</sub>Hg<sub>0,80</sub>Te, а левая характеризует изменение полной емкости гетероперехода при его поляризации. Потенциал  $V_1 = -480$  мВ, соответствующий пересечению экстраполированных прямых ВФХ, отличается от потенциала несмешенного перехода  $V_2 = -628$  мВ на величину  $V = |V_1 - V_2| = 148$  мВ, что совпадает с величиной разрыва зон на гетеропереходе (см. рис. 3, в). Это позволяет утверждать, что процесс формирования поверхностного слоя Cd<sub>0,20</sub>Hg<sub>0,80</sub>Te (см. рис. 3, а, б) автоматически прекращается с появлением разрыва зон и образованием квантово-размерного электронного газа, когда толщина слоя достигает величины порядка  $\lambda_e$  (см. рис. 3, в).

Таким образом, методы ИК-поглощения и ВФХ показывают, что при электрохимической модификации поверхности КРТ-материала фор-

мируется гетероструктура, образуемая контактом двух областей КРТ различного состава.

Полученные результаты свидетельствуют о перспективности использования методики электрохимической модификации материала КРТ для формирования на их основе гетероструктур с высокой фоточувствительностью в ИК-области спектра.

*Настоящая работа поддержана программой  
"Университеты России" (У.Р.06.01.021).*

#### Л и т е р а т у р а

1. Коноров П. П., Яфясов А. М. Физика поверхности полупроводниковых электродов. — С.-Петербург: Изд-во СПбГУ, 2003.
2. Semiconductors and Semimetals. Mercury Cadmium Telluride/ Ed. Willardson R. K., Beer A. C. Academ Press, New York, 1982.
3. Dornhaus R., Nimts D. Springer Tracts in Modern Phys. 1983.
4. Sakashita V., Loche B., Streblov H. Y.// J. Electrochem. Soc. 1982. V. 140. P. 75.
5. Kumaresan R., Moothy Babu S., Ramasamy P.// J. of Cryst. Growth. 1999. V. 198/199. P. 1165.

*Статья поступила в редакцию 23 ноября 2004 г.*

# Forming of heterostructures on the base of cadmium—mercury—tellurium combinations in the semiconductor—electrolyte system

*V. B. Bogevolnov, A. M. Yafyasov, P. P. Konorov*  
 Physical Institute named by V. A. Fock of Saint-Petersburg University,  
 Saint-Petersburg, Petrodvoretz, Russia

*It is shown that heterostructures with perfect interface and small quantity of localized electronic states may be formed by way of the electrochemical modification of the solid solution cadmium—mercury—tellurium composition. Those structures may be used as photoelements and phototransformers with high photosensitivity in IR-spectral region.*

УДК 621.382.002

## Высокая наукоемкая серийная технология финишной очистки экранно-корпусного узла электронно-оптических преобразователей с прямым переносом изображения

*B. I. Loktionov, R. I. Bagduiev*  
 Открытое акционерное общество "Катод", г. Новосибирск, Россия

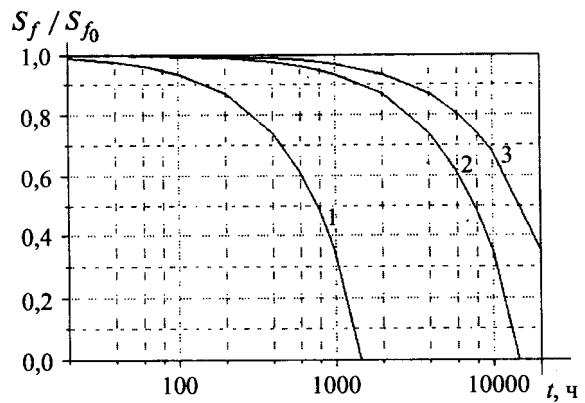
*Приведены зависимости срока службы электронно-оптических преобразователей (ЭОП) 3-го поколения без ионно-барьерной пленки (ИБП) от уровня остаточного электронно-стимулированного газовыделения (ОЭСГВ) из экранно-корпусного узла (ЭКУ). Проведен расчет уровня ОЭСГВ, обеспечивающего работоспособность ЭОП 3-го поколения без ИБП. Изложена технология высокой очистки ЭКУ ЭОП 3-го поколения с контролем уровня ОЭСГВ.*

### Необходимость высокоэффективного обезгаживания ЭКУ ЭОП

В ЭОП с прямым переносом изображения срок службы и шумы логически взаимосвязаны [1, 2]. В надежно герметизированных в условиях сверхвысокого вакуума ЭОПах фотокатоды в рабочем режиме подвергаются воздействию остаточных электронно-стимулированных газов из ЭКУ [2, 3]. Бомбардировка фотокатода положительными ионами вызывает ионно-электронную эмиссию, представляющую шумы [3, 4], а адсорбция выделяющихся из ЭКУ газов загрязняет поверхности Cs:O на GaAs фотокатоде [2]. Остаточные электронно-стимулированные газы из ЭКУ представляют в основном кислород, воду, водород, окись углерода и двуокись углерода [2], из которых активные газы обладают достаточно высоким коэффициентом прилипания. Активные газы интенсивно адсорбируются на поверхность фотокатода и по мере роста их количества оказывают воздействие на Cs:O, что приводит к падению чувствительности фотокатода. Авторами на базе теоретических и экспериментальных исследований получено теоретическое выражение, позволяющее определить уменьшение от времени экспозиции чувствительности фотокатода в зависимости от остаточного электронно-стимулированного газовыделения. При этом число

монослоев Cs:O принято равным  $\Pi_c \approx 1$ , а коэффициент прилипания молекул активных газов  $\gamma_a \approx 0,8$ .

На рис. 1 приведены полученные авторами расчетные зависимости падения чувствительности GaAs фотокатода в ЭОП без ИБП в рабочем режиме при трех значениях ОЭСГВ из ЭКУ.



*Рис. 1. Расчетные кривые падения чувствительности фотокатода в ЭОП с прямым переносом изображения в рабочем режиме  $i_{2e}=4 \cdot 10^{-6}$  при коэффициенте прилипания  $\gamma_a = 0,9$ :*  
 1 — в ЭОП с GaAs фотокатодом при электронно-стимулированном газовыделении ЭКУ  $n_i/n_e=10^{-3}$  ион/электрон;  
 2 — в ЭОП с GaAs фотокатодом при электронно-стимулированном газовыделении ЭКУ  $n_i/n_e=10^{-4}$  ион/электрон;  
 3 — в ЭОП с GaAs фотокатодом при электронно-стимулированном газовыделении ЭКУ  $n_i/n_e=5 \cdot 10^{-5}$  ион/электрон