

УДК 621.315

Фотоэлектрические характеристики МДП-структур на основе материала кадмий—ртуть—теллур, полученного методом молекулярно-лучевой эпитаксии

А. В. Войцеховский, С. Н. Несмелов, С. М. Дзядх, В. В. Васильев, В. С. Варавин,
С. А. Дворецкий, Н. Н. Михайлов, Ю. Г. Сидоров, Ю. П. Машуков, М. В. Якушев

Методом малосигнальной фотоЭДС проведены исследования полевой и частотной зависимостей фотосигнала для МДП-структур на основе варизонного материала кадмий—ртуть—теллур (КРТ), выращенного методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ). Определено время жизни неосновных носителей заряда в области пространственного заряда КРТ для различных составов рабочего слоя и различных диэлектрических покрытий. Для МДП-структур на основе HgCdTe/CdTe , $\text{HgCdTe/CdTe/SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ и HgCdTe/CdTe/ZnTe n - и p -типов проводимости определен вид зависимости малосигнальной фотоЭДС от напряжения при использовании в качестве функционального диэлектрика слоев CdTe , сформированных в процессе выращивания гетероэпитаксиальных структур.

PACS: 72.80. Sk; 73.20.-r; 73.21.Ac; 73.40.Qv

Ключевые слова: фотосигнал, носители заряда, пространственный заряд, покрытия.

Войцеховский Александр Васильевич, зав. отделением.
Несмелов Сергей Николаевич, старший научный сотрудник.
Дзядх Станислав Михайлович, младший научный сотрудник.
 Обособленное структурное подразделение "Сибирский физико-технический институт при Томском госуниверситете".
 Россия, 634050, Томск, пл. Новособорная, 1.
 E-mail: vav@elefot.tsu.ru
Васильев Владимир Васильевич, зав. лабораторией.
Варавин Василий Семенович, старший научный сотрудник.
Дворецкий Сергей Алексеевич, ведущий научный сотрудник.
Михайлов Николай Николаевич, старший научный сотрудник.
Сидоров Юрий Георгиевич, зав. отделом.
Машуков Юрий Петрович, ведущий инженер.
Якушев Максим Витальевич, старший научный сотрудник.
 Институт физики полупроводников СО РАН.
 Россия, 630090, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, 13.
 E-mail: ifr@isp.nsc.ru

Статья поступила в редакцию 18 декабря 2009 г.

Введение

Узкозонный твердый раствор $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ (КРТ) — основной материал для создания высокочувствительных инфракрасных детекторов, действующих в спектральных диапазонах окон прозрачности атмосферы 3—5 и 8—14 мкм [1—3]. Использование метода МЛЭ предоставляет возможности для 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 фотоэлектрических характеристик для МДП-структур HgCdTe/CdTe, HgCdTe/CdTe/SiO₂/Si₃N₄ и HgCdTe/CdTe/ZnTe *n*- и *p*-типов проводимости с защитными диэлектрическими покрытиями на базе слоев CdTe, выращенных в едином технологическом процессе при создании гетероэпитаксиальных структур.

Образцы и методики эксперимента

Исследуемые МДП-структуры изготавливались на основе HgCdTe дырочного и электронного 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 0,22—0,23; 0,32—0,34) создавались варизонные слои с повышенным компонентным составом CdTe (толщина приповерхностного варизонного слоя 0,3—0,7 мкм, причем состав у поверхности достигал 0,43—0,48). Структуры имели состав рабочего слоя $x = (0,22—0,23)$ и $x = (0,32—0,34)$. Перед нанесением диэлектрических покрытий методом Холла определяли электрические параметры материала, а время жизни неосновных носителей τ — методом релаксации фотосигнала с помощью бесконтактной СВЧ-методики.

Для исследованных образцов *n*-HgCdTe подвижность основных носителей изменялась от 5600 до 55 000 см²·В⁻¹·с⁻¹, время жизни изменялось в интервале 2,5—25 мкс, концентрация основных носителей составляла 8,7·10¹³—2,7·10¹⁴ см⁻³. Для образцов *p*-типа ($x = 0,22$) подвижность основных носителей изменялась от 470 до 560 см²·В⁻¹·с⁻¹, время жизни не превышало 75 нс, концентрация основных носителей составляла 2,6·10¹⁵÷1,1·10¹⁶ см⁻³. Исходная проводимость для исследованных образцов изменялась от 0,12 до 2,6 Ом⁻¹·см⁻¹. Основные электрические параметры гетероструктур приведены в таблице, а пример распределения состава по толщине эпитаксиальной пленки показан на рис. 1.

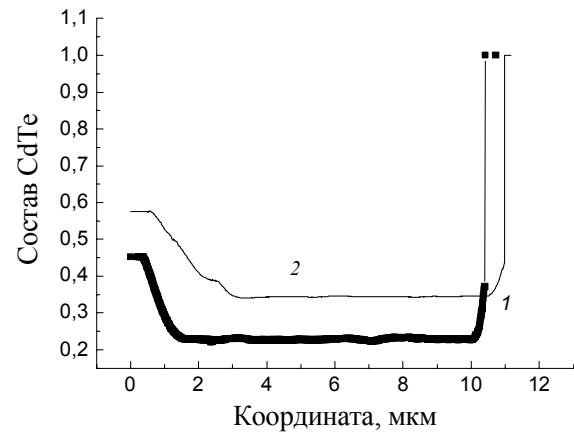


Рис. 1. Распределение состава по толщине эпитаксиальной пленки Hg_{1-x}Cd_xTe, измеренное автоматическим эллипсометром в процессе роста: 1 — структура № 3; 2 — структура № 4

Структуры № 1, 4—6 имели электронный тип проводимости, а структуры № 2, 3 — дырочный тип проводимости.

Для структур (образцов) № 1—3 в качестве пассивирующего покрытия использовали только CdTe или многослойный диэлектрик CdTe/SiO₂/Si₃N₄.

Для образцов № 5 и 6 в качестве защитного покрытия использовали CdTe/ZnTe, при этом слой ZnTe располагали сверху слоя CdTe толщиной 0,2 мкм, для образца № 4 — только CdTe.

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 измерении фотоэлектрических характеристик проводилось освещение МДП-структур через подложку (с обратной стороны) или с фронтальной стороны излучением с длиной волны 0,94 мкм. При освещении образцов со стороны подложки возможность измерения фотоЭДС обусловлена тем, что диффузионная длина неосновных носителей в HgCdTe (25—75 мкм для *n*-HgCdTe, а в *p*-HgCdTe — еще больше) превышает толщину эпитаксиальной пленки (не более 10 мкм).

Исходные параметры гетероструктур

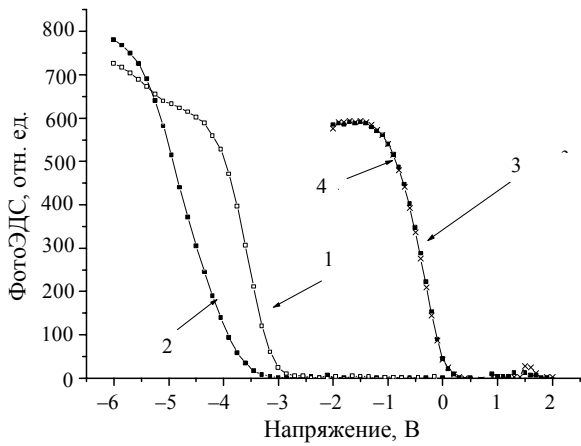
№ структуры	x	$n(p)$, см ⁻³	μ , см ² ·В ⁻¹ ·с ⁻¹	σ , Ом ⁻¹ ·см ⁻¹	τ , мкс	d , мкм	d_1 , мкм
1	0,229	2,7·10 ¹⁴	55 000	2,6	16—18	8,1	0,35
2	0,223	2,6·10 ¹⁵	560	0,24	0,02—0,03	8,65	0,35
3	0,227	1,1·10 ¹⁶	470	0,85	0,05—0,075	8,6	0,3
4	0,343	8,7·10 ¹³	11 000	0,15	13—20	7,5	0,4
5	0,347	1,3·10 ¹⁴	5600	0,12	14—27	6,4	0,4
6	0,324	1,9·10 ¹⁴	14 000	0,43	2,5—3,5	6,8	0,7

Обозначения в таблице: x — состав CdTe в рабочем слое HgCdTe; $n(p)$ — концентрация основных носителей (гальваномагнитные измерения проводили при магнитной индукции $B = 0,05$ Тл); μ — подвижность основных носителей; σ — проводимость; τ — время жизни неосновных носителей; d — толщина рабочего слоя структуры HgCdTe; d_1 — толщина верхнего варизонного слоя HgCdTe.

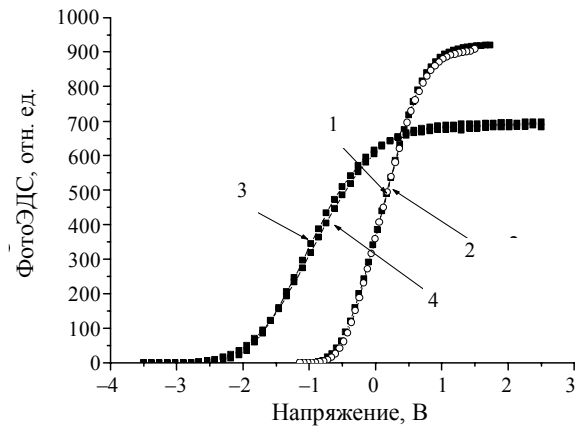
Измеряли зависимости фотоЭДС от напряжения, частоты модуляции интенсивности светового потока для МДП-структур на разных частотах. За прямое направление развертки принималось изменение напряжения от отрицательных значений к положительным, а за обратное направление — от положительных к отрицательным. Скорость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

Особенности фотоэлектрических характеристик МДП-структур с CdTe в качестве диэлектрика

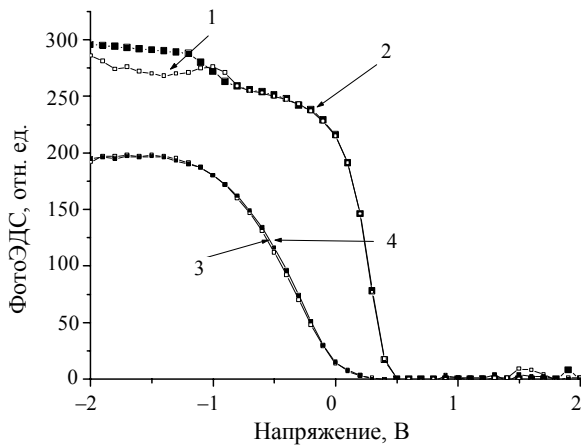
На рис. 2, а приведены типичные зависимости фотоЭДС от напряжения смещения и частоты для МДП-структуры на основе $n\text{-HgCdTe/CdTe/SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ и $n\text{-HgCdTe/CdTe}$ (№ 1).



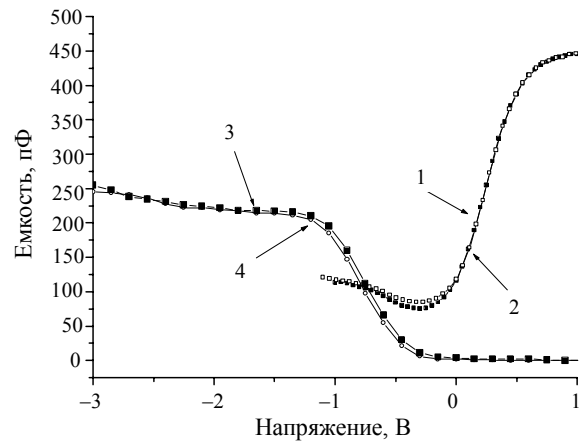
а



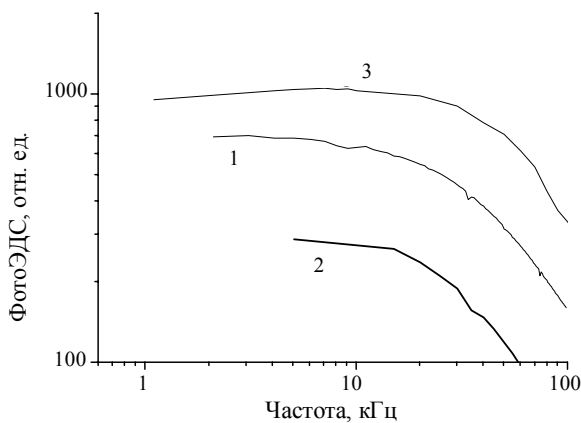
б



в



з



д

Рис. 2. Зависимости фотоЭДС от напряжения и частоты:
 а — для структуры № 1 на частоте 5 кГц при прямой (2, 4) и обратной (1, 3) развертках напряжения;
 1, 2 — с CdTe/SiO₂/Si₃N₄; 3, 4 — с CdTe;
 б — для структуры № 3 на частоте 5 кГц при прямой (1, 3) и обратной (2, 4) развертках напряжения;
 1, 2 — с CdTe; 3, 4 — CdTe/SiO₂/Si₃N₄;
 в — для структуры № 4 (1, 2) и № 5 (3, 4) на частоте 5 кГц при прямой (1, 3) и обратной (2, 4) развертках напряжения;
 з — для структур № 2 — с CdTe (1, 2) и № 6 — с CdTe/ZnTe (3, 4) на частоте 5 кГц при прямой (1, 3) и обратной (2, 4) развертках напряжения;
 д — от частоты:
 для структур: № 1 — с CdTe/SiO₂/Si₃N₄ (1), № 4 — с CdTe (2), № 6 — с CdTe/ZnTe (3) при напряжениях, соответствующих сильной инверсии

Как видно из рис. 2, а, фотоЭДС имеет одну компоненту в обеднении-инверсии, что свидетельствует об однородности приповерхностного слоя полупроводника. Гистерезис значителен для структуры с многослойным диэлектриком CdTe/SiO₂/Si₃N₄. Для МДП-структур с CdTe в качестве функционального диэлектрика гистерезис значительно меньше, что связано с малым подвижным зарядом в диэлектрике. При использовании в качестве диэлектрика CdTe/SiO₂/Si₃N₄ напряжение плоских зон примерно равно –3 В, что связано с положительным фиксированным зарядом в диэлектрике. В случае применения в качестве функционального диэлектрика только CdTe напряжение положительно и мало по величине, что связано с малым отрицательным зарядом в диэлектрике.

На рис. 2, б показаны зависимости фотоЭДС от напряжения для структуры № 3 на основе *p*-HgCdTe с различными диэлектрическими покрытиями CdTe и CdTe/SiO₂/Si₃N₄. Из рисунка видно, что гистерезис фотоэлектрических характеристик мал для различных диэлектрических покрытий. Вид фотоЭДС близок к классическому для данной МДП-структуры с полупроводником *p*-типа. Для структуры с диэлектриком CdTe напряжение плоских зон (–0,8 В) существенно меньше, чем напряжение плоских зон для МДП-структуры с многослойным диэлектриком CdTe/SiO₂/Si₃N₄ (–2,5 В).

На рис. 2, в показаны зависимости фотоЭДС от напряжения смещения для структур № 4 и 5 с высоким содержанием CdTe в рабочем слое ($x = 0,32–0,34$) с CdTe и CdTe/ZnTe в качестве диэлектрика. Как видно из рисунка, напряжения плоских зон положительны и малы по величине для МДП-структур при использовании в качестве защитного диэлектрика CdTe и CdTe/ZnTe, величина гистерезиса мала для обеих структур, что связано с малым подвижным зарядом в диэлектрических покрытиях.

На рис. 2, г приведены зависимости фотоЭДС от напряжения смещения для структур № 2 и 6. Как видно из рисунка, для структуры № 2 наблюдается вторая компонента фотоЭДС в режиме обогащения, что свидетельствует о неоднородности свойств этой структуры. Для структуры № 6 зависимость фотоЭДС от напряжения смещения имеет вид, близкий к классическому.

Таким образом, для МДП-структур с различными диэлектрическими покрытиями чаще всего наблюдается классический вид зависимости фотоЭДС от напряжения. Эта зависимость для узкозонного полупроводника *p*-HgCdTe (структура № 2) имеет значительный по величине сигнал в режиме обогащения. Для фотоЭДС в режимах сильной инверсии и обогащения наблюдаются разные зависимости от частоты модуляции свето-

вого потока и интенсивности фоновой подсветки. Наиболее вероятно, что сигнал фотоЭДС в обогащении связан с неоднородностью приповерхностного слоя по темновому сопротивлению, что может быть связано с неоднородным распределением электрически активных дефектов.

На рис. 2, д показаны зависимости фотоЭДС от частоты модуляции светового потока. Из частотных зависимостей фотоЭДС были определены времена жизни неосновных носителей заряда в области пространственного заряда. Видно, что наибольшее значение времени жизни наблюдается для структур с CdTe, а добавление дополнительного защитного покрытия приводит к его уменьшению. Времена жизни, определенные из частотных зависимостей фотоЭДС, составляли от 3,5 до 30 мкс.

Заключение

Выявлены особенности фотоэлектрических характеристик МДП-структур с широкозонными приповерхностными слоями и различными диэлектрическими покрытиями CdTe, CdTe/SiO₂—Si₃N₄ и CdTe/ZnTe.

Показано, что для МДП-структур с различными диэлектрическими покрытиями обычно наблюдается классический вид зависимости фотоЭДС от напряжения смещения.

Для МДП-структур на основе дырочного полупроводника возможно наличие двух компонент фотоЭДС, что свидетельствует о неоднородности свойств приповерхностной области полупроводника.

Выявлено, что для МДП-структур с CdTe характерны наименьшие значения фиксированного заряда в диэлектрике, а также малый подвижный заряд; для структур с CdTe/SiO₂—Si₃N₄ типичен небольшой положительный фиксированный заряд в диэлектрике.

Измерены зависимости фотоЭДС от частоты модуляции светового потока для МДП-структур с различными диэлектрическими покрытиями. Установлено, что времена жизни неосновных носителей больше при использовании в качестве защитного диэлектрического покрытия только CdTe. Для структур с многослойными защитными покрытиями CdTe/SiO₂—Si₃N₄ или CdTe/CdTe они несколько меньше.

Литература

1. Рогальский А. Инфракрасные детекторы: Пер. с англ./ Под ред. А. В. Войцеховского. — Новосибирск: Наука, 2003.
2. Овсяк В. Н., Курьшев Г. Л., Сидоров Ю. Г. и др. Матричные фотоприемники инфракрасного диапазона. — Новосибирск: Наука, 2001.
3. Войцеховский А. В., Давыдов В. Н. Фотоэлектрические МДП-структуры из узкозонных полупроводников. — Томск: Радио и связь, 1990.

Photoelectric characteristics of MIS-structures on the basis of HES HgCdTe MBE

A. V. Voitsekhovskii, S. N. Nesmelov, S. M. Dzyadukh
ASD "SPTI TSU", 1 Novosobornaya str., Tomsk, 634050, Russia
E-mail: vav@elefot.tsu.ru

V. V. Vasilev, V. S. Varavin, S. A. Dvoretzky, N. N. Mikhailov, Yu. G. Sidorov,
Yu. P. Mashukov, M. V. Yakushev
IPS SB RAS, 13 Lavrent'eva av., Novosibirsk, 630090, Russia
E-mail: ifp@isp.nsc.ru

The investigation of dependencies of photo-EMF from frequency and voltage bias for MIS-structures in base graded-band HES HgCdTe MBE were carry out. The life time of minority carriers in space-charge region for various composition in graded-band layer and for different insulators were determination. For MIS-structures in base of HgCdTe/CdTe, HgCdTe/CdTe—SiO₂/Si₃N₄ and HgCdTe/CdTe/ZnTe n- and p-types the kind of dependencies of small-signal photo-EMF from voltage bias were determinated at used by functional insulator CdTe formed by at grown heteroepitaxial structures.

PACS: 72.80. Sk; 73.20.-r; 73.21.Ac; 73.40.Qv

Keywords: photosignal, charge carriers, space charge, cavers.

Bibliography — 3 references.

Received 18 December 2009