

**ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРОВ ОТРАЖЕНИЯ ОБРАЗЦОВ КРТ,  
ИМПЛАНТИРОВАННЫХ ИОНАМИ В<sup>+</sup>**

© 2016 г. В.А. ШВЕЦ<sup>1,2</sup>, В.Г. РЕМЕСНИК<sup>1</sup>, Н.Н. МИХАЙЛОВ<sup>1,2</sup>, В.С. ВАРАВИН<sup>1</sup>,  
С.А. ДВОРЕЦКИЙ<sup>1,3</sup>, П.Л. СМИРНОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБУН Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, г. Новосибирск,

<sup>2</sup>Новосибирский государственный университет,

<sup>3</sup>Томский государственный университет

e-mail: shvets@isp.nsc.ru

При изготовлении фотодиодных матричных ИК фотоприемников большой размерности используют технологию ионной имплантации для создания высоколегированных областей. Для фотоприемников на основе теллурида кадмия и ртути (КРТ) наиболее отработана технология создания высоколегированной области n-типа проводимости при ионной имплантации бора в КРТ р-типа проводимости, формирующая фотодиоды с архитектурой типа «n-na-r» [1]. Для получения качественных n-p переходов необходим контроль параметров высоколегированных областей фотодиода после имплантации и термических активационных отжига. Для характеристики ионно-легированных слоев нами использована спектроскопия отражения, которая позволяет проводить измерения незначительных изменений структуры материала после различных воздействий. В настоящей работе проведено исследование спектров отражения слоёв КРТ, облучённых ионами В<sup>+</sup> с энергией 50 и 190 кэВ и предложена оптическая модель, описывающая измеренные спектры.

Гетероэпитаксиальная структура (013)HgCdTe/CdTe/ZnTe/ GaAs была выращена на сверхвысоковакуумной многокамерной установке молекулярно-лучевой эпитаксии твердых растворов “Обь-М” с использованием отдельных источников молекулярных пучков при *in situ* эллипсометрическом контроле параметров растущего слоя [2]. Толщина слоя постоянного состава КРТ составляла 8 мкм, молярное содержание теллурида кадмия в рабочей области  $x=0.22$ . К гетерогранице и к поверхности состав монотонно увеличивался до  $x=0.44$  для уменьшения поверхностной рекомбинации неосновных носителей заряда.

Выращенные структуры подвергались химическому травлению в 0,5% растворе Br:HBr для удаления варизонного слоя. Затем структуры облучались ионами В<sup>+</sup> с энергиями 50 и 190 кэВ до дозы  $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  и разрезались на отдельные образцы, на каждом из которых травлением в 0,1% Br:HBr удаляли тонкие слои и затем измеряли спектры отражения и пропускания.

При облучении полупроводников ионами высоких энергий в приповерхностном слое образуются радиационные дефекты, которые заметно влияют на оптические свойства имплантированных слоёв и, соответственно, на спектры отражения и пропускания. Максимальные нарушения структуры наблюдаются на некоторой глубине от поверхности, поскольку удельные потери ионов растут с уменьшением их энергии. Образование такого «захороненного» слоя с высокой концентрацией дефектов, имеющего модифицированные оптические свойства в матрице структурно совершенного кристалла, будет приводить к интерференции света и влиять на коэффициент отражения от поверхности.

На рис. 1 показаны спектры отражения  $R(\nu)$  для образцов с различной толщиной удалённого слоя, облучение ионами бора с энергией 50 кэВ. В длинноволновой облас-

ти, где структура прозрачна, видны интерференционные осцилляции, которые формируются на буферном слое CdTe и слое КРТ. В средней области спектра (области полупрозрачности) наблюдается немонотонная зависимость  $R(\nu)$ , которую можно связать с интерференцией на имплантированном слое КРТ. По мере увеличения толщины снятого слоя наблюдаемая зависимость изменяется и полностью исчезает после удаления  $\sim 0.5$  мкм. Поэтому можно сделать вывод, что нарушенная область лежит в приповерхностном слое толщиной не более 0.5 мкм.

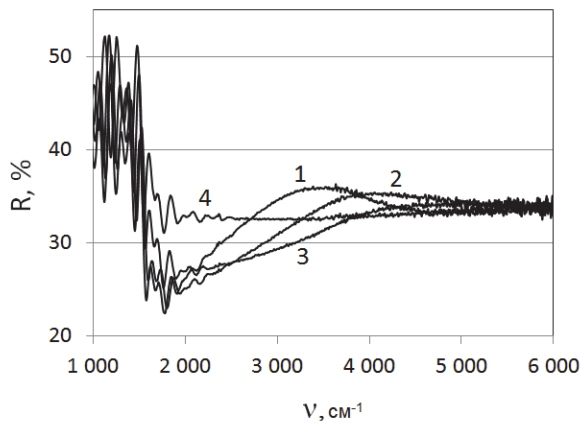


Рис. 1. Спектры отражения для образцов КРТ, имплантированных ионами бора. Толщина удалённого поверхностного слоя (мкм): 1 – 0, 2 – 0.07, 3 – 0.12, 4 – 0.6.

тотной границе диапазона. Таким образом, интерференция должна проявляться в средней и длинноволновой области спектра ( $\nu < 4500 \text{ см}^{-1}$ ) и в значительной мере экранироваться в области коротких длин волн ( $\nu > 4500 \text{ см}^{-1}$ ). Именно такой характер зависимостей наблюдается в эксперименте на рис. 1. Моделирование спектров проводили по двухслойной модели: нарушенный слой толщины  $d_1$  с модифицированными оптическими свойствами, залегающий на глубине, и слой ненарушенного КРТ толщины  $d_2$  на поверхности.

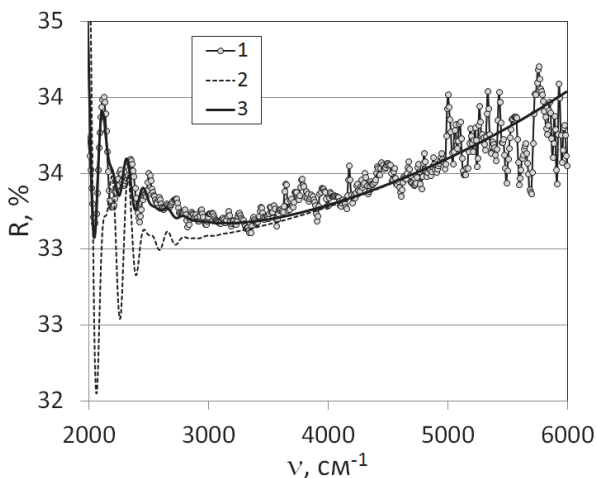


Рис. 2. Спектры отражения образца КРТ: 1 – эксперимент, 2 – расчёт для постоянно  $n_0$ , 3 – расчёт с учётом вклада критической точки  $E_0$ .

Ван-Хова  $E_0$ . Вклад этой 3D критической точки в оптические свойства описывается в работе [4] моделью диэлектрической функции (MDF) и даётся следующими соотношениями:

$$1. \quad \epsilon(\mathbf{E}) = \frac{\mathbf{A}}{E_0 \sqrt{E_0}} \cdot \frac{2 - \sqrt{1 + \chi_0} - \sqrt{1 - \chi_0}}{\chi_0^2}, \quad \chi_0 = \frac{E + i\Gamma}{E_0} \quad (2)$$

где,  $A$ , и  $\Gamma$  – амплитуда перехода и параметр уширения. Отметим, что в таком виде добавка к диэлектрической функции автоматически удовлетворяет соотношению Кра-

мерса-Кронига. Кроме того, формула (2) описывает также хвост поглощения в области Урбаха при  $E < E_0$  и позволяет получить гладкую зависимость показателя поглощения по спектру. Подбирая надлежащим образом параметры  $A$  и  $\Gamma$  можно добиться более точного совпадения расчётных и экспериментальных спектров отражения. На рисунке

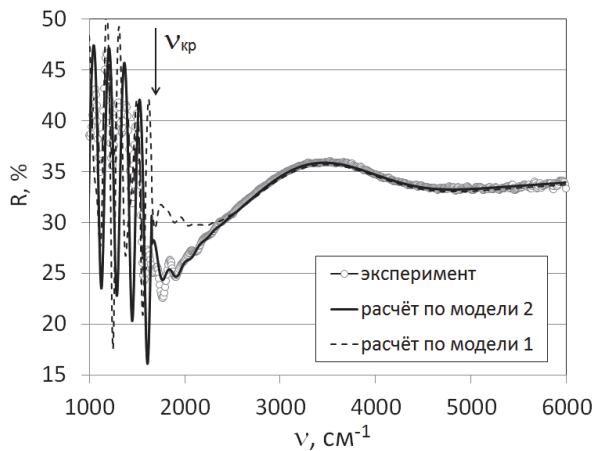


Рис 3. Спектры отражения имплантированной структуры: эксперимент и расчёт по 2-м моделям.

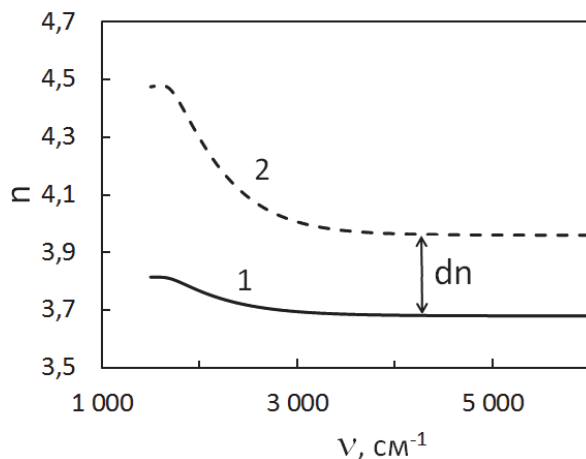


Рис. 4. Спектральная зависимость показателя преломления КРТ: 1 – исходный материал; 2 – имплантированный ионами  $B^+$ .

параметр уширения  $\Gamma_1$  и амплитуда  $A_1$  в MDF нарушенного слоя (модель 2). В результате проведённого фитинга найдены значения  $A_1=1.6$   $\Gamma_1 \approx \Gamma=0.015$  при прежних  $d_1$ ,  $d_2$  и  $\delta n$ . Расчётная кривая для данной модели показана на рис. 3, и она хорошо описывает экспериментальную зависимость во всём диапазоне частот, превышающих край поглощения. Полученная спектральная зависимость показателя преломления нарушенного КРТ вместе с показателем преломления исходного материала представлены на рис. 4. Дефекты кристаллической решётки приводят к увеличению показателя преломления, особенно значительному вблизи края поглощения.

Предложенная двухслойная модель описывает также поведение спектров коэффициентов отражения, измеренных при последовательном травлении имплантированного слоя. При этом в модели варьировался только один параметр – толщина поверхностного слоя  $d_2$ , который уменьшался в серии экспериментов с травлением. Изменение толщины стравленного слоя определялось также по смещению интерференционных максимумов в спектрах пропускания и отражения структуры, измеренных в области её прозрачности ( $\nu < 1700 \text{ см}^{-1}$ ). Результаты определения толщин разными спо-

на кривая 3 соответствует расчёту при  $\Gamma=0.015$  эВ и  $A=0.3$ . Она более точно описывает экспериментальную зависимость  $R(\nu)$ , а также скорость возрастания амплитуды интерференционных колебаний по мере приближения к  $E_0$ .

Найденные выше оптические постоянные КРТ были взяты в качестве базы для последующего моделирования спектров отражения имплантированных структур. В простейшей модели предполагалось, что показатель преломления нарушенного слоя отличается от показателя преломления ненарушенного на постоянную величину  $\delta n$  (модель 1). Вариацией параметров  $d_1$ ,  $d_2$  и  $\delta n$  добивались наилучшего совпадения между измеренным и расчётным спектрами. На рис. 3 показан результат оптимальной подгонки для образца после имплантации. При этом значения подгоночных параметров получились равными:  $\delta n=0.28$ ,  $d_1=0.22$  мкм и  $d_2=0.35$  мкм. Эта модель прекрасно описывает зависимость  $R(\nu)$  в высокочастотном диапазоне ( $\nu > 2500 \text{ см}^{-1}$ ). Однако вблизи края поглощения  $\nu_{кр}$  наблюдаются заметные расхождения между спектрами, которые не удаётся устранить вариацией перечисленных параметров. Можно ожидать, что вблизи  $\nu_{кр}$  оптические постоянные нарушенной области претерпевают более значительные изменения, чем в высокочастотном диапазоне спектра. Поэтому к варьируемым параметрам были добавлены также па-

собами представлены в табл. 1. Не смотря на заметный разброс в данных, наблюдается корреляция толщин, определённых различными способами. Это доказывает правомерность модели, применяемой для описания имплантированного слоя.

Таблица 1

Результаты определения толщин удалённого слоя (мкм) по интерференции в области прозрачности структуры и по интерференции на имплантированном слое

Номер травления	По интерференции на всей структуре		По интерференции на имплантированном слое
	Спектры пропускания	Спектры отражения	
1	0	0	0.03 - 0.04
2	0.07	0.10	0.05 - 0.06
3	0.19	0.15	0.07
4	0.17	0.17	0.10
5	0.13	0.16	0.12
6	0.15	0.25	0.19

После удаления  $\sim 0.25$  мкм интерференция на имплантированном слое становится менее выраженной, а при удалении  $\sim 0.5$  мкм исчезает полностью. Из этого можно оценить глубину залегания границы нарушений  $d_D \sim 0.4-0.6$  мкм. Данная оценка совпадает с толщиной, которая получается из предложенной выше двухслойной модели  $d_1+d_2=0.57$  мкм, описывающей интерференцию на нарушенном слое. Для структур, облучённых ионами с энергией 190 кэВ, соответствующие толщины получились равными  $d_1=0.55$  мкм и  $d_2=0.82$  мкм при  $\delta n=0.2$ . Увеличение толщин  $d_1$  и  $d_2$  по сравнению с образцами, облучёнными энергией 50 кэВ, согласуется с общими представлениями, из которых следует возрастание проекционного пробега ионов и их дисперсии с увеличением начальной энергии.

После термического отжига имплантированных образцов в ртутной атмосфере интерференционные осцилляции в спектрах отражения исчезают. Это говорит о восстановлении исходных оптических свойств нарушенного слоя.

В работе исследованы оптические характеристики имплантированных слоёв КРТ. Показано, что наблюдаемая интерференция в спектрах отражения в области собственного поглощения материала связана с образованием дефектного слоя. Найдено, что глубина залегания нарушенного слоя зависит от энергии ионов. После термического отжига интерференционная картина в спектрах отражения исчезает. Разработана модель описывающая спектры отражения образцов после ионной имплантации. Исследование спектров поглощения в образцах КРТ после ионной имплантации и термического отжига или иного воздействия может быть использована в качестве метода для отработки технологических процессов создания приборных структур на основе КРТ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Destefanis G.* Electrical doping of HgCdTe by ion implantation and heat treatment // J. Cryst. Growth. – 1988, V. 86, iss. No. 1-4, P. 700-722.
2. *Швец В.А., Дворецкий С.А., Михайлов Н.Н.* Выращивание гетероструктур HgCdTe при эллипсометрическом контроле insitu. //Автоматрия.-2011, т. 47, №5, с. 13-24.
3. *Chu J., Li B., Liu K., Tang D.* Empirical rule of intrinsic absorption spectroscopy in  $Hg_{1-x}Cd_xTe$  // J.Appl.Phys.,-1994, V.75, No 2, P.1234-1235.
4. *Djurisic A.B., Li E.H.* Modeling the optical constants of  $Hg_xCd_{1-x}Te$  alloys in the 1.5–6.0 eV range //J.Appl. Phys. - 1999, V.85, No.51, P.2854-2860.