

09.03.05

Изменение спектра оптического пропускания эпитаксиальных пленок $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ при воздействии магнитного поля

© А.В. Бродовой¹, С.Г. Бунчук², З.Ф. Цибрий²¹ Институт проблем материаловедения им. И.Н. Францевича НАН Украины, Киев, Украина² Институт физики полупроводников им. В.Е. Лашкарева НАН Украины, Киев, Украина

E-mail: S-bunchuk@mail.ru

(Поступила в Редакцию 15 июня 2010 г.)

Проведено экспериментальное исследование спектров оптического пропускания эпитаксиальных слоев $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ с градиентом ширины запрещенной зоны. Показана возможность трансформации вида спектров после экспонирования образцов в однородном магнитном поле. Вероятной причиной этого эффекта является зависимость намагниченности пленок $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ от градиента состава твердого раствора.

1. Введение

В связи с разработкой приборов для инфракрасной области спектра не уменьшается интерес к твердым растворам (ТР) теллурида кадмия и ртути. Однако пространственные флуктуации состава и концентрации собственных дефектов, структурные нарушения существенно влияют на свойства $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ и на стабильность приборов, изготовленных на их основе.

Современные фотоприемники инфракрасного излучения преимущественно изготавливают из эпитаксиальных пленок узкощелевых ТР $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ толщиной $d \sim 10\text{--}20\ \mu\text{m}$, которые выращиваются на широкозонных подложках $\text{Cd}_{1-y}\text{Zn}_y\text{Te}$. В этом случае при $y = 0.03\text{--}0.04$ эпитаксиальные слои пленок $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ с $x = 0.21\text{--}0.22$ согласованы по постоянной решетки с подложкой. Одним из методов выращивания пленок на указанных подложках является метод жидкофазной эпитаксии. Вследствие того, что ширина запрещенной зоны $\text{Zn}_y\text{Cd}_{1-y}\text{Te}$ (при $y \leq 0.04$ $E_g \sim 1.6\ \text{eV}$) намного превышает ширину запрещенной зоны пленок $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$, используемых для фотоприемников с красной границей фотоответа $\lambda \sim 10\ \mu\text{m}$ (при $x = 0.215$ $E_g \sim 0.1\ \text{eV}$), между подложкой и пленкой образуется слой с градиентом ширины запрещенной зоны, толщина которого зависит от технологических условий выращивания эпитаксиальных пленок. Для нахождения величины градиента состава в пленках широко используется метод исследования спектральных зависимостей оптического пропускания [1,2]. К преимуществам этого метода относятся неразрушающий характер, относительная простота, высокая точность и скорость выполнения измерений.

Увеличение однородности и стабильности свойств $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ может быть достигнуто путем экспозиции образцов в магнитном поле, что в принципе приводит к повышению однородности электрофизических и оптических параметров полупроводниковых кристаллов [3].

2. Материал и методики исследования

Настоящая работа посвящена исследованию влияния магнитного поля на градиент состава пленок $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$. Исследовались эпитаксиальные пленки $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$, выращенные методом жидкофазной эпитаксии на подложках CdZnTe , с ориентацией вдоль кристаллографического направления (111), диаметром $\sim 20\ \text{mm}$ и толщиной $\sim 19\ \mu\text{m}$. Пленки p -типа проводимости имели концентрацию дырок $1.4 \cdot 10^{16}\ \text{cm}^{-3}$ при комнатной температуре. Перед измерениями оптического пропускания T поверхность пленок обрабатывалась полирующим травителем с целью уменьшения ее микрошероховатости и удаления оксидов.

Оптическое пропускание измеряли на ИК-спектрометре ИКС-31. Данные в ходе измерений вводили в компьютер с помощью цифрового вольтметра, оборудованного интерфейсом ИЕЕЕ-488. Программное обеспечение позволяло измерять спектры с шагом $\Delta\lambda = 0.016\ \mu\text{m}$. Для повышения точности в каждой точке делалось 50 измерений, после чего проводились усреднения данных. Для исследования пространственных вариаций E_g в площади пленок оптическое пропускание измерялось на нескольких участках с использованием непрозрачной диафрагмы с диаметром отверстия $\sim 1\ \text{mm}$.

Исследовано влияние длительной экспозиции в постоянном магнитном поле на изменение спектров оптического пропускания $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$. Для этих целей образцы помещались в однородное магнитное поле ($\sim 0.5\ \text{T}$), где находились длительное время.

Измерения проводились в следующей последовательности: записывались кривые $T(\hbar\omega)$ исходных ТР $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$. Далее часть образцов помещалась в постоянное однородное магнитное поле, где они находились в течение месяца, и затем снова записывались зависимости $T(\hbar\omega)$.

3. Экспериментальные результаты

На рис. 1 приведены типичные результаты измерений $T(\hbar\omega)$ при комнатной температуре до и после экспонирования в магнитном поле. На рис. 1 видно, что после экспонирования образцов в однородном магнитном поле их спектральная зависимость $T(\hbar\omega)$ смещается в длинноволновую область. Из рисунка также видно, что наиболее существенные изменения в зависимостях $T(\hbar\omega)$ наблюдаются в области энергий фотонов $\hbar\omega \geq E_g$, ($\lambda = 7 \mu m$, $E_g \sim 0.18 eV$), когда происходят только прямые межзонные переходы.

Влияние магнитного поля на изменение $T(\hbar\omega)$ $Hg_{1-x}Cd_xTe$ можно понять на основании анализа изменения магнитной составляющей свободной энергии ΔF_{mag} в однородном магнитном поле [4]

$$\Delta F_{mag} = \Delta\chi H^2,$$

где $\Delta\chi$ — изменение магнитной восприимчивости (МВ) $Hg_{1-x}Cd_xTe$ в зависимости от состава ТР, H — внешнее магнитное поле.

По размерности (энергия на единицу объема) и по физическому смыслу ΔE_{mag} представляет собой давление — силу, действующую между областями с разными значениями МВ.

Теоретическое значение МВ $Hg_{1-x}Cd_xTe$ определено нами по формуле [5]

$$\chi = -\frac{P}{h} \left(\frac{l}{2\pi c} \right)^2 \left[\left(\frac{3m_0 P^2}{2\Delta} - \frac{1}{12} \left(\frac{2}{3} \right)^{1/2} \ln \left| \frac{2\Delta}{E_g} \right| \right) \right]. \quad (1)$$

Для расчетов $E_g(x)$ использовалось аппроксимационное выражение [6]

$$E_g = -0.302 + 1.93x - 0.81x^2 + 0.832x^3 + 5.32 \cdot 10^{-4}(1-2x) \left[\frac{-1822 + T^3}{255.2 + T^2} \right],$$

где E_g берется в электронвольтах, а T — в кельвинах. Численные значения матричного элемента оператора импульса P , межзонных зазоров Δ и E_g приведены в работах [7,8].

Как видно из (1), намагниченность полупроводников рассматриваемого типа должна убывать при уменьшении щели $|E_g|$. Отметим также, что МВ носителей тока в $HgCdTe$ мала по сравнению с восприимчивостью решетки вплоть до концентраций порядка $10^{18} cm^{-3}$.

По данным работ [9,10] видно, что результаты вычислений восприимчивости $Hg_{1-x}Cd_xTe$ хорошо совпадают с экспериментальными данными по МВ.

С помощью рентгеновского микроанализатора (рис. 2) изучен состав пленок $Hg_{1-x}Cd_xTe$. Он изменяется с толщиной, что обуславливает существенное изменение ширины запрещенной зоны исследуемых пленок.

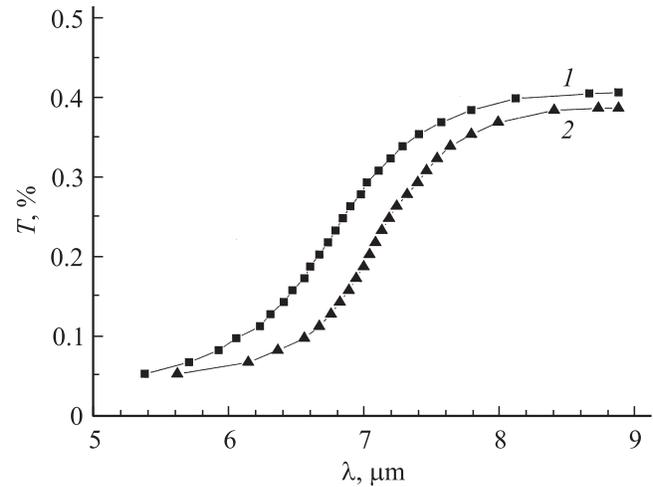


Рис. 1. Спектральная зависимость оптического пропускания эпитаксиальных пленок $Hg_{1-x}Cd_xTe$ при комнатной температуре. 1 — исходный образец, 2 — образец после экспонирования в однородном магнитном поле.

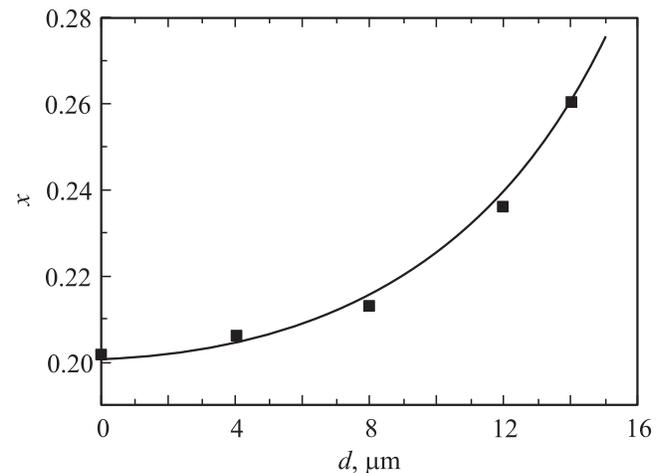


Рис. 2. Изменение состава по толщине эпитаксиального слоя пленок $Hg_{1-x}Cd_xTe$.

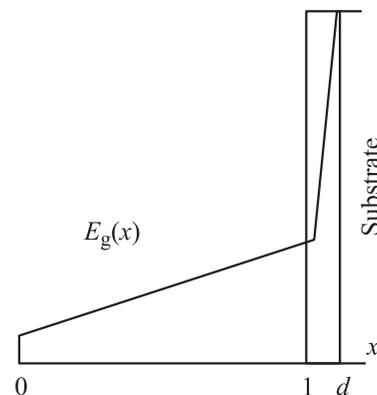


Рис. 3. Схематическая энергетическая диаграмма, которая демонстрирует градиент ширины запрещенной зоны в эпитаксиальной пленке $Hg_{1-x}Cd_xTe$ с переходной областью $1-d$.

На рис. 3 представлена диаграмма, которая демонстрирует наличие градиента ширины запрещенной зоны, а следовательно, и МВ в эпитаксиальной пленке $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ с переходной областью пленка–подложка. Как видно из рис. 3, градиент намагниченности максимален в области пленка–подложка ($1-d$).

Разность магнитных энергий пленки HgCdTe –подложки CdZnTe можно записать как $\Delta F_{\text{mag}} = |\chi_1 V_1 - \chi_2 V_2| H^2$, где χ_1, χ_2 — МВ подложки и пленки, V_1, V_2 — объемы подложки и пленки соответственно.

Такое же изменение энергии произойдет, если область, где наблюдается максимальный градиент намагниченности, будет находиться под давлением

$$\Delta P_m = \frac{|\chi_1 V_1 - \chi_2 V_2| H^2}{\Delta Z S},$$

где $\Delta Z \sim 10^{-4}$ см — размер области $1-d$, $S \sim 3 \cdot 10^{-2}$ см² — площадь напыленной пленки.

Для нашего случая имеем следующие значения параметров: $\Delta\chi \sim 10^{-6}$ (в безразмерных единицах), $H^2 \sim 10^7$ Ое², $V_1 \gg V_2 = 0.2$ см³. Тогда $\Delta P_m \sim 10^6$ дин/см².

Предположим, что под воздействием давления ΔP_m объем материала увеличивается на величину ΔV . Упругое давление, которое при этом возникает, стремится сократить тело и при малых изменениях ΔV представляется выражением [11] $\Delta P_m = -B(\Delta V/V)$, где $B \sim 10^{10}$ дин/см² — модуль всестороннего сжатия [12], V — нормальный объем при отсутствии внешних воздействий.

Тогда $\Delta V/V \sim 10^{-4}$ и можно оценить изменение параметра решетки HgCdTe : $\Delta V/V = 3$, $\Delta a/a = \beta T$, где $\beta = 4.3 \cdot 10^{-6}$ /К — коэффициент теплового расширения [12]. „Температура“, отвечающая такому локальному увеличению постоянной решетки, равна ~ 100 К.

Суммируя изложенное выше, можно сделать вывод, что экспозиция ТР в однородном магнитном поле в течение длительного времени приводит к уменьшению градиента состава пленок $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ на подложке CdZnTe . Внешним проявлением этих процессов будет изменение спектрального распределения оптического пропускания ТР $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$. В работе [13] сделан вывод, что при наличии градиента ширины запрещенной зоны зависимости оптического пропускания $T(\hbar\omega)$ сдвигаются в коротковолновую область, тогда как отсутствие градиента Eg сдвигает зависимости $T(\hbar\omega)$ в длинноволновую область.

Отметим, что подобные эффекты наблюдались нами для ТР InSb – CdTe [14], причем основные закономерности эффекта (управление физическими свойствами с помощью магнитного поля) были такими же, как и для исследованных материалов $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$.

Список литературы

- [1] З.Ф. Ивасив, Ф.Ф. Сизов, В.В. Тетеркин. Докл. НАН Украины 11, 92 (1999).
- [2] В.В. Тетеркин, З.Ф. Ивасив, Ф.Ф. Сизов. УФЖ 44, 9, 1128 (1999).
- [3] А.В. Бродовой, В.А. Бродовой, В.Г. Колесниченко, В.В. Скороход. УФМ 2, 265 (2001).
- [4] Б.С. Бокштейн, Ч.П. Копецкий, Л.С. Швиндлерман. Термодинамика и кинетика границ зерен в металлах. Металлургия, М. (1986). 224 с.
- [5] Л.А. Фальковский, А.В. Бродовой, Г.В. Лашкарев. ЖЭТФ 80, 6, 334 (1981).
- [6] J.R. Lowney, D.G. Seiler, C.L. Litter, H. Yoon. J. Appl. Phys. 71, 1253 (1992).
- [7] J.L. Schmit. J. Appl. Phys. 41, 7, 2876 (1970).
- [8] A. Rogalski. Infrared detectors. Gordon and Breach, the Netherlands (2000). 681 p.
- [9] Г.В. Лашкарев, А.В. Бродовой, М.В. Радченко, А.Л. Мирец, Е.С. Паренская, М.С. Никитин, Ю.И. Растегин, С.П. Колесник. ФТП 26, 10, 1768 (1992).
- [10] Г.В. Лашкарев, А.В. Бродовой, А.Л. Мирец, С.П. Колесник, Г.А. Зыков, М.С. Никитин. ФТП 27, 8, 1381 (1993).
- [11] Я.И. Френкель. В кн.: Введение в теорию металлов. ГИФМЛ, М. (1958). С. 234.
- [12] П.И. Баранский, В.П. Клочкин, И.В. Потыкевич. Полупроводниковая электроника. Справочник. Наук. думка, Киев. (1975). 682 с.
- [13] З.Ф. Ивасив. Исследование влияния градиента состава и дефектов решетки на оптические, фотоэлектрические свойства и механизмы переноса заряда в твердых расторах HgCdTe и фоточувствительных структурах на их основе. Автореф. канд. дис. Ин-т физики полупроводников им. В.Е. Лашкарева НАН Украины, Киев (2000). 18 с.
- [14] A.V. Brodovoi, V.G. Kolesnihenko, V.V. Skorokhod, V.A. Brodovoi. Proc. SPIE. Mater. Sci. Mater. Properties Infrared Optoelectron. 4355, 211 (2000).