

03,05

Вариации ширины запрещенной зоны твердых растворов $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ после воздействия магнитного поля

© А.В. Бродовой¹, С.Г. Бунчук², З.Ф. Цибрий²

¹ Институт проблем материаловедения им. И.Н. Францевича НАН Украины, Киев, Украина

² Институт физики полупроводников им. В.Е. Лашкарева НАН Украины, Киев, Украина

E-mail: S-bunchuk@mail.ru

(Поступила в Редакцию 8 ноября 2011 г.)

Проведено экспериментальное исследование спектров оптического пропускания эпитаксиальных слоев $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ с градиентом намагниченности. Градиент намагниченности искусственно создан встречным расположением полюсов магнитов. Показана возможность трансформации вида спектров оптического пропускания пленок HgCdTe после их экспонирования в магнитном поле. Высказаны предположения о механизме, лежащем в основе этого явления.

1. Введение

В современной фотоэлектронике большое внимание уделяется инфракрасному диапазону спектра, что обусловлено потребностями науки и техники. В области инфракрасной фотоэлектроники наиболее актуальными с точки зрения прикладного использования являются твердые растворы (ТР) на основе соединений $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$. Несмотря на то, что полупроводники системы HgCdTe — одни из наиболее изученных, они продолжают интенсивно исследоваться, о чем свидетельствует большое количество публикаций [1,2].

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 $\text{Zn}_y\text{Cd}_{1-y}\text{Te}$. В последнем 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. Вследствие того, что ширина запрещенной зоны $\text{Zn}_y\text{Cd}_{1-y}\text{Te}$ (при $y \leq 0.04$ $E_g \approx 1.6 \text{ eV}$) 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 E_g в пленках широко используется метод исследования спектральных зависимостей оптического пропускания [3,4]. 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 [5].

В предыдущей публикации [6] изучено воздействие однородного магнитного поля на оптические свойства ТР $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$. В настоящей работе исследовано влияние длительной экспозиции в постоянном неоднородном магнитном поле ($dH/dx = 0.5 \text{ T/mm}$) на изменение спектра оптического пропускания эпитаксиальных пленок $T(\hbar\omega)$ $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$. Неоднородное поле создавалось встречным расположением магнитов (рис. 1).

2. Материал и методика исследования

Исследовались эпитаксиальные пленки $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ диаметром $\sim 20 \text{ mm}$ и толщиной $\sim 19 \mu\text{m}$, выращенные методом жидкофазной эпитаксии на подложках

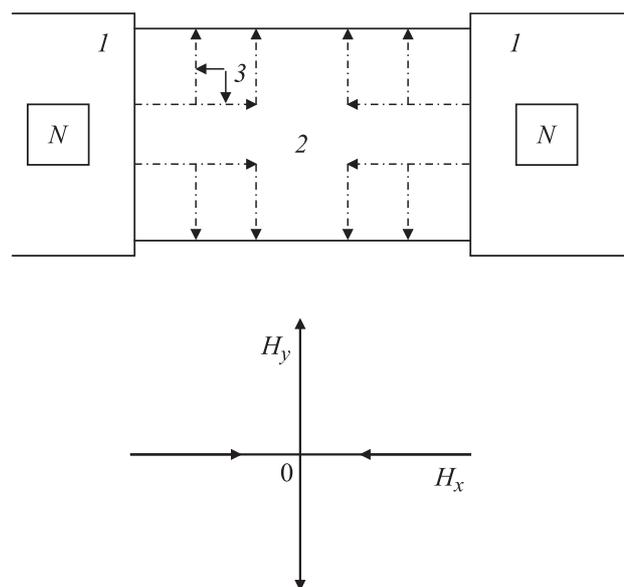


Рис. 1. Модель распределения неоднородного магнитного поля в образце. 1 — магниты, 2 — образец, 3 — направление силовых линий.

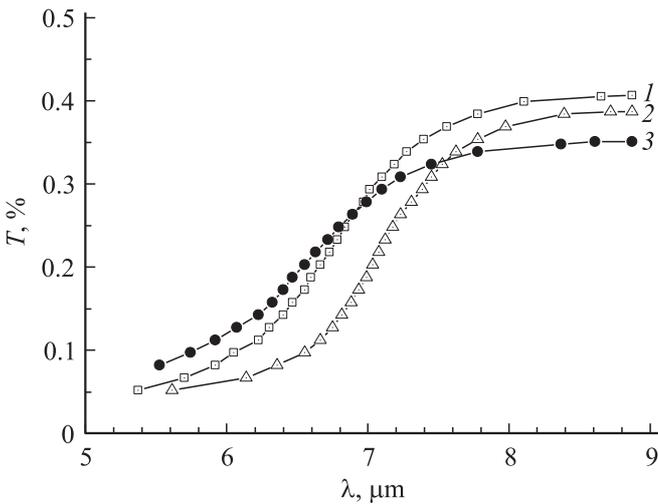


Рис. 2. Спектральная зависимость оптического пропускания эпитаксиальных пленок $Hg_{1-x}Cd_xTe$ при комнатной температуре. 1 — исходный образец, 2 — образец после экспонирования в однородном магнитном поле, 3 — образец после экспонирования в неоднородном магнитном поле.

$ZnCdTe$ с ориентацией вдоль кристаллографического направления (111). Пленки p -типа проводимости имели концентрацию дырок $1.4 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ при комнатной температуре. Перед измерениями оптического пропускания поверхность пленок обрабатывалась полирующим травителем с целью уменьшения ее микрошероховатости и удаления оксидов.

Оптическое пропускание измерялось на ИК-спектрометре ИКС-31. Данные в ходе измерений вводились в персональный компьютер с помощью цифрового вольтметра, оборудованного интерфейсом ИБЕЕ-488. Програмное 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 в площади пленок оптическое пропускание измерялось на нескольких участках с использованием непрозрачной диафрагмы с диаметром отверстия $\sim 1 \text{ mm}$.

Измерения проводились в такой последовательности. Сначала записывались спектры $T(\hbar\omega)$ исходных ТР $Hg_{1-x}Cd_xTe$. Далее часть образцов помещалась в постоянное неоднородное магнитное поле, где они находилась в течение месяца, и затем снова записывались зависимости $T(\hbar\omega)$.

На рис. 2 приведены типичные результаты измерений $T(\hbar\omega)$ при комнатной температуре пленок ТР $Hg_{1-x}Cd_xTe$ до и после экспонирования их в магнитном поле. Из рис. 2 видно, что после экспонирования образцов в неоднородном магнитном поле их спектральная зависимость $T(\hbar\omega)$ смещается в коротковолновую область. Из рисунка также видно, что наиболее существенные изменения в зависимостях $T(\hbar\omega)$ наблюдаются в области энергий фотонов $\hbar\omega \geq E_g$ ($\lambda = 7 \mu\text{m}$, $E_g \approx 0.18 \text{ eV}$), где происходят только прямые межзонные переходы.

Для объяснения эффекта влияния неоднородного магнитного поля на $T(\hbar\omega)$ $Hg_{1-x}Cd_xTe$ можно высказать следующее предположение. На рис. 1 показано условное изображение распределения магнитного поля в образце при однополярном ($N-N$) расположении магнитов. При этом краевыми эффектами мы пренебрегаем, так как размеры образцов значительно (примерно на порядок) меньше геометрических размеров магнитов. Следует обратить внимание на тот факт, что в направлении у магнитное поле меняет направление $\mathbf{H} \rightarrow -\mathbf{H}$.

Между неоднородно намагниченными областями будет действовать сила, величина которой определяется градиентом магнитной энергии $F = \chi V H \Delta H / \Delta y$, где χ — магнитная восприимчивость образца (в безразмерных единицах); Δy — область, в пределах которой магнитное поле меняет направление $(+) \rightarrow (-)$; ΔH — изменение магнитного поля, которое равно $2H$; V — объем образца (подложка + пленка).

Для нашего случая используем следующие значения параметров: $\chi \sim 10^{-6}$ [6], $H \sim 0.5 \text{ T}$, $V = 0.2 \text{ cm}^3$ (объемом пленки можно пренебречь по сравнению с объемом подложки), $\Delta y \sim 10^{-7} \text{ cm}$. Тогда $F \sim 10^8 \text{ dyn}$, или для магнитного давления $P_M = \frac{F}{S} \sim 4.5 \cdot 10^7 \text{ dyn/cm}^2$, где $S \approx 2.3 \text{ cm}^2$ — площадь границы раздела между неоднородно намагниченными областями.

Под воздействием магнитного давления P_M объем материала увеличивается на величину ΔV , и при малых изменениях ΔV можно представить P_M в виде [7]: $P_M = -B(\Delta V/V)$, где $B \approx 10^{10} \text{ dyn/cm}^2$ — модуль всестороннего сжатия [8,9], V — нормальный объем при отсутствии внешних воздействий.

Тогда $\Delta V/V \approx 4.5 \cdot 10^{-3}$ в области максимального градиента намагниченности. Поскольку толщина подложки $ZnCdTe$ существенно (на несколько порядков) больше толщины пленки $HgCdTe$, градиент магнитного поля и, как следствие, магнитное давление приложены к подложке $ZnCdTe$. Можно оценить изменение параметра решетки $ZnCdTe$: $\Delta V/V = 3\Delta\alpha/\alpha = \beta T$, где $\beta = 5.0 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ — коэффициент теплового расширения [8,9]. „Температура“, отвечающая такому локальному (в пределах максимального градиента восприимчивости) увеличению постоянной решетки подложки $CdZnTe$, равна $\sim 300 \text{ K}$.

Поскольку пленка $Hg_{1-x}Cd_xTe$ напылена на подложку $ZnCdTe$, наличие градиента магнитного давления подложки, по-видимому, будет приводить к увеличению градиента ширины запрещенной зоны пленки $HgCdTe$. Внешним проявлением этих процессов будет изменение спектрального распределения оптического пропускания ТР $Hg_{1-x}Cd_xTe$.

3. Заключение

Суммируя изложенное выше и учитывая результаты нашей предыдущей работы [6], можно сделать вывод, что экспозиция ТР в однородном магнитном поле в течение

длительного времени приводит к уменьшению градиента ширины запрещенной зоны пленок $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$. Длительная экспозиция образцов HgCdTe-ZnCdTe в неоднородном магнитном поле увеличивает градиент ширины запрещенной зоны пленок $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$. Этот вывод подтвержден результатами работы [10], где показано, что при наличии градиента ширины запрещенной зоны зависимости оптического пропускания $T(\hbar\omega)$ пленок $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ сдвигаются в коротковолновую область, тогда как отсутствие градиента E_g сдвигает зависимости $T(\hbar\omega)$ в длинноволновую область.

Список литературы

- [1] M.A. Kinch. Fundamentals of infrared detector materials. SPIE Press, Bellingham (2007). V. 76. P. 173.
- [2] A. Rogalski. Infrared detectors. CRC Press (2010). 876 p.
- [3] З.Ф. Ивасив, Ф.Ф. Сизов, В.В. Тетеркин. Докл. НАН Украины 11, 92 (1999).
- [4] В.В. Тетеркин, З.Ф. Ивасив, Ф.Ф. Сизов. УФЖ 44, 9, 1128 (1999).
- [5] А.В. Бродовой, В.А. Бродовой, В.Г. Колесниченко, В.В. Скороход. УФМ 2, 265 (2001).
- [6] А.В. Бродовой, С.Г. Бунчук, З.Ф. Цибрий. ФТТ 53, 3, 524 (2011).
- [7] Я.И. Френкель. В кн.: Введение в теорию металлов. ГИФМЛ, М. (1958). С. 234.
- [8] П.И. Баранский, В.П. Клочков, И.В. Потыкевич. Полупроводниковая электроника. Справочник. Наук. думка, Киев (1975). 682 с.
- [9] Физико-химические свойства полупроводниковых веществ. Справочник / Под ред. акад. А.В. Новоселовой. Наука, М. (1978). 339 с.
- [10] З.Ф. Ивасив. Исследование влияния градиента состава и дефектов решетки на оптические, фотоэлектрические свойства и механизмы переноса заряда в твердых растворах HgCdTe и фоточувствительных структурах на их основе. Автореф. канд. дис. Киев (2000). 18 с.