

Термический отжиг эпитаксиальных пленок $\text{Cd}_{0.7}\text{Hg}_{0.3}\text{Te}$, легированных индием

Ружевич М.С. (ИТМО), Балашов В.С. (ИТМО)

Научный руководитель – доктор физико-математических наук Мынбаев К.Д. (ИТМО)

Введение. Твердые растворы теллуридов кадмия-ртути ($\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$, КРТ), — основной материал, применяемый при изготовлении приборов инфракрасной (ИК) фотоэлектроники. Малая ширина запрещенной зоны и высокие показатели подвижности носителей заряда в КРТ с $x = 0.2-0.3$ сделали его незаменимым для создания фотоприемников в среднем и дальнем ИК диапазонах. Благодаря этому технология роста эпитаксиальных пленок с малым x , в частности, методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ), была хорошо отработана, а легирование пленок и их термический отжиг подробно изучены [1]. В настоящее время растет интерес к исследованию свойств КРТ с $x \approx 0.7$, так как такой материал востребован для создания лазерных структур [2] и $n\text{Вн}$ фотоприемников [3]. Для определения качества эпитаксиальных структур, содержащих слой $\text{Cd}_{0.7}\text{Hg}_{0.3}\text{Te}$, в данный момент проводятся исследования разупорядочения твердого раствора, а также легирования донорными и акцепторными примесями, в том числе, путем термического отжига. Так, вакансия ртути в КРТ является собственным дефектом, — акцептором. Это позволяет получать КРТ p -типа вакансионным легированием, без участия внешних примесей. В настоящей работе были исследованы оптические свойства образцов КРТ с $x \approx 0.7$ после отжига для генерации вакансий ртути (инертная атмосфера, температура отжига $T_{\text{отж}} = 410$ °С, время отжига $t_{\text{отж}} = 7$ мин) и для минимизации концентрации вакансий (насыщенные пары ртути, $T_{\text{отж}} = 225$ °С, $t_{\text{отж}} = 24$ часа).

Основная часть. Исследовались эпитаксиальные пленки КРТ толщиной $d = 3$ мкм, как нелегированные, так и легированные индием (донорная примесь; концентрация электронов, по данным исследования эффекта Холла, от $\sim 10^{16}$ см⁻³ до $\sim 10^{18}$ см⁻³). Образцы были выращены на подложках (013)GaAs с буферными слоями ZnTe и CdTe, процесс роста контролировался *in situ* эллипсометрией [4]. На поверхности пленок для создания омических контактов выращивался слой чистого HgTe толщиной ~ 200 нм, который после измерения электрических свойств был удален химическим травлением. Эпитаксиальные пленки исследовались методами оптического пропускания (ОП) и отражения при $T = 300$ К. Для регистрации спектров фотолюминесценции (ФЛ) в интервале температур $T = 4.2-300$ К применялась установка на основе решеточного монохроматора МДР-23. Для минимизации внешнего воздействия применялась техника синхронного детектирования сигнала с опорной частотой 1 кГц. Сигнал ФЛ возбуждался полупроводниковым лазером с $\lambda = 1.03$ мкм и регистрировался германиевым фотодиодом.

Спектры отражения эпитаксиальных пленок со слоем HgTe на поверхности содержали характерные пики E_1 и $E_1+\Delta$, энергия которых соответствовала чистому HgTe. После травления энергия пиков на спектрах отражения соответствовала химическому составу пленок; при этом интенсивность пика E_1 была мала, а сами пики — размытыми, что свидетельствовало о разупорядочении кристаллической структуры на поверхности.

Для нелегированной эпитаксиальной пленки при исследовании ОП и ФЛ наблюдалась одиночная линия ФЛ при $T = 4.2$ К с полушириной ~ 19 мэВ, плавно возрастающей с повышением температуры; также имело место смещение края ОП и пика ФЛ в сторону больших энергий в результате отжига для генерации вакансий ртути. Такой эффект неоднократно наблюдался для спектров ФЛ и ОП нелегированных образцов КРТ разных химических составов. С увеличением концентрации индия в пленках до $\sim 10^{17}$ см⁻³ и выше, состав и поведение спектров после отжигов изменились. Так, для

сильнолегированных пленок после отжига для минимизации концентрации вакансий спектры ОП и ФЛ смещались в сторону меньших энергий относительно спектров образцов после роста на ~40–60 мэВ. В отдельных случаях для отожженных образцов наблюдалось увеличение полуширины пиков ФЛ, тогда как для нелегированных пленок после отжига полуширина ожидаемо уменьшалась. При низких температурах ($T < 50$ К) спектры ФЛ сильнолегированных пленок помимо основного содержали «примесные» пики, глубина залегания которых увеличивалась с повышением содержания индия от 10 до 18 мэВ. Отметим, что значение энергии 10 мэВ удовлетворительно согласуется с оценкой энергии ионизации водородоподобного донора в КРТ с $x \approx 0.7$ (8 мэВ).

Выводы. В работе оптическими методами исследованы эпитаксиальные пленки $\text{Cd}_{0.7}\text{Hg}_{0.3}\text{Te}$, нелегированные и легированные индием. Установлено, что сильное легирование индием приводит к возникновению примесных состояний, проявляющихся на спектрах низкотемпературной ФЛ. С увеличением концентрации примеси происходит увеличение глубины залегания уровня в запрещенной зоне; это явление, вероятно, связано с эффектом электрической компенсации индия вакансиями ртути. Большое содержание индия также изменяет реакцию эпитаксиальной пленки на термический отжиг: для нелегированных образцов он приводит к повышению качества пленки, а для сильнолегированных образцов обнаружен обратный эффект, когда в результате отжига разупорядочение возрастает. Это можно объяснить влиянием индия, занимающего в КРТ места в подрешетке ртути, на её диффузию, которая является основной движущей силой процессов перестройки дефектной структуры, протекающих во время отжига.

Список использованных источников:

1. Majkowycz K., Murawski K., Kopytko M. New insight into defect energy levels in HgCdTe // *Infrared Physics and Technology*. – 2024. – № 137. – P. 105126.
2. Rumyantsev V.V., Mazhukina K.A., Utochkin V.V., Kudryavtsev K.E., Dubinov A.A., Aleshkin V.Ya., Razova A.A., Kuritsin D.I., Fadeev M.A., Antonov A.V., Mikhailov N.N., Dvoretzky S.A., Gavrilenko V.I., Teppe F., Morozov S.V. Optically pumped stimulated emission in HgCdTe -based quantum wells: Toward continuous wave lasing in very long-wavelength infrared range // *Applied Physics Letters*. – 2024. – № 124 (16). – P. 161111.
3. Войцеховский А.В., Дзядх С.М., Горн Д.И., Михайлов Н.Н., Дворецкий С.А., Сидоров Г.Ю., Якушев М.В. Униполярные барьерные структуры на основе $n\text{-HgCdTe}$ со сверхрешётками в качестве барьера. Обзор // *Оптический журнал*. – 2024. – № 91 (2). – С. 6–22.
4. Швец В.А., Михайлов Н.Н., Икусов Д.Г., Ужаков И.Н., Дворецкий С.А. Оптика и спектроскопия // Определение профиля состава квантовых ям $\text{HgTe}/\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ методом одноволновой эллипсометрии. – 2019. – № 127 (8). – С. 318–324.