

УДК 621.315.592

Влияние низкотемпературного отжига на электрические и структурные характеристики эпитаксиальных слоев кадмий—ртуть—теллур и марганец—ртуть—теллур

И. М. Несмелова, В. Н. Рыжков, В. А. Андреев

ФГУП «НПО "Государственный институт прикладной оптики"», г. Казань, Россия

Г. Г. Гумаров, В. Ю. Петухов

Казанский физико-технический институт КНЦ РАН, г. Казань, Россия

Исследовалось влияние низкотемпературного отжига (120 °C в течение 2 ч, затем 200 °C в течение 2 ч) на параметры эпитаксиальных слоев кадмий—ртуть—теллур (CdHgTe) и марганец—ртуть—теллур (MnHgTe), полученных методом жидкофазной эпитаксии. Измерялись эффект Холла, электропроводность и дефектограммы до и после отжига образцов. Показано, что слои MnHgTe практически не изменили электрические параметры, а около 90 % слоев CdHgTe или увеличили концентрацию носителей заряда, или изменили тип проводимости. Обнаружено улучшение кристаллического качества слоев MnHgTe после отжига. Образцы CdHgTe не имели такой тенденции.

В настоящее время для регистрации ИК-излучения используются многие типы устройств, среди которых ведущее место занимают фотоприемники на основе тройных твердых растворов теллурида кадмия-теллурида ртути (КРТ). Однако данный материал имеет слабую химическую связь Hg—Te, которая обуславливает наличие большого числа собственных дефектов, влияющих на свойства материала. Материал отличается низкой однородностью по составу, термической нестабильностью и как результат большой невоспроизводимостью основных параметров. Это приводит к весьма низкому проценту выхода годного материала и, соответственно, к высокой его стоимости.

В последнее десятилетие внимание исследователей привлекают альтернативные КРТ-материалы. Одним из них является твердый раствор теллурида марганца-теллурида ртути (МРТ). Экспериментальные и теоретические исследования показали, что наличие в решетке твердого раствора МРТ ионов Mn приводит к увеличению доли ионности Hg—Te-связи, так что можно ожидать более высоких значений энергии активации образования дефектов и более совершенной структуры в МРТ по сравнению с твердым раствором КРТ [1—4]. Необходимо также отметить, что наличие в кристаллической решетке МРТ магнитного материала, марганца дает возможность исследователям расширить диагностические методики материала, привлекая магнитные методы, в частности, методы магнитной радиоспектроскопии.

Постановка задачи

Известно, что ряд технологических операций при изготовлении элементов оптоэлектроники,

таких как фотолитография, ионное травление поверхности материалов, создание электрических контактов, нанесение антиотражающего оптического покрытия, проводится при повышенных температурах. Тепловое воздействие может привести к изменению электрофизических параметров исходного материала и оказать влияние на выходные параметры фотоприемников излучения. В первую очередь эти изменения могут наблюдаться (и наблюдаются) на элементах, изготовленных из твердых растворов КРТ, химически нестабильном материале. Есть основания предположить, что в материале МРТ, содержащем ионы марганца, температурные воздействия скажутся в меньшей степени или совсем не будут заметны. Изучение влияния температурных воздействий при проведении технологических операций на свойства эпитаксиальных слоев твердых растворов КРТ и МРТ позволит провести сравнительные исследования и определить предельные температуры при проведении технологических процессов для КРТ и МРТ. В результате проведения данной работы могут быть сделаны предложения о целесообразности замены материала КРТ альтернативным материалом МРТ для создания ряда элементов оптоэлектроники.

В последние годы в печати появились работы по изучению термической стабильности фотоприемных ячеек и матриц на основе слоев КРТ, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии [5—8]. В работе [5] рассматривается термическая стабильность фотодиодных структур на основе гетероэпитаксиальных слоев КРТ, а в [6, 7] — устойчивость к многократным термоциклированиям гибридных матричных моделей на основе ионно-имплантированных слоев КРТ. Авторы сборника [8] замечают, что

работа с элементами из КРТ требует осторожности, этот материал имеет пониженную стойкость к механическим воздействиям, изменяет свои свойства при нагреве, происходит деградация *p-n*-перехода [8]. К сожалению, авторы перечисленных выше работ исследовали фотодиодные структуры или гибридные матричные модули. Представляет интерес исследовать влияние температурных воздействий на исходные образцы при проведении технологических операций по созданию структур матричных модулей.

Цель данной работы — исследование влияния низкотемпературных отжига на электрофизические и структурные свойства эпитаксиальных слоев твердых растворов КРТ и МРТ и сопоставление полученных результатов.

Получение образцов КРТ и МРТ

Исследования проводились на эпитаксиальных слоях КРТ и МРТ, полученных методом жидкофазной эпитаксии из теллурических растворов-расплавов. Выращенные слои имели проводимость *p*-типа, концентрации дырок порядка 10^{17} см^{-3} и подвижность $(2-5) \cdot 10^2 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ при 77 К. Для снижения концентрации дырок и получения материала с электронной проводимостью выращенные слои подвергались длительному отжигу в парах ртути. Применялся переменный изотермический режим отжига при температурах $\sim (510-320)^\circ\text{C}$ продолжительностью 2–3 недели. В результате были получены образцы с концентрацией дырок $(10^{15}-10^{16}) \text{ см}^{-3}$ и образцы *n*-типа с концентрацией электронов порядка или даже ниже 10^{15} см^{-3} и подвижностью $\mu_n = (10^4-10^5) \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ при 77 К.

Методика измерения электрических параметров и кристаллической структуры образцов

Электрические параметры образцов определялись из измерений коэффициента Холла и электропроводности при температурах 300 и 77 К и двух значениях индукции магнитного поля: 0,05 и 1,5 Тл. Тип проводимости образцов определялся по величине отношения коэффициента Холла, измеренного в магнитном поле индукцией 0,05 Тл к значению коэффициента Холла в поле 1,5 Тл при 77 К. Измерения проводились 4-зондовым методом.

Изучение кристаллической структуры и фазового состава образцов проводилось на установке ДРОН-3М. Использовалось излучение Cu K_α с LiF монохроматором при напряжении на рентгеновской трубке 30 кВ и токе 15 мА. Для выяснения степени структурного совершенства эпитаксиальных пленок снимались азимутальные зависимости интенсивности выбранных дифракционных пиков.

Низкотемпературный отжиг эпитаксиальных слоев КРТ и МРТ. Электрические параметры и кристаллическая структура образцов

Для проведения экспериментов было отобрано несколько пар эпитаксиальных слоев КРТ—МРТ *n*- и *p*-типа проводимости со значениями концентраций носителей заряда $\sim (5 \cdot 10^{15}-10^{16}) \text{ см}^{-3}$ и различного состава (*x*). Образцы "освежались" в полирующем травителе. Оптическим методом по спектрам поглощения определялся их состав, затем к образцам индием припаивались четыре контакта. Электрические параметры образцов измерялись до и после проведения каждого режима отжига.

Низкотемпературный отжиг образцов осуществляли последовательно в следующих режимах:

- температура 120°C , время отжига 2 ч;
- температура 200°C , время отжига 2 ч.

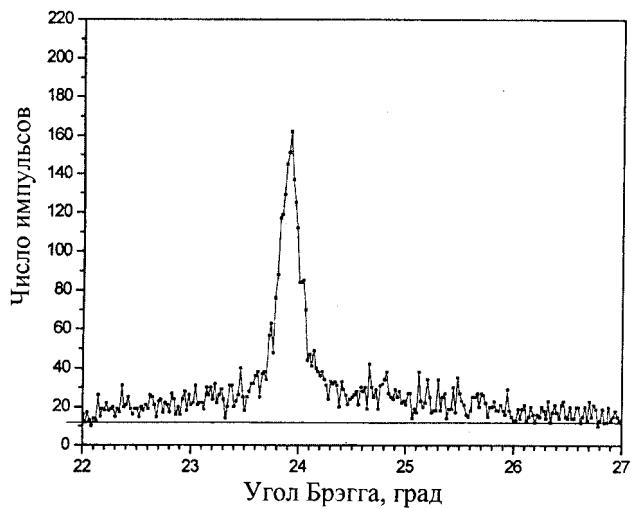
Отжиг образцов проводился в муфельных печах, которые предварительно нагревались до заданной температуры. Перед отжигом с образцов снимались контакты путем травления в перекиси водорода. После каждого режима отжига к слоям припаивались контакты, проводились измерения электрических параметров и определялись: концентрация носителей заряда, электропроводность, подвижность носителей заряда, тип проводимости.

Из проведенного анализа полученных данных следует, что:

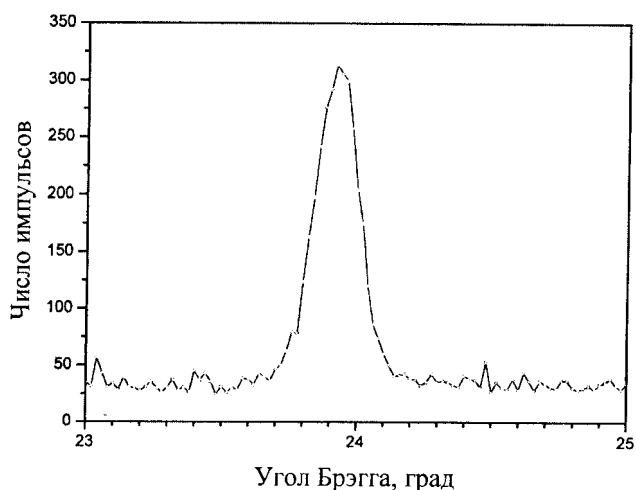
- в эпитаксиальных слоях КРТ уже после отжига при 120°C почти у 90 % образцов увеличилась концентрация и снизилась подвижность носителей заряда. Режим отжига при 200°C привел к дальнейшему изменению параметров образцов, а в некоторых образцах наблюдалось изменение типа проводимости;
- эпитаксиальные слои МРТ после отжига при 120°C не изменили электрических параметров, и только после отжига при 200°C лишь у ~10 % образцов незначительно изменились в основном значения подвижностей носителей заряда, что, вероятно, обусловлено изменением механизма рассеяния носителей заряда.

Рентгеноструктурные исследования образцов МРТ и КРТ показали, что до отжига образцы однофазны. При этом основной кристаллической фазой в обоих случаях является теллурид ртути. Термическое воздействие приводит к существенным изменениям в дифракционных спектрах, причем характер изменений различен для образцов МРТ и КРТ. В случае образцов КРТ происходит заметное ослабление дифракционных линий. Для образцов МРТ наблюдается противоположная тенденция — отжиг приводит к усилению и заметному сужению дифракционных

ных линий. В частности, для дифракционной линии, наблюдаемой при угле $2\theta = 23,92^\circ$, ширина линии уменьшается от 0,26 до 0,21° (рис. 1). Кроме того, происходит заметное уменьшение диффузного фона, наблюдаемого на спектре МРТ до отжига (см. рис. 1, а). Как уменьшение ширины линии, так и ослабление диффузного фона указывает на уменьшение степени дефектности образцов МРТ в результате теплового воздействия.



а



б

Рис. 1. Дифрактограмма образца МРТ:

а — до термического отжига; б — после термического отжига при 200 °С в течение 2 ч

Азимутальные кривые для указанного выше пика также различаются для образцов до и после отжига (рис. 2) — максимумы становятся более интенсивными и выраженными. Исходя из этого можно сделать вывод о заметном повышении степени структурного совершенства исследуемых образцов МРТ. Можно отметить, что состав образцов после термической обработки остается постоянным, поскольку положение дифракционных линий не меняется.

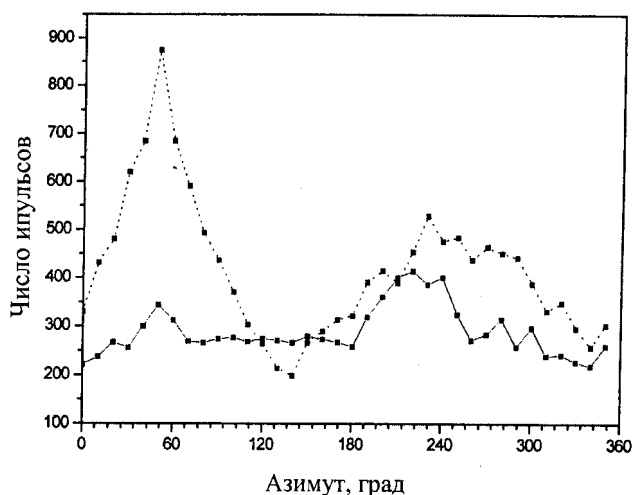


Рис. 2. Азимутальная зависимость интенсивности дифракционной линии, наблюдаемой при угле $2\theta = 23,92^\circ$ от плоскости (111) для образца МРТ:

— ■ — до отжига; - - ■ - - после отжига

Выводы

На основании экспериментов по низкотемпературному отжигу, проведенных на эпитаксиальных слоях КРТ и МРТ, можно сделать следующий вывод: эпитаксиальные слои МРТ при температурах до 200 °С обладают большей стабильностью электрофизических параметров по сравнению со слоями КРТ; после отжига улучшается кристаллическое качество образцов МРТ. Таким образом, можно ожидать, что при проведении технологических операций по изготовлению элементов оптоэлектроники на основе тройных твердых растворов теллурида марганца—теллурида ртути могут быть получены приборы с более стабильными и воспроизводимыми характеристиками.

Наше предприятие в течение нескольких десятилетий занималось разработкой технологии получения и исследованием свойств монокристаллов и эпитаксиальных слоев КРТ и МРТ. Результаты этих работ отражены в многочисленных публикациях в российских научно-технических журналах, а также в диссертациях сотрудников. На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы по материалам КРТ и МРТ:

- твердые растворы МРТ более технологичны по сравнению с твердыми растворами КРТ;
- образцы твердых растворов МРТ обладают большей однородностью по составу по сравнению с твердыми растворами КРТ;
- практически каждый из полученных образцов МРТ обладал фоточувствительностью, что многократно было проверено созданием барьеров Шоттки в целях определения состава образцов и распределения его вдоль поверхности образца;

- методом ионной имплантации ионов бора в *p*-МРТ или серебра в *n*-МРТ были получены *p-n*-переходы со значительно большим процентом выхода, чем на образцах КРТ;

- низкотемпературный отжиг (≤ 200 °C) практически не изменил электрофизических параметров эпитаксиальных слоев МРТ, что в первую очередь говорит о большей стабильности свойств материала по сравнению с твердым раствором КРТ;

- исследование в МРТ спектров ЭПР дает возможность расширить диагностические методики материала.

Исследования рекомбинационных процессов, проведенных в тройных твердых растворах МРТ, показали, что они имеют много общего с хорошо изученными фотоэлектрическими свойствами твердых растворов КРТ [9]. Это дает основание надеяться на получение фотоэлементов из МРТ с высокими фоточувствительными параметрами, подобными тем, которые в настоящее время достигнуты в КРТ, но с более стабильными во времени характеристиками. Также можно

ожидать увеличения процента выхода элементов оптоэлектроники.

Л и т е р а т у р а

1. Rogalski A.// Infrared Phys. 1991. V. 31. № 2. P. 117.
2. Гарбуз Н. Г., Кондраков С. В., Попов С. А., Сусов Е. В., Филатов А. В., Хазиева Р. А., Холина Е. Н.// Неорг. мат. 1990. Т. 26. № 3. С. 536.
3. Wall A., Caprile C., Franciosi A., Reifengerger R., Deliska U.// J. Vac. Sci. and Technol. 1986. V. 4. № 3. P. 818.
4. Боднарчук О. А., Горбатюк И. Н., Каленик В. И., Пустыльник О. Д., Раренко И. М., Шафранюк В. П.// Неорг. мат. 1992. Т. 28. № 2. С. 335.
5. Васильев В. В., Овсяк Н. В., Талипов Н. Х. Тезисы доклада. Совещание "Актуальные проблемы полупроводниковой фотоэлектроники". — Новосибирск. 2003. С. 65.
6. Гусев А. А., Базовкин В. М., Ефимов В. М., Курьшев Г. Л., Панова З. В.// Там же. С. 91.
7. Ефимов В. М.// Там же. С. 90.
8. Сб. "Матричные фотоприемные устройства инфракрасного диапазона"// Отв. ред. д-р. физ.-мат. наук С. П. Сивина. — Новосибирск: Наука, 2001.
9. Барышев Н. С. Свойства и применение узкозонных полупроводников. — Казань: Унипресс, 2000.

Статья поступила в редакцию 23 ноября 2004 г.

The effect of low-temperature annealing on electrical and structural properties of the MCT and MMT epitaxial layers

I. M. Nesmelova, V. N. Ryzhkov, V. A. Andreev

Federal State Unitary NPO State Institute of Applied Optics, Kazan, Russia

G. G. Gumarov, V. Yu. Petukhov

Physicotechnical Institute Russian Academy of Sciences, Kazan, Russia

The effect of low-temperature annealing (2 hours at 120 °C and 2 hours at 200 °C) on epitaxial layers of HgCdTe and HgMnTe was investigated. HgCdTe and HgMnTe layers were produced by the liquid-phase epitaxy method. The Hall effect, electroconductivity, X-ray diffraction before and after annealing were determined. It was shown that low-temperature annealing produces almost no change in electrophysical parameters of HgMnTe layers; but about 90 % of HgCdTe layers had increased concentration of charge carriers or changed conductivity type. After thermal annealing the crystal surface quality of the HgMnTe layers improved. The layers HgCdTe such tendency not observe.

УДК 621.315.592

Процесс токопереноса в структурах на основе GaN с одной квантовой ямой

Н. С. Грушко, Л. Н. Потанахина

Ульяновский государственный университет, г. Ульяновск, Россия

Исследованы вольт-амперные характеристики светодиодов синего свечения с одиночной квантовой ямой в многослойных структурах на основе GaN и его твердых растворов в диапазоне температур 98—297 К. Показано, что в образцах преобладает туннельный механизм протекания тока и определены его параметры (вероятность туннелирования, энергия уровней, участвующих в создании рекомбинационного пото-