

©1994

## ВЛИЯНИЕ ТЕРМОЦИКЛИРОВАНИЯ НА ИК-СПЕКТРЫ ОТРАЖЕНИЯ МОНОКРИСТАЛЛОВ АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ

Э.Н.Метоледи, Я.Д.Стародубов, Г.П.Ковтун

Исследовано влияние термоциклирования на ИК-спектры отражения монокристаллических образцов электронно-проводящего GaAs ориентаций [100], [110] и [111] в области  $400-4200 \text{ см}^{-1}$ . Показано, что абсолютная величина отражения зависит от ориентации и числа циклов термоциклирования монокристаллов и определяется в основном изменением релаксационной и плазменной частот. Определены значения концентрации носителей заряда  $N$  для исходных и термоциклированных образцов. Показано, что термоциклирование приводит к увеличению  $N$  в приповерхностном слое исследуемых образцов GaAs.

На настоящем этапе развития электрофизических исследований полупроводниковых соединений, в том числе GaAs, большое внимание уделяется изучению оптических свойств в широком интервале частот, что позволяет получить сведения об энергетическом спектре, в частности о характере и величине запрещенной зоны, об основных параметрах носителей заряда, о фоновом спектре вещества и т.д. [1,2].

С точки зрения определения основных параметров носителей заряда особый интерес представляет исследование ИК-спектров отражения. Данный метод важен для приложений в тех случаях, когда необходимо получить информацию о состоянии носителей заряда в поверхностном слое полупроводника [2].

Возникновение подобных задач, в частности, для GaAs обусловлено тем, что практическое использование его преимуществ по сравнению с Ge и Si часто становится проблематичным, особенно в тех случаях, когда этот полупроводник должен работать в приборах, основанных на поверхностных эффектах. Существо проблемы состоит в том, что вблизи поверхности GaAs обычно имеется слой, обедненный основными носителями [3].

В настоящее время существует ряд методов воздействия на полупроводниковые материалы [4,5], в частности термообработка, которая может существенно изменять электрофизические параметры вплоть до изменения типа проводимости [6]. Однако влияние различных режимов воздействия на характеристики носителей тока приповерхностного слоя полупроводниковых материалов, в том числе GaAs, практически не изучено.

Целью данной работы является изучение влияния термоциклирования на ИК-спектры отражения монокристаллов арсенида галлия разной ориентации.

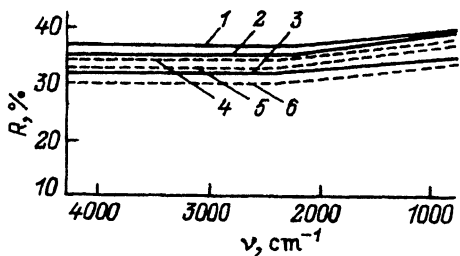


Рис. 1. Спектры отражения образцов GaAs с ориентациями [100], [110] и [111] в области  $\nu = 4200 \div 800 \text{ cm}^{-1}$  в исходном состоянии (1-3) и после 7 циклов термоциклирования (4-6).

Исследовались образцы электронно-проводящего GaAs марки АГЧПХ трех ориентаций [100], [110], [111] с исходной плотностью дислокаций  $5 \cdot 10^4 \text{ cm}^{-2}$  и удельным электросопротивлением  $10^6 \Omega \cdot \text{cm}$ .

Измерения спектра отражения исходных и термоциклированных образцов в области  $4200-400 \text{ cm}^{-1}$  осуществлялось при комнатной температуре на инфракрасном спектрофотометре ИКС-29 с использованием приставки ИПО-22. Погрешность при измерении спектров отражения не превышала 1%.

Термоциклирование образцов осуществлялось в специальной печи в ампулах из плавленого кварца в вакууме  $4 \cdot 10^{-3} \text{ Pa}$ . Цикл нагрев-охлаждение осуществлялся в температурном интервале 77–473 К. Количество циклов менялось от 1 до 7. Скорость нагрева и охлаждения составляла  $10 \text{ deg/min}$ .

Оптическим измерениям подвергались образцы с плоской зеркальной поверхностью. Качество состояния поверхности контролировали на интерферометре МИИ-4 как в исходных образцах, так и в термоциклированных.

На рис. 1 приведены спектры отражения  $R$  в области  $\nu = 4200 \div 800 \text{ cm}^{-1}$  образцов GaAs трех ориентаций до и после термоциклирования (7 циклов). Изменение параметра  $R$  в зависимости от числа циклов приведено в таблице на примере образцов GaAs с ориентацией [100]. Видно, что абсолютная величина отражения  $R$  исходных образцов зависит от их ориентации. Наибольшее значение  $R$  наблюдается в образцах с ориентацией [100], а наименьшее — в образцах с ориентациями [111].

Термоциклирование, начиная после третьего цикла, приводит к снижению значения  $R$  во всем исследуемом диапазоне спектра для образцов всех исследуемых ориентаций. По мере увеличения числа циклов

Значения  $R$  при  $\nu = 3000 \text{ cm}^{-1}$ ,  $R_{\min}$  и  $\nu_{\min}$  для образцов GaAs ориентации [100] при изменении числа циклов от 1 до 7

Количество циклов	$R, \%$	$R_{\min}, \%$	$\nu_{\min}, \text{cm}^{-1}$
0	38	22	520
1	38	22	520
2	38	22	520
3	37	23	520
4	36	25	525
5	36	25	525
6	35	27	530
7	34	28	530

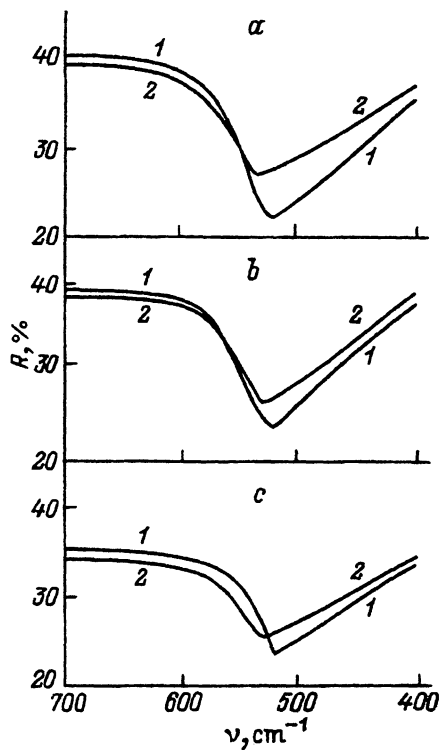


Рис. 2. Спектры отражения исходных (1) и термоциклированных (2) образцов GaAs различной ориентации в области плазменного резонанса. а — [100], б — [110], с — [111].

от 3 до 7 различие в значениях  $R$  исходных и термоциклированных образцов увеличивается и при 7 циклах достигает  $\sim 4\%$ .

При исследовании спектров отражения в области  $700\text{--}400\text{ см}^{-1}$  нами обнаружена немонотонная зависимость отражения  $R$  с минимумом при  $\nu_{\min} = 520\text{ см}^{-1}$  (рис. 2), обычно наблюдаемая в легированных образцах GaAs с большой концентрацией носителей заряда и обусловленная плазменным резонансом [1]. Термоциклирование приводит к смещению минимума отражения в высокочастотную область, причем с увеличением числа циклов, начиная после третьего, величина обнаруженного смещения увеличивается. Рис. 2 иллюстрирует спектры отражения исходных образцов после 7 циклов термоциклирования. Глубина минимума плазменного резонанса также меняется, уменьшаясь в термоциклированных образцах с ростом числа циклов, о чем свидетельствует рост значения отражения  $R_{\min}$  при  $\nu_{\min}$  (см. таблицу). В таблице в качестве примера приведены значения  $R$  для  $\nu = 3000\text{ см}^{-1}$ ,  $R_{\min}$  и  $\nu_{\min}$  для исходных и термоциклированных образцов GaAs с ориентацией [100] при изменении числа циклов от 1 до 7. Таким образом, полученные экспериментальные результаты показывают зависимость положения и глубины минимума плазменного резонанса ( $\nu_{\min}$  и  $R_{\min}$ ), а также величины абсолютного отражения  $R$  во всем исследуемом диапазоне спектра от числа циклов термоциклирования. Кроме того,  $R$  и  $R_{\min}$  зависят от ориентации исходных образцов.

Частотная зависимость оптических свойств в исследуемой области инфракрасного спектра для полупроводниковых материалов в основном определяется релаксационной и плазменной частотами [1].

Наблюдаемое при термоциклировании снижение абсолютной величины отражения в области спектра между краем основного поглощения  $\nu_g$  и минимумом плазменного резонанса  $\nu_{\min}$  в основном объясняется увеличением частоты релаксации, т.е. уменьшением времени релаксации свободных носителей заряда. Поскольку время релаксации учитывает рассеяние энергии носителей при их взаимодействии с нарушениями идеальности кристаллической решетки [1,2,7], то уменьшение величины  $R$  в данном случае сути характеризует увеличение концентрации дефектов кристаллической решетки, обусловленное созданием больших полей внутренних напряжений при термоциклировании.

Исходя из существующих представлений о зависимости уровня отражения в исследуемой области спектра от частоты релаксации, можно предположить, что различия значений  $R$  в исходных образцах также связаны с различным временем релаксации свободных носителей вдоль исследуемых кристаллографических направлений.

Положение минимума плазменного резонанса в спектре отражения  $\nu_{\min}$  и его глубина  $R_{\min}$  определяются концентрацией электронов проводимости  $N$ , их подвижностью  $U$  и эффективной массой носителей заряда  $m^*$  [1,2].

Как правило, смещение  $\nu_{\min}$  в высокочастотную область обусловлено ростом концентрации электронов проводимости, что наглядно демонстрируется номограммой, полученной из экспериментальных значений  $\nu_{\min}$  для образцов с известными  $N$  (рис. 3) [1]. Используя данные номограммы, приведенной в [1], и полученные нами экспериментальные значения  $\nu_{\min}$ , мы определили концентрацию электронов проводимости исследуемых образцов в исходном состоянии и после термоциклирования. Согласно полученным результатам,  $N = 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  для исходных образцов и  $N = 2.3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  для термоциклированных.

Отмеченное увеличение концентрации носителей заряда, вероятно, обусловлено уменьшением величины запрещенной зоны  $E_g$  при термоциклировании, которое наблюдалось нами в предыдущих исследованиях при измерении спектров поглощения образцов GaAs в области края фундаментальной полосы [8]. Изменение величины  $E_g$ , по-видимому, связано с изменением структуры хвоста плотности состояний за счет образования дополнительных энергетических уровней в запрещенной зоне кристалла при увеличении концентрации дефектов [9,10]. Умень-

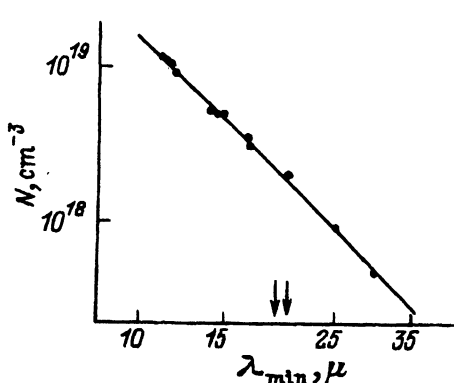


Рис. 3. Зависимость концентрации носителей тока электроно-проводящего GaAs от положения минимума плазменного резонанса [1].

Стрелками отмечено положение минимумов в исходных образцах и после 7 циклов термоциклирования, полученных в настоящем исследовании.

шение величины  $E_g$  при термоциклировании дает возможность большому количеству электронов под действием электромагнитного излучения совершать переход из валентной зоны в зону проводимости и тем самым увеличивать концентрацию носителей тока.

Отметим следующее. Поскольку значения  $m^*$ , полученные для образцов с различными концентрациями примесей и свободных носителей, оказались слабо зависящими от типа примесей [1] и заметные изменения  $m^*$  на  $0.010-0.009m$  отмечались лишь в случае изменения  $N$  на порядок и более [2], то можно предположить, что в нашем случае при изменении значений  $N$  на  $\sim 30\%$  величина  $m^*$  существенно не изменится и решающего значения в изменении величин  $R_{\min}$  и  $\nu_{\min}$  иметь не будет.

Известно, что тенденция к уменьшению глубины минимума плазменного резонанса (т.е. к росту значения  $R_{\min}$ ) обусловлена в основном снижением подвижности носителей заряда  $U$  [1]. Снижение подвижности при термоциклировании может быть также обусловлено увеличением концентрации дефектов кристаллической решетки и, следовательно, увеличением частоты релаксации, что подтверждается уменьшением абсолютной величины отражения  $R$  в диапазоне спектра между  $\nu_g$  и  $\nu_{\min}$ .

Таким образом, можно сделать вывод о том, что термоциклирование образцов электронно-проводящего арсенида галлия приводит к увеличению концентрации носителей заряда, при этом уменьшая их подвижность. Учитывая одновременное увеличение  $N$  и уменьшение  $U$ , а также существующую зависимость  $R_{\min} \propto m^*/N \cdot U$ , можно заключить, что увеличение  $R_{\min}$  в термоциклированных образцах при существенно не меняющейся  $m^*$  возможно лишь в случае, когда увеличение концентрации носителей  $N$  происходит в меньшей мере, чем снижение их подвижности  $U$ .

#### Список литературы

- [1] Уханов Ю.И., Оптические свойства полупроводников. М., 1977. С. 147-149, 164-174, 244-264, 297-338.
- [2] Фэн Х. // Сб. «Оптические свойства полупроводников» / Под ред. Р.Уиллардсона и А.Бирра. М., 1970. С. 385-400.
- [3] Дмитрук Н.Л., Ляшенко В.И. // Сб. «Арсенид галлия». Томск, 1970. В. 3. С. 113-125.
- [4] Гиндин И.А., Чиркина Л.А., Метолити Э.Н. Оптические свойства и дефектная структура кристаллических тел. Обзор. М., ЦНИИАтоминформ, 1989. 28 с.
- [5] Шевякова Э.П., Березняк Е.П., Рекова Л.П., Рыбка А.В., Клюкович В.А. // Вопросы атомной науки и техники. Серия: физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. 1992. В. 1(58), 2(59). С. 30-32.
- [6] Кривов М.А., Мелисова Е.В., Борзак И.Д. // Сб. «Арсенид галлия». Томск, 1968. С. 70-77.
- [7] Грачев А.И. // Сверхпроводимость. 1990. Т. 3. № 11. С. 2516-2522.
- [8] Метолити Э.Н., Стародубов Я.Д., Ковтун Г.П. // ФТТ. 1993. Т. 35. № 2. С. 404-407.
- [9] Лифшиц И.М., Пушкарев Х.И. // Письма в ЖЭТФ. 1970. Т. 11. № 9. С. 456-460.
- [10] Канер Э.А., Фельдман Э.П. // ЖЭТФ. 1971. Т. 61. № 1(7). С. 419-432.

Харьковский физико-технический институт

Поступило в Редакцию  
4 января 1994 г.