

Таким образом, по результатам данной работы можно утверждать, что пьезоэлектрический кристалл $LiNbO_3$ является эффективным радиатором для преобразования энергии электронов в энергию излученных фотонов и может быть применен для исследования воздействия акустических волн на характеристики излучения каналированных заряженных частиц.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Каплин В.В., Плотников С.В., Воробьев С.А. // ЖТФ. 1980. Т. 50. № 5. С. 1079–1081.
- [2] Мкртчян А.Р., Гаспарян Р.А., Габриелян Р.Г. // ЖЭТФ. 1987. Т. 93. С. 432–436.
- [3] Авакян Р.О. и др. Препринт ЕФИ-779(6)-85, Ереван, 1985. 12 с.
- [4] Авакян Р.О. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1988. Т. 48. В. 11. С. 577–580.

Поступило в Редакцию
2 июня 1989 г.
Вокончательной редакции
20 января 1990 г.

Письма в ЖТФ, том 16, вып. 9 12 мая 1990 г.

06.2; 07; 12

© 1990

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СОСТАВА В $AlGaAs$ ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ С КВАНТОВОРАЗМЕРНЫМИ СЛОЯМИ МЕТОДОМ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА

В.М. Андреев, В.Р. Ларионов,
А.М. Минтаиров, Т.А. Пруцких,
В.Д. Румянцев, К.Е. Смекалин,
В.П. Хвостиков

Полупроводниковые гетероструктуры (ГС) с ультратонкими (50–500 Å) слоями являются в настоящее время основой для создания целого класса приборов полупроводниковой опто- и микроэлектроники: полупроводниковых гетеролазеров, коротковолновых фотоприемников, транзисторов с высокой подвижностью электронов и т.п.

[1]. При разработке и совершенствовании технологии создания таких ГС возникает проблема контроля электрофизических параметров ультратонких слоев. Весьма перспективным для решения этой про-

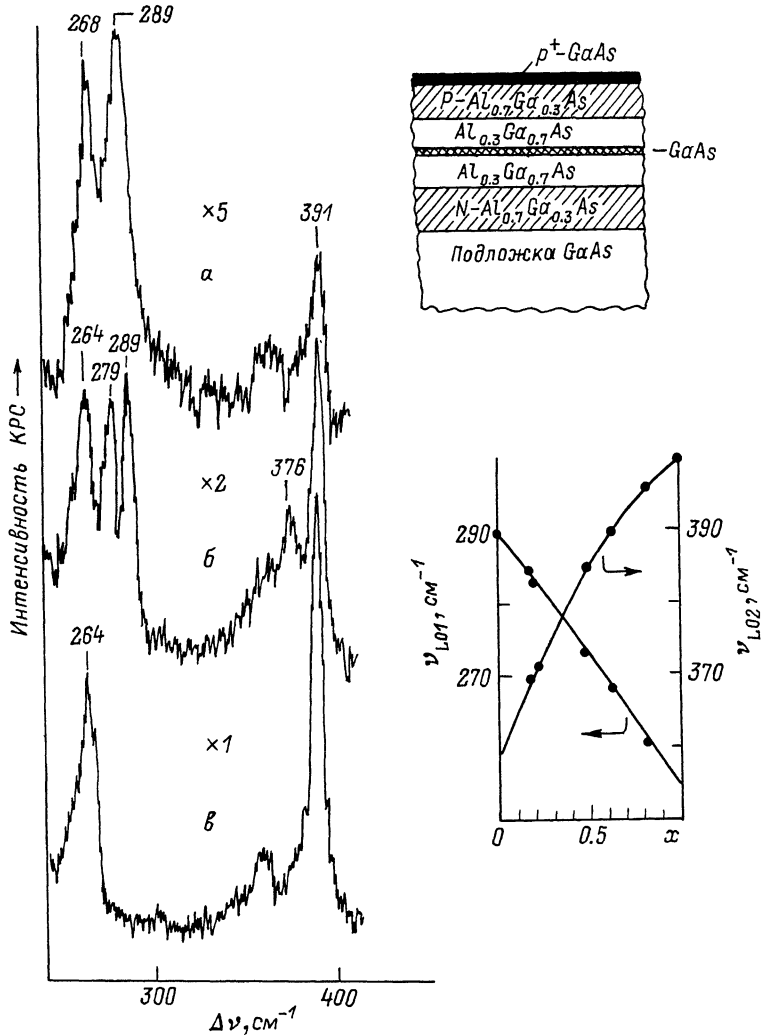


Рис. 1. Спектры КР, полученные при различных глубинах проникновения окисла D , мкм: а - 0, б - 1.13 и в - 1.30. Вставка сверху: схема расположения слоев исследуемой ГС инжекционного лазера. Вставка внизу: зависимость частот LO фононов $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ от состава x . Точки - данные эксперимента; сплошные кривые - расчет в модели [6].

блемы является метод, основанный на анализе спектров комбинационного рассеяния (КР) света, который характеризуется высокой чувствительностью и универсальностью и позволяет получать информацию о слоях ГС толщиной в десятки ангстрем [2, 3].

В настоящей работе приводятся результаты исследования возможности использования метода КР для измерения профиля распределения $AlAs$ по толщине многослойных $AlGaAs$ гетероструктур с ультратонкими слоями на примере ГС инжекционных лазеров.

Исследовалась лазерная ГС с отдельным оптическим и электронным ограничением, схематически изображенная на верхней вставке рис. 1. Структура была выращена методом низкотемпературной ЖФЭ [4] на n^+GaAs подложке с ориентацией $\langle 100 \rangle$ и содержала буферный слой (на рис. 1 объединен с подложкой), слой широкозонного эмиттера $n-AlGaAs$, два нелегированных волноводных слоя $AlGaAs$, окружающих квантоворазмерную активную область $GaAs$, второй широкозонный эмиттер $p-AlGaAs$ и контактный слой p^+GaAs . Образцы лазеров с контактами, изготовленные из данной структуры, в режиме генерации излучали на длине волны 830 нм при плотности порогового тока 360 А/см^2 ($T = 300 \text{ К}$).

Методика измерения профиля распределения $AlAs$ по толщине ГС состояла в ступенчатом анодном окислении образца и анализе спектров КР, содержащих сигналы от различных слоев. Анодное окисление проводилось в водном растворе лимонной кислоты, аммиака и этиленгликоля. Глубина проникновения окисла в слой $AlGaAs$ прямо пропорциональна величине приложенного анодного напряжения, а приращение глубины составляет по данным профилометрических измерений $13.6 \pm 0.8 \text{ \AA/V}$ и не зависит от доли $AlAs$. Образец послойно окислялся до глубины примерно 0.15 мкм, затем окисел стравливался в смеси изопропилового спирта и ортофосфорной кислоты и проводился новый цикл окисления. Площадь окисляемого участка на поверхности образца составляла $3-4 \text{ мм}^2$.

Спектры КР снимались на двойном монохроматоре ДФС-52 в 90° градусной геометрии рассеяния в поляризации $z(xy)\bar{z}$, где $x - [010]$, $y - [001]$, $z - [100]$; при возбуждении Ar^+ -лазерами на длине волны 5145 \AA и мощностью 150 мВт. Луч лазера был сфокусирован на образце до диаметра 50 мкм. Спектры снимались в диапазоне $200-420 \text{ см}^{-1}$ с шагом 0.5 см^{-1} при ширине щели монохроматоров 3 см^{-1} . Согласно правилам отбора [5], при выбранной геометрии рассеяния для соединений со структурой цинковой обманки в спектрах КР разрешены только линии рассеяния на продольных оптических (LO) фононах.

Для определения доли $AlAs$ в слоях ГС использовалась зависимость частот двух фононов $LO_1(\Gamma)$ и $LO_2(\Gamma)$ $Al_xGa_{1-x}As$ от x [3]. Результаты измерений частот LO-фононов, выполненных на калибровочных образцах, и расчетов, выполненных в теоретической модели [6], приведены на нижней вставке рис. 1. Как видно из рисунка, при увеличении содержания $AlAs$ в диапазоне $x=0-1$

частота $LO_1(\Gamma)$ -фонона монотонно уменьшается от 290 до 254 $см^{-1}$ тогда как частота $LO_2(\Gamma)$ -фонона монотонно увеличивается от 360 до 400 $см^{-1}$. Среднее изменение частот составляет 40 $см^{-1}$. Считая, что точность измерения положения максимумов линий в спектре КР составляет половину ширины аппаратной функции спектрометра и учитывая, что используются две линии фононов, получил для точности определения содержания $AlAs$ величину ± 2 мол. %.

Анализировалась зависимость частоты и интенсивности линий LO -фононов в спектрах КР от глубины проникновения окисла при последовательном переводе в окисел всех слоев ГС. До окисления (рис. 1,а) в спектре наблюдаются линии, соответствующие сильнолегированному поверхностному контактному слою p^+GaAs - 268 и 289 $см^{-1}$ [7]. Остальные слои ГС в этом случае, кроме ближайшего к поверхности второго широкозонного эмиттера (слабая линия 391 $см^{-1}$), не наблюдаются из-за сильного поглощения возбуждающего излучения в контактном слое. По мере окисления в спектре начинают проявляться линии, соответствующие более глуболежащим слоям. Когда граница окисла достигает активной области (рис. 1,б), удается наблюдать линии сразу трех слоев: активной области (289 $см^{-1}$), первого (со стороны подложки) волноводного слоя (279 и 376 $см^{-1}$) и первого широкозонного эмиттера. При этом линии $LO_1(\Gamma)$ -фононов всех трех слоев, включая и квантоворазмерную активную область толщиной 200 \AA , хорошо разрешены и имеют достаточную для регистрации интенсивность. Конечный спектр КР, соответствующий случаю, когда окислены все слои, кроме первого широкозонного эмиттера, приведен на рис. 1, в и содержит только линии LO -фононов $Al_{0.7}Ga_{0.3}As$ (264 и 391 $см^{-1}$).

Для восстановления информации об исходных толщинах слоев ГС была построена зависимость относительных интенсивностей линий фононов различных слоев от глубины проникновения окисла, которая приведена на рис. 2,а. Здесь верхние и нижние границы слоев фиксируются, когда интенсивность соответствующих линий (кривые 1-6) выходит на максимальное и нулевое значения. Например, для контактного слоя интенсивность линий (кривая 1) максимальна до начала процесса окисления и принимает нулевое значение при глубине проникновения окисла 0.3 мкм, равной толщине этого слоя. При этом интенсивность линий следующего слоя - второго эмиттера (кривая 2) проходит через максимум и т.д. Точность определения глубины залегания границ слоев определяется шагом увеличения глубины проникновения окисла и ограничена минимальной толщиной, при которой может быть зарегистрирован сигнал КР. Для используемых экспериментальных условий предельная точность составляет 40 \AA . Для квантоворазмерной активной области было получено значение толщины $200 \pm 20 \text{\AA}$. Остальные слои имели следующие толщины: второй эмиттер - 0.7 мкм, слой волновода по 0.05 мкм.

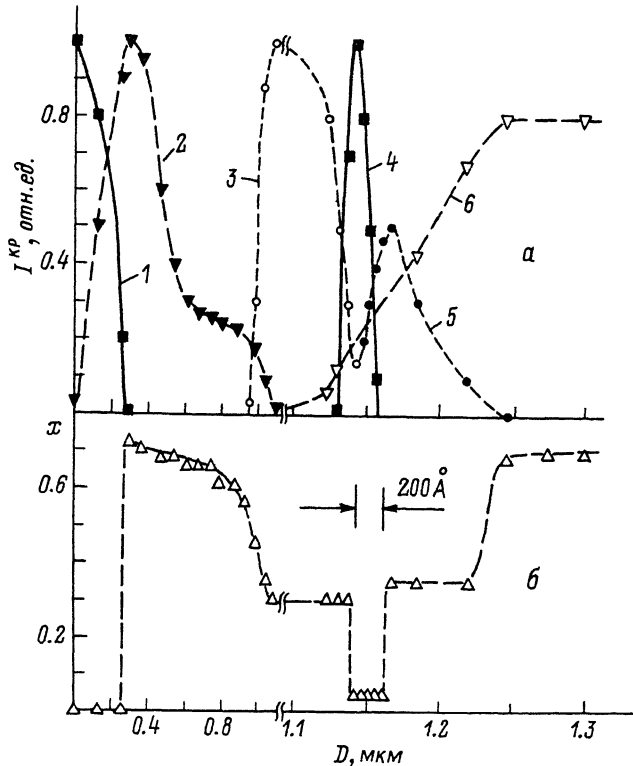


Рис. 2. а) Зависимость относительной интенсивности линий фонов от глубины проникновения окисла D для различных слоев ГС: 1 - контактного слоя, 2 - второго эмиттера, 3 - второго волноводного слоя, 4 - активной области, 5 - первого волноводного слоя, 6 - первого эмиттера. б) Экспериментально полученное распределение $AlAs$ по толщине исследуемой ГС.

Результующее распределение $AlAs$ по толщине исходной ГС, отсчитываемой от поверхности (рис. 2, б), полученное с помощью данных о составах слоев, показало, что в исследованной структуре второй широкозонный эмиттер имеет градиент концентрации $AlAs$ (30 мол. %/ $\mu\text{м}$). Имеется также заметный переходный слой между этим эмиттером и вторым волноводным слоем ($\sim 0.1 \mu\text{м}$), обусловленный, по-видимому, процессом замены расплавов перед началом роста широкозонного эмиттера. Кроме того, волноводные слои различаются по составу на величину $\Delta x = 0.05$.

Таким образом, проведенные исследования показали, что метод комбинационного рассеяния света при послойном анодном окислении позволяет с высокой точностью измерять распределение $AlAs$ по толщине многослойных $AlGaAs$ -гетероструктур с ультратонкими ($\geq 50 \text{ \AA}$) слоями.

- [1] Молекулярно-лучевая эпитаксия и гетероструктуры / Под ред. Л. Ченга и К. Плога. М.: Мир, 1989. С. 462-546.
- [2] A b s t r e i t e r G., B a u s e r E., F i s c h e r A., P l o o g K. // Appl. Phys. 1978. V. 16. N 4. P. 345-352.
- [3] Андреев В.М., Минтаиров А.М., Нахимович М.В., Смекалин К.Е., Румянцев В.Д., Хвостиков В.П., Якимов А.Ю. Тез. докл. I Всес. конф. по физич. основам твердотельной электроники, т. В, Л., 1989. С. 102-103.
- [4] Алферов Ж.И., Андреев В.М., Конников С.Г., Ларионов В.Р., Погребницкий К.Ю., Хвостиков В.П. // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. В. 2. С. 171-176.
- [5] Рассеяние света в твердых телах / Под ред. М. Кардоны и Г. Гюнтеродта, т. 2. М.: Мир, 1984. С. 65-71.
- [6] S h e m g Y., J a w D., J o u M., S t r i n g f e l l o w G. // J. Appl. Phys. 1989. V. 65. N 8. P. 3285-3288.
- [7] F u k a s a w a R., W a k a k i M., O h t a K., O k u m u r a H. // Jpn. J. Appl. Phys. 1986. V. 25. N 3. P. 652-653.

Физико-технический
институт им. А.Ф. Иоффе
АН СССР, Ленинград

Поступило в Редакцию
20 февраля 1990 г.

Письма в ЖТФ, том 16, вып. 9

12 мая 1990 г.

06.3; 07; 12

© 1990

ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ АКТИВНЫХ СВЕТОВОДОВ,
ЛЕГИРОВАННЫХ ИОНАМИ Er^{3+} В КАЧЕСТВЕ
СОЛИТОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ
В ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЯХ СВЯЗИ

А.Б. Г р у д и н и н, Д.В. К о р о б к и н

В экспериментах [1] был осуществлен квазистационарный режим распространения сверхкоротких импульсов (СКИ) света на длине волны 1,6 мкм благодаря компенсации оптических потерь за счет ВКР-усиления сигнального излучения. Использование непре-