

- [6] В е д а н о в V.M., G a d i y a k G.V.,
L o z o v i k Yu.E. - Phys. Lett., 1982, v. 92A,
No 8, p. 400-402.
- [7] К о р н Г., К о р н Т. Справочник по математике. М.:
Наука, 1978, с. 195.
- [8] Д е р я г и н Б.В. Теория устойчивости коллоидов и тонких
пленок. М.: Наука, 1986. 208 с.

Институт физики
АН УССР, Киев

Поступило в Редакцию
18 октября 1987 г.

Письма в ЖТФ, том 14, вып. 2

26 января 1988 г.

ЖИДКОФАЗНЫЕ $AlGaAs$ - СТРУКТУРЫ С КВАНТОВО-РАЗМЕРНЫМИ СЛОЯМИ ТОЛЩИНОЙ ДО $\sim 20 \text{ \AA}$

Ж.И. А л ф е р о в, В.М. А н д р е е в,
С.Г. К о н н и к о в, В.Р. Л а р и о н о в,
К.Ю. П о г р е б и ц к и й, Н.Н. Ф а л е е в,
В.П. Х в о с т и к о в

В работах [1-4] нами было показано, что при снижении температуры кристаллизации из раствора-расплава возможно получение $AlGaAs$ - структур с толщинами слоев менее 100 \AA . Из исследований фотолюминесценции $AlGaAs$ -структур со слоями толщиной $50-100 \text{ \AA}$ было найдено [3, 4], что флуктуация толщины квантово-размерных слоев, получаемых методом низкотемпературной ЖФЭ, не превышает ± 1 монослой, а внутренний квантовый выход излучательной рекомбинации в этих слоях близок 100% при 300 К.

В лазерах на основе таких структур с узкозонными слоями толщиной $100-150 \text{ \AA}$ и расширенной волноводной полостью были достигнуты пороговые плотности тока $j_n = 200 \text{ А/см}^2$ (300 К) при длине резонатора 500 мкм, сравнимые с минимальными j_n в $AlGaAs - GaAs$ лазерах, изготовленных методами молекулярной и МОС-гидридной эпитаксии и в $GaAs - GaInPAs$ лазерах, полученных модифицированным методом ЖФЭ при минимальном времени контакта расплава с подложкой [5, 6].

В данной работе приводятся результаты исследования концентрационных профилей $AlGaAs$ -структур, полученных методом низкотемпературной ЖФЭ, толщина узкозонных слоев в которых составляет от $\sim 100 \text{ \AA}$ до $15-20 \text{ \AA}$.

Послойный анализ состава проводился методом, основанным на определении разностей фотоэмиссии электронов на скачках рентгеновского поглощения (методом ОРФЭС) [3, 7]. Метод обладает разрешением $10-20 \text{ \AA}$. При этом максимальное разрешение реализуется при анализе участков структур, расположенных на расстоянии $200-1000 \text{ \AA}$ от поверхности.

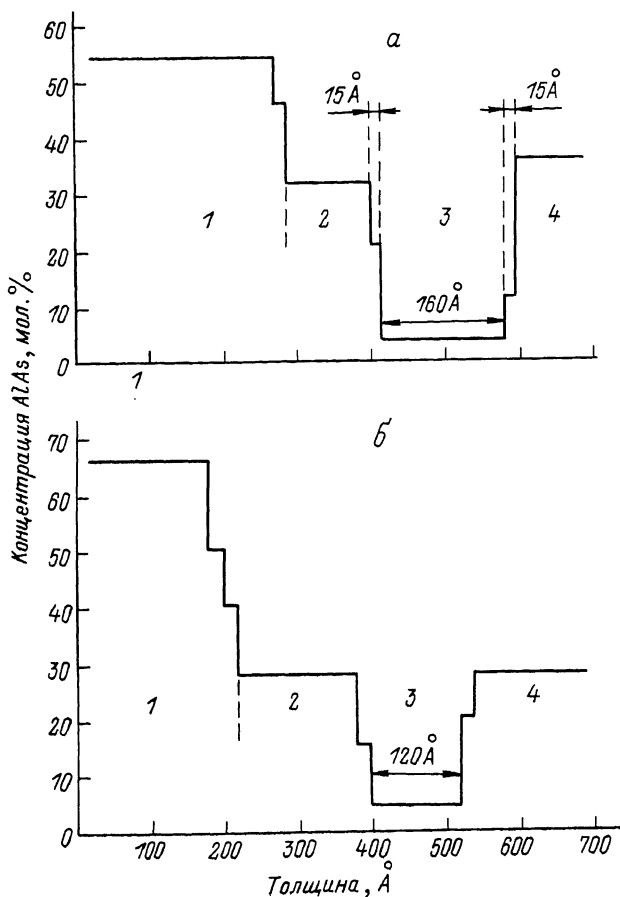


Рис. 1. Распределение состава в структурах с узкозонной областью, используемой в ДГС РО лазерах [1].

Представленные концентрационные профили (рис. 1-3) получены путем математического моделирования угловой зависимости выхода фотоэлектронов с использованием эмпирической модели, устанавливающей связь между регистрируемой интенсивностью вторичной эмиссии, концентрацией и толщиной анализируемых эпитаксиальных слоев гетероструктуры. Искомый профиль задается ступеньками с различным шагом, соответствующим шагу интегрирования (минимальная толщина ступеньки - 10 Å). Конечный результат устанавливается по совпадению экспериментальной и расчетной кривых угловой зависимости выхода фотоэффекта [3, 7].

Протяженность переходных областей между слоями разного состава, определенная данным методом, включает в себя как истинное

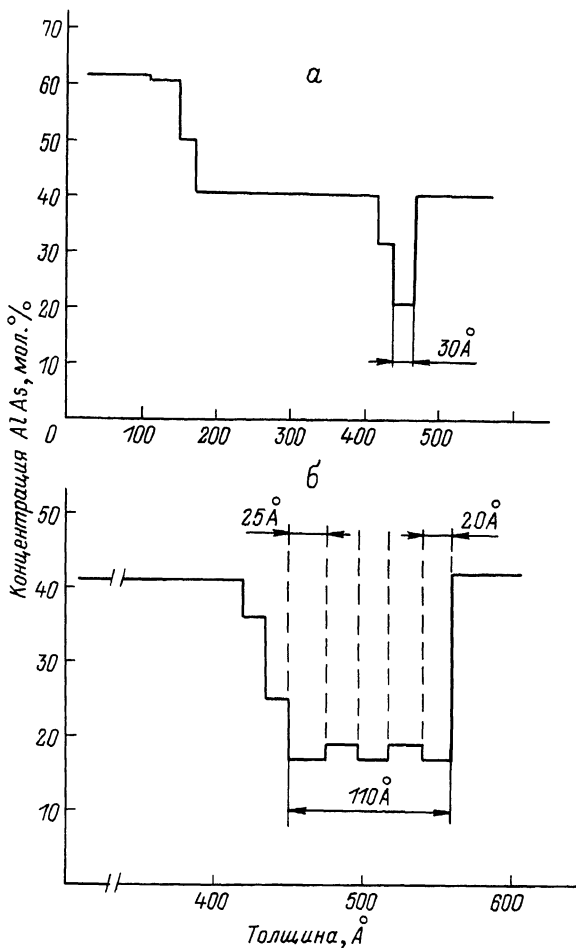


Рис. 2. Концентрационные профили структуры с узкозонным слоем толщиной 30 Å (а) и многослойной узкозонной областью толщиной 110 Å (б), состоящей из пяти близких по составу слоев толщиной ~ 20 Å.

размытие гетерограницы (вследствие наличия слоев с промежуточными значениями концентраций), так и псевдоразмытие, вызванное непланарностью слоев — неоднородностью толщины слоя по исследуемой площади образца, причем псевдоразмытие гетерограницы равно величине максимальных флуктуаций толщины слоя. Для локализации исследуемой области образца использовалась маска с отверстием 2 x 1 мм.

На рис. 1 приведено распределение состава в двух структурах, выращенных в режимах, подобных использованным для создания

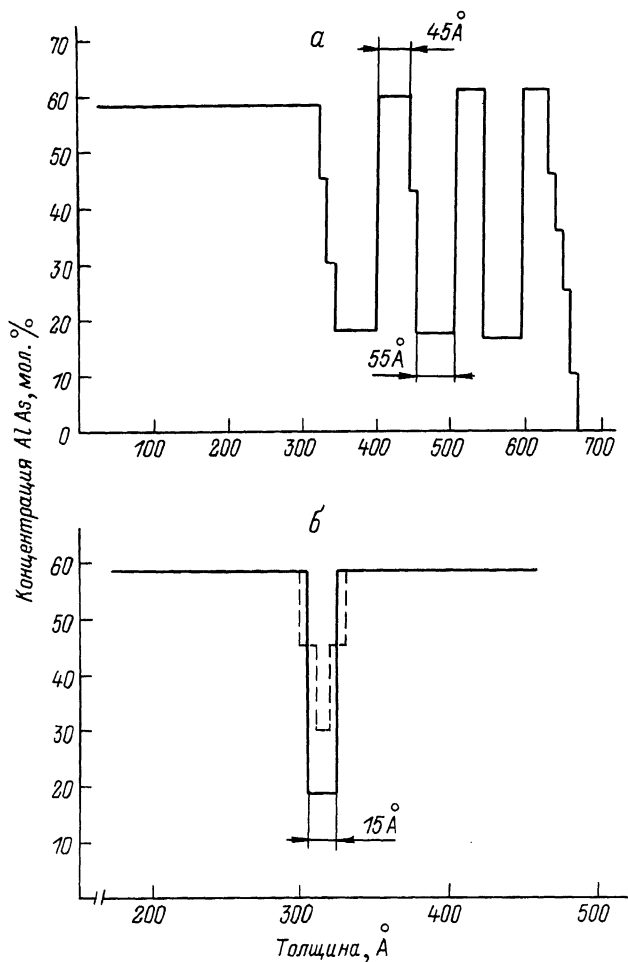


Рис. 3. Распределение концентрации $AlAs$ в шестислойной структуре (а), состоящей из трех узкозонных ($x \approx 0.17$) и трех широкозонных ($x \approx 0.6$) слоев, и в структуре с одной квантовой „ямой“ толщиной $\sim 15 \text{ \AA}$.

низкопороговых лазеров [1]. Структуры включают: широкозонный приповерхностный слой 1 $Al_xGa_{1-x}As$ ($x = 0.55-0.65$), слой 2 ($x \approx 0.3$), являющийся частью волноводной области, узкозонный активный слой 3 ($x \approx 0.05$) толщиной $120-160 \text{ \AA}$ и часть второго волноводного слоя 4 ($x \approx 0.3$), распределение состава в котором записано не по всей толщине. Данные структуры были специально получены с уменьшенной толщиной приповерхностных слоев для того,

чтобы узкозонный слой залегал на глубине, соответствующей диапазону максимальной чувствительности метода ОРФЭС (начало отсчета на оси абсцисс на рис. 1-3 соответствует поверхности образцов). Измеренная минимальная толщина переходных слоев, ограничивающих узкозонную область на рис. 1, составляет 15 Å.

Распределение состава, показанное на рис. 2,а, соответствует структуре с толщиной узкозонного слоя 30 Å, заключенного между широкозонными слоями $Al_{0.4}Ga_{0.6}As$. Вблизи поверхности структуры имеется еще один более широкозонный слой $Al_{0.6}Ga_{0.4}As$ толщиной 150 Å. На рис. 2,б представлен концентрационный профиль структуры, узкозонная область которой толщиной 110 Å состоит из пяти близких по составу слоев (~ 17 мол. % $AlAs$), выращенных в одинаковых температурно-временных интервалах. Показанные штриховыми линиями положения границ изменения состава свидетельствуют о высокой воспроизводимости толщин кристаллизуемых узкозонных слоев, составляющих ~ 20 Å.

Аналогичный результат получен при выращивании шестислойной структуры с более значительным перепадом состава на гетерограницах (рис. 3,а): с тремя слоями широкозонного твердого раствора ($x \approx 0.6$) толщиной ~ 45 Å и тремя слоями с $x \approx 0.17$ толщиной ~ 55 Å.

В структуре, показанной на рис. 3,б, толщина узкозонного слоя составляет ~ 15 Å и сравнима с порогом чувствительности метода ОРФЭС. Поэтому в результате измерения этой структуры получены два возможных концентрационных профиля, показанных сплошными и штриховыми линиями, различие между которыми есть выражение погрешности метода.

При выращивании структур с квантово-размерными слоями весьма важным является вопрос о планарности гетерограниц и толщине переходных слоев. Выше отмечалось, что регистрируемое методом ОРФЭС размытие гетерограниц складывается из „переходных” слоев и непланарности гетерограниц. В приведенных на рис. 2, 3 распределениях состава размытие большинства гетерограниц менее порога чувствительности метода, т.е. в этих структурах флуктуации толщин слоев и „переходные” слои в сумме не превышают 10-15 Å. Этот вывод находится в соответствии с полученными ранее [3, 4] из фотoluminesцентных исследований данными о высокой степени планарности (± 1 монослой) квантово-размерных слоев, получаемых методом низкотемпературной жидкофазной эпитаксии.

Таким образом, полученные результаты показывают, что данный метод обеспечивает прецизионную кристаллизацию $AlGaAs$ - слоев толщиной до ~ 20 Å при толщине „переходных” слоев и флуктуациях толщин составляющих в сумме менее 10-15 Å - порога чувствительности метода ОРФЭС.

В заключение авторы выражают благодарность В.Д. Румянцеву, В.Ю. Аксенову, А.М. Минтайрову за полезные обсуждения и помощь в эксперименте.

- [1] Алферов Ж.И., Андреев В.М., Воднев А.А., Ивентьева О.О., Ларионов В.Р., Румянцев В.Д. - ФТП, 1986, т. 20, в. 2, с. 381-383.
- [2] Андреев В.М., Ивентьева О.О., Конников С.Г., Погребницкий К.Ю., Пурон Э., Сулима О.В., Фалеев Н.Н. - Письма в ЖТФ, 1986, т. 12, в. 9, с. 533-537.
- [3] Алферов Ж.И., Андреев В.М., Воднев А.А., Конников С.Г., Ларионов В.Р., Погребницкий К.Ю., Румянцев В.Д., Хвостиков В.П. - Письма в ЖТФ, 1986, т. 12, в. 18, с. 1089-1093.
- [4] Андреев В.М., Воднев А.А., Минтаиров А.М., Румянцев В.Д., Хвостиков В.П. - ФТП, 1987, т. 21, в. 7, с. 1212-1216.
- [5] Алферов Ж.И., Антонишкис Н.Ю., Арсентьев И.Н., Гарбузов Д.З., Красовский В.В., Тикуннов А.В., Халфин В.Б. - ФТП, 1987, т. 21, в. 1, с. 162-164.
- [6] Алферов Ж.И., Антонишкис Н.Ю., Арсентьев И.Н., Гарбузов Д.З., Тикуннов А.В., Халфин В.Б. - ФТП, 1987, т. 21, в. 8, с. 1517-1519.
- [7] Арсентьев И.Н., Гарбузов Д.З., Конников С.Г., Погребницкий К.Ю., Свелокузов А.Е., Фалеев Н.Н., Чудинов А.В. - ФТП, 1986, т. 20, в. 12, с. 2206-2211.

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

Поступило в Редакцию
5 октября 1987 г.

Письма в ЖТФ, том 14, вып. 2

26 января 1988 г.

О ВЛИЯНИИ ПРИМЕСИ ВНЕДРЕНИЯ
НА ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА
ИМПЛАНТИРОВАННОГО ФОСФИДА ИНДИЯ
ПОСЛЕ ЛАЗЕРНОГО ОТЖИГА

Е.Н. А р у т ю н о в, А.Н. В а с и л ь е в,
С.Ю. К а р п о в, И.А. С о к о л о в,
Е.М. Т а н к л е в с к а я, А.В. Т у л у п о в

Наносекундное лазерное воздействие на кристаллический *GaAs* приводит к резкой деградации его люминесцентных свойств [1]. При импульсном отжиге имплантированных слоев *GaAs* с плотностями