

ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ С ТУННЕЛЬНО ТОНКИМИ (20-50 Å) ПОВЕРХНОСТНЫМИ $AlGaAs$ -СЛОЯМИ, ПОЛУЧЕННЫМИ МЕТОДОМ ЖФЭ

В.М. Андреев, А.А. Воднев,
В.Р. Ларионов, К.Я. Расулов,
В.Д. Румянцев, В.П. Хвостиков

Метод низкотемпературной жидкофазной эпитаксии позволяет осуществлять прецизионную кристаллизацию квантово-размерных $AlGaAs$ гетероструктур при скоростях кристаллизации, сравнимых со скоростями роста, реализуемыми в методах молекулярно-пучковой и МОС-гидридной эпитаксии [1-4]. На основе структур с толщиной активной области 120-160 Å методом низкотемпературной ЖФЭ нами в последнее время были изготовлены низкопороговые гетеролазеры с раздельным ограничением со значениями пороговой плотности тока $j_{пор} = 175 \text{ А/см}^2$ (300 К) при длине резонатора Фабри-Перо $L = 1.1 \text{ мм}$, 220 А/см^2 при $L = 0.3 \text{ мм}$ и 270 А/см^2 при $L = 0.18 \text{ мм}$. Полученные величины $j_{пор}$ на „длинных“ лазерах ($L > 1 \text{ мм}$) сравнимы с лучшими значениями $j_{пор}$ в лазерах на основе $AlGaAs$ -гетероструктур, изготовленных методами молекулярно-пучковой и МОС-гидридной эпитаксий, а также жидкофазной эпитаксией $GaAs-InGaAsP$ гетероструктур [5, 6]. Значения же $j_{пор}$, полученные нами в лазерах с $L < 0.3 \text{ мм}$, ниже лучших опубликованных к настоящему времени величин $j_{пор}$ для таких „коротких“ лазеров.

В настоящей работе приводятся результаты исследования низкотемпературной кристаллизации из жидкой фазы туннельно-тонких широкозонных „поверхностных“ слоев $Al_xGa_{1-x}As$ ($x = 0.6-0.8$) на подложках из $GaAs$. Данные структуры обеспечивают дополнительные возможности для измерения толщин и исследования планарности и сплошности туннельно-тонких слоев (ТТС) путем исследования распределения по поверхности структур фототовета и интенсивности фотолюминесценции в $GaAs$ при генерации носителей тока через сверхтонкое широкозонное „окно“. При этом используется эффект пассивации поверхности $GaAs$ слоем твердого раствора, что обеспечивает значительно большую интенсивность фотолюминесценции и большее значение фототовета в местах, защищенных широкозонным слоем по сравнению со „свободной“ поверхностью $GaAs$.

Оценка толщин ТТС осуществлялась в данной работе методом ступенчатого анодного окисления с одновременным измерением фототовета и интенсивности фотолюминесценции. Предварительно было установлено соотношение толщины травяемого слоя $Al_xGa_{1-x}As$ ($x = 0.6-0.8$) к величине анодного напряжения, составившее в наших экспериментах 10-15 Å/В. При определении этого соотношения использовался комплекс методик измерения толщин сверхтонких

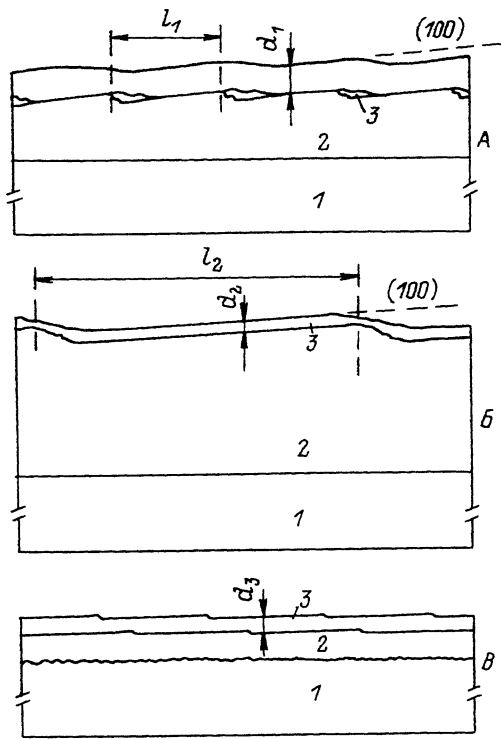


Рис. 1. Схематическое изображение трех типичных случаев роста туннельно-тонких слоев (3) при различном рельефе поверхности буферного слоя (2) $GaAs$ на подложке (1) из $GaAs$.

слоев, разработанных в работах [2, 3, 7], а также методы Оже-профилирования и эллипсометрии.

При получении исследованных в данной работе структур сначала на подложке $GaAs$ кристаллизовался буферный слой $GaAs$ толщиной от 10^{-2} до 5 мкм. Замена состава жидкой фазы перед началом роста ТТС осуществлялась при $T = 400^\circ C$ принудительным вытеснением предыдущего расплава без Al расплавом с Al [1-4]. Из исследований распределения фотоответа и интенсивности фотолюминесценции по поверхности исходных структур, а также при послойном травлении ТТС методом анодного окисления было установлено, что характер роста ТТС зависит в значительной степени от рельефа поверхности $GaAs$ перед началом роста. При этом можно выделить три наиболее характерных варианта, изображенных на рис. 1. Схемы А и Б показывают варианты ЖФЭ, в которых перед ростом ТТС кристаллизуются буферные слои (2) с рельефом, определяемым выклиниванием плоскости (100).

В варианте А характерное расстояние между выступами микро-рельефа составляет $l_1 = 1-10$ мкм, что меньше длины диффузионного смещения атомов мышьяка за время 10-100 с, соответствующее времени роста ТТС. В этом случае при высоте неравноностей, сравнимой с толщиной ТТС, рост слоя твердого раствора (слой 3 на рис. 1А) в начальный момент происходит преимущественно на склонах углублений в местах выхода на поверхность высокоиндексных плоскостей, характеризующихся большей скоростью роста. В этом случае сплошной слой вырастает только при его толщине d_1 , превышающей высоту микронеровностей.

В варианте Б, реализуемом при большей толщине буферного эпитаксиального слоя (2) $GaAs$, его огранка плоскостью (100) достигается на значительно больших (1-5 мм) участках l_2 , превышающих длину диффузии атомов мышьяка за время роста ТТС. Именно на этих ограненных участках происходил рост планарных тоннельно-тонких слоев (3) с толщиной 20-50 Å.

Вариант В реализуется при кристаллизации слоев $Al_xGa_{1-x}As$ на гладкой поверхности $GaAs$, получаемой при выращивании достаточно тонких буферных слоев. В этом случае планарный рост ТТС обеспечивается по всей поверхности подложки. О планарности и сплошности слоев толщиной 20-50 Å свидетельствует равномерность фотоответа и интенсивности фотолюминесценции структуры $GaAs-Al_xGa_{1-x}As$, уменьшающейся одновременно по всей поверхности после травливания слоя твердого раствора методом анодного окисления при напряжении 1.5-2 В для структур с $d = 20-30$ Å и 3-4 В при $d = 40-50$ Å.

Из исследований зависимости фотоответа структур $n-GaAs-pGaAs-p-Al_xGa_{1-x}As$ от толщины широкозонного слоя было установлено, что квантовый выход фотоответа $Q \approx 0.85$ сохраняется при утоньшении широкозонного слоя до $d \approx 50$ Å. При $d < 30-50$ Å наблюдается уменьшение величины Q вследствие туннельного выброса генерированных светом носителей тока на поверхность твердого раствора. При полном травливанием слоя твердого раствора значение Q уменьшается до уровня $Q \leq 0.2$ (рис. 2,а). Кривая 2 на рис. 2,а с наиболее резким спадом фотоответа при $U_a \approx 6$ В получена на структуре, в которой толщина слоя твердого раствора, измеренная методом Оже-профилирования, составила 70 Å.

Экспериментальные значения толщин слоев, определенные рассмотренным методом анодного окисления, в зависимости от времени кристаллизации при $T = 400$ °С показаны на рис. 2,б. Разброс экспериментальных данных связан как с погрешностью измерений толщины ТТС, так и с небольшими вариациями состава твердого раствора, скорости охлаждения и темпа замены расплавов перед началом роста ТТС. Расчетные кривые на рис. 2,б получены с учетом только диффузионного механизма доставки растворенного вещества к плоскости кристаллизации при коэффициенте диффузии мышьяка в расплаве, принятом равным 10^{-5} см² с⁻¹, и критическом переохлаждении в расплаве до приведения его в контакт с подложкой 15 и 10 °С (кривые 1 и 2 соответственно). Как сле-

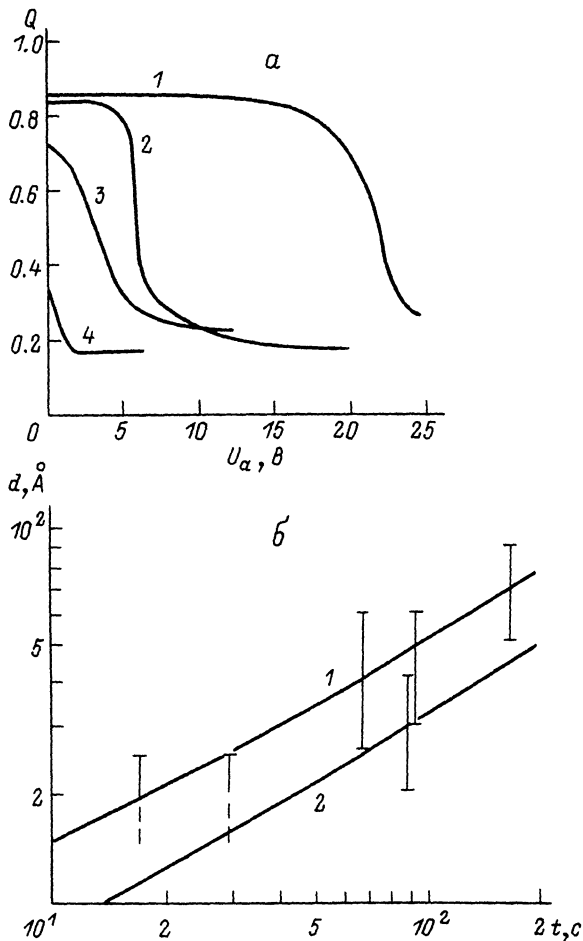


Рис. 2. Зависимость коэффициента сбора носителей тока в 4-х структурах $n\text{-GaAs-p-GaAs-p-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($x \approx 0.7$) с различной толщиной слоя твердого раствора от величины приложенного при анодном окислении напряжения (а) и расчетные кривые (1, 2) и экспериментальные значения толщин слоев $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($x = 0.6-0.8$) в зависимости от времени роста при $T = 400^\circ\text{C}$ (б).

дует из рис. 2,а, скорости кристаллизации ТТС при $T = 400^\circ\text{C}$ составляют $0.5-1 \text{ Å/с}$.

Таким образом, в работе методом низкотемпературной ЖФЭ получены планарные туннельно-тонкие „поверхностные“ слои $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, при кристаллизации которых на ранней стадии гетероэпитаксии реализован слоевой механизм роста при подавлении островкового механизма кристаллизации. Данные структуры с ульт-

тратонкими потенциальными барьерами, получаемые относительно простым методом ЖФЭ, представляют несомненный интерес для ряда практических применений, например, для создания высокоэффективных фотопреобразователей ультрафиолетового излучения и приборов, работа которых основана на эффекте туннелирования через тонкие потенциальные барьеры.

В заключение авторы выражают признательность Г.А. Медведкину и В.А. Поссе за помощь в эксперименте, Б.Я. Беру за проведение Оже-анализа, К.Ю. Погребницкому, Н.Н. Фалееву, В.Е. Уманскому и С.Г. Конникову за электронно-микроскопические и рентгеновские эмиссионные исследования, Ж.И. Алферову за внимание к данной работе.

Л и т е р а т у р а

- [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., Арсентьев И.Н., Вавилова Л.С., Гарбузов Д.З., Красовский В.В. - ФТП, 1984, т. 18, в. 9, с. 1655-1658.
- [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.

Поступило в Редакцию
20 апреля 1988 г.