

- [5] Jones G.A., Lasey T.M., Puchalska I.B. // Journ. Appl. Phys. 1982. V. 53(11). P. 7870-7872.
- [6] Гудинаф Дж. В сб.: Магнитная структура ферромагнетиков. М.: ИЛ, 1959, с. 58.
- [7] Семенов Д.И. // Кристаллография. 1981. Т. 26. С. 753-757.
- [8] Зубков Ю.Н. // ЖТФ. 1983. Т. 53. С. 2278-2280.

Калининский государственный
университет

Поступило в Редакцию
8 февраля 1989 г.

Письма в ЖТФ, том 15, вып. 9

12 мая 1989 г.

06.3

ОСОБЕННОСТИ ЖИДКОФАЗНОГО РОСТА $Al_xGa_{1-x}As$ ($x = 0.2-0.3$) ПРИ НИЗКОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

А.З. М е р е у ц э, А.И. П е т р о в,
В.М. П о л т о р а ц к и й, В.А. П р о к у д и н а,
А.В. С ы р б у, В.П. Т а р ч е н к о,
В.П. Я к о в л е в

Низкотемпературная жидкофазная эпитаксия (НЖЭ) в системе $AlGaAs / GaAs$ (температурный диапазон роста 650-400 °С) позволяет получать многослойные структуры с толщиной слоя порядка единиц нм [1]. Этим методом были изготовлены лазерные диоды с одиночной квантовой ямой с пороговым током генерации 3,5 мА [2]. Одним из дальнейших путей развития НЖЭ в этой системе является разработки методов выращивания структур с многоквантовыми ямами. В связи с этим необходимы данные по низкотемпературному росту $Al_xGa_{1-x}As$ ($x = 0.2-0.3$), подробные тем, которые были получены для случая $0 = x$ в работе [3]. Также важным для дальнейшего развития НЖЭ является изучение зависимости параметров слоев $Al_xGa_{1-x}As$ от переохлаждения раствора-расплава.

В данной работе выращивание $Al_xGa_{1-x}As$ ($x = 0.2-0.3$) проводилось в графитовых кассетах как слайдового, так и прокачного типа в потоке очищенного водорода с точкой росы -65-80 °С. Толщина слоев определялась в растровом электронном микроскопе на косых шлифах. Проводились измерения длины волны краевой фотолюминесценции выращенных слоев при $T = 300$ К.

Экспериментальные зависимости толщины слоя d и длины волны краевой фотолюминесценции λ от переохлаждения раствора-расплава ΔT (см. рис. 1) были определены при соблюдении постоянства температуры начала выращивания и времени роста (со-

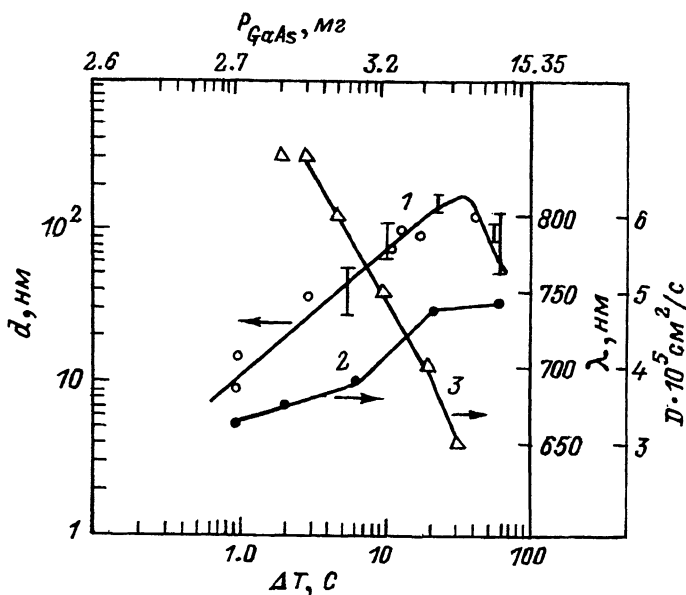


Рис. 1. Зависимости толщины слоя, d (1), длины волны краевой фотолюминесценции, λ (2) и коэффициента взаимной диффузии растворенного материала D (3) от переохлаждения раствора-расплава, ΔT .

ответственно 540°C и 35 с). Слои выращивались между двумя слоями широкозонного твердого раствора $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($x = 0.7-0.8$). Переохлаждение раствора-расплава варьировалось путем изменения навески арсенида галлия для насыщения жидкой фазы (соответствующие навески GaAs на 1 г галлия приведены на верхней оси абсцисс рис. 1). Толщина слоя раствора-расплава и скорость уменьшения температуры были равны 2 мм и $1.5^\circ\text{C}/\text{мин}$ соответственно. Как видно из рис. 1 (кривая 1), с увеличением переохлаждения толщина слоя увеличивается вплоть до значения $\Delta T \approx 30^\circ\text{C}$, выше которого d начинает падать вследствие гомогенного зародышеобразования в жидкой фазе. Необходимо отметить, что для традиционной „высокотемпературной“ эпитаксии этого материала критическое переохлаждение равно $\sim 10^\circ\text{C}$ [4], что в три раза меньше соответствующего значения для НЖЭ. По-видимому, такое отличие обусловлено очень низкой растворимостью мышьяка в растворе-расплаве для температурного диапазона НЖЭ.

Изменение переохлаждения жидкой фазы приводит к изменению длины волны краевой фотолюминесценции эпитаксиального слоя, (рис. 1, кривая 2). С увеличением ΔT от 1 до 20°C λ увеличивается с наклоном $4\text{ нм}/^\circ\text{C}$, что соответствует изменению состава x 0.008°C^{-1} . По данным работы [5], изменение x с переохлаждением для температуры роста 725°C составляет 0.003°C^{-1} .

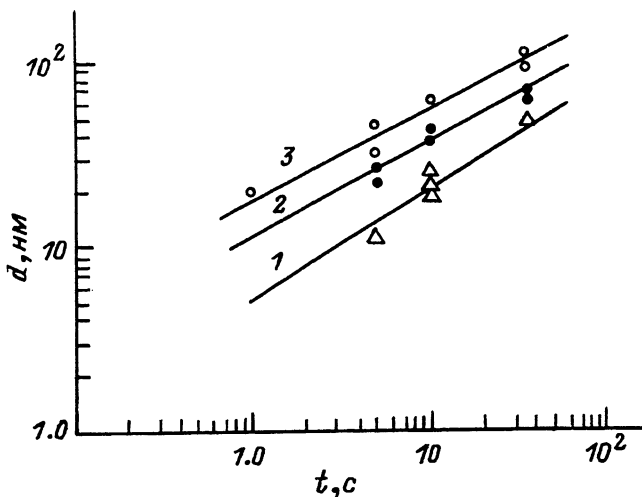


Рис. 2. Зависимости толщины слоя, d от времени роста t для трех значений переохлаждения раствора-расплава ΔT : 1 - $\Delta T = 5^\circ\text{C}$, 2 - $\Delta T = 10^\circ\text{C}$, 3 - $\Delta T = 20^\circ\text{C}$.

На рис. 1 также приведена зависимость коэффициента взаимной диффузии растворенного материала \mathcal{D} от переохлаждения (кривая 3), которая была рассчитана на основе данных зависимости с использованием уравнения для толщины слоя, выращенного из переохлажденной жидкой фазы [6]. С увеличением переохлаждения от 2 до 30 $^\circ\text{C}$ коэффициент диффузии уменьшается от $6.8 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2/\text{с}$ до $3 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2/\text{с}$. В работах [5, 7] приводится значение коэффициента диффузии для разных температур: $5 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2/\text{с}$ для 725°C [5], $1.6 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2/\text{с}$ для 800°C и $5 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2/\text{с}$ для 950°C [7]. Следует заметить, что температурная зависимость $\mathcal{D}(T)$, определенная в [7] для температурного интервала 800–950 $^\circ\text{C}$, при более низких температурах не описывает имеющиеся экспериментальные данные. Помимо этого, в данной работе выявлена зависимость коэффициента взаимной диффузии от переохлаждения, на что ранее не обращалось внимание.

На рис. 2 приведены зависимости толщины слоя от времени роста для трех значений переохлаждения жидкой фазы 5, 10 и 20 $^\circ\text{C}$. Зависимости 1, 2 и 3 – расчетные. Необходимые для расчета значения коэффициента диффузии, соответствующие указанным переохлаждениям, были взяты из зависимости $\mathcal{D}(\Delta T)$ (рис. 1, кривая 3). Экспериментальные точки на рис. 2 довольно хорошо соответствуют расчету.

Для получения структур с многоквантовыми ямами, а также для других применений, важно знать, как изменяется состав эпитаксиального слоя с понижением температуры жидкой фазы. Такие данные были получены для начального состава $x = 0.3$, интервалов выращивания 650–500 $^\circ\text{C}$ (1, рис. 3) и 580–530 $^\circ\text{C}$ (2,

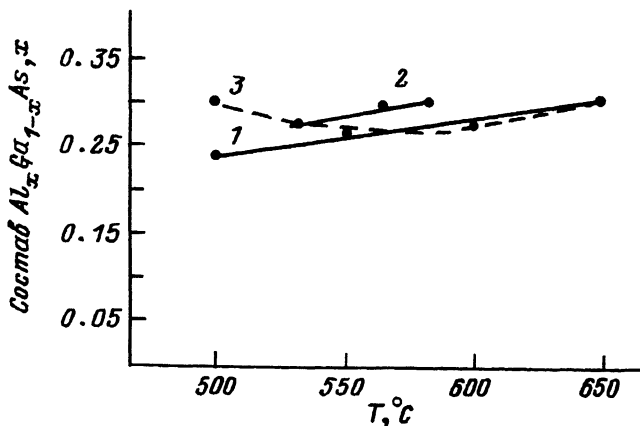


Рис. 3. Изменение состава эпитаксиального слоя $Al_xGa_{1-x}As$ с начальным составом $x = 0.3$ при понижении температуры роста T : 1, 2 - эксперимент; 3 - расчет по данным работы [8].

рис. 3), скорости охлаждения $1.5 \text{ }^\circ\text{C}/\text{мин}$. Состав твердой фазы для разных температур определяли прерыванием роста при соответствующих температурах и измерением длины волны краевой фотолюминесценции при возбуждении сильнопоглощающим светом $\lambda = 0.48 \text{ мкм}$. Зависимость 3 на рис. 3 была рассчитана по данным работы [8] и соответствует равновесной кристаллизации. Как видно из рисунка, в температурном интервале НЖЭ состав слоя $Al_xGa_{1-x}As$ ($x \approx 0.3$) очень слабо изменяется с температурой. Наблюдается хорошее соответствие с расчетной зависимостью, особенно в интервале температур $650\text{--}550 \text{ }^\circ\text{C}$.

Ранее в работах [7, 9] указывалось на необходимость учета ассоциации атомов в жидкой фазе $Al-Ga-As$ при анализе температурной зависимости коэффициента взаимной диффузии и ориентационной зависимости скорости роста. Вероятность ассоциации атомов в комплексы (гетерогенных флуктуаций) в растворе-расплаве экспоненциально увеличивается с понижением температуры по закону $\rho = A \exp(-\Delta G/kT)$ [10], где A - некоторая постоянная, ΔG - изменение свободной энергии системы, обусловленное появлением данной флуктуации. Следует ожидать, что ассоциация атомов в жидкой фазе должна иметь существенное проявление в процессе НЖЭ.

Нами была проведена серия опытов по выращиванию $Al_xGa_{1-x}As$ ($x = 0.2\text{--}0.3$) на планарных и рельефных подложках, ориентированных в плоскостях (100), (111)А и (111)В. При температурах начала выращивания ниже $600 \text{ }^\circ\text{C}$ было получено следующее соотношение скоростей роста: $V_{(100)} > V_{(111)В} > V_{(111)А}$. Во всех случаях интенсивность фотолюминесценции слоя на (111)В в 2-3 раза превышала интенсивность на (100), а слой на (111)А практически не люминесцировал. На рельефных подложках не было роста на боковых стенах углубления ориентации (111)А. Изменение соотно-

шения скоростей роста в полярных направлениях $\langle 111 \rangle$ по сравнению с „высокотемпературной“ эпитаксией [9], а также ухудшение качества слоя (111)А свидетельствует об увеличении вероятности образования комплексов больших размеров типа $AlAs_nGa_m$ ($n=1-4$, $m=1-12$).

С увеличением переохлаждения насыщенного раствора-расплава уменьшается ΔG , что приводит к увеличению степени ассоциации. Дополнительное связывание атомов (в том числе и алюминия) в комплексы является, на наш взгляд, причиной уменьшения D и x с увеличением ΔT .

В заключение авторы выражают признательность В.М. Андрееву, В.Р. Ларионову и В. Хвостикову за всестороннюю помощь и полезные обсуждения.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Алферов Ж.И., Андреев В.М., Конников С.Г., Ларионов В.Р., Погребницкий К.Ю., Фалеев Н.Н., Хвостиков В.П. // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. В. 27. С. 171-175.
- [2] Андреев В.М., Акимов В.Ю., Ларионов В.Р., Румянцев В.Д., Хвостиков В.П. IX Всесоюзная конференция по физике полупроводников. Кишинев, 1988. Тезисы докладов, т. 2. С. 230-231.
- [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] Галченков Д.В., Попов В.П., Зотов Л.П. // Электронная техника, Материалы. 1987. В. 3. С. 39-41.
- [5] Doi A., Hirao M., Ito R. // Japanese J. Appl. Phys. 1978. V. 17. No 3. P. 503-507.
- [6] Кейси Х., Панин М. Лазеры на гетероструктурах. М.: Мир, 1981. 362 с.
- [7] Хухрянский Ю.П., Пантелеев В.И. // Изв. АН СССР, Неорганические материалы, 1981. Т. 17. В.2. С. 204-207.
- [8] Елюхин В.А., Карпов С.Ю., Портной Е.Л., Третьяков Д.Н. // Письма в ЖТФ. 1978. Т.4. В. 11. С. 629-633.
- [9] Сырбу А.В. Кандидатская диссертация, Кишинев, 1978. 140 с.
- [10] Медведев С.А. Введение в технологию полупроводниковых материалов, М.: Высшая школа, 1970. 503 с.