

ВЫРАЩИВАНИЕ КВАНТОВЫХ ЯМ GaAsSb/GaAs МЕТОДОМ МОС-ГИДРИДНОЙ ЭПИТАКСИИ С ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРНОГО РАСПЫЛЕНИЯ СУРЬМЫ

В.Я.Алешкин*, С.А.Ахлестина, Б.Н.Звонков, Н.Б.Звонков, И.Г.Малкина,
Е.А.Ускова

НИИ физико-технический институт Государственного университета¹⁾

*Институт физики микроструктур РАН
603600 Нижний Новгород, Россия

Поступила в редакцию 8 июня 1998 г.

Предложен новый метод получения квантоворазмерных слоев $\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($x \leq 0.45$). Метод заключается в испарении твердой металлической сурьмы лазерным лучом непосредственно в реакторе вблизи подложки. Концентрация сурьмы задается временем распыления сурьмы при выключенном потоке арсина. Поляризация фотолуминесценции полученных слоев указывает на образование квантовых нитей. На полученных гетероструктурах изготовлены лазерные диоды.

PACS: 42.55.Px, 78.55.Cr, 81.15.-z

Рекордные значения таких важнейших параметров, как плотность порогового тока и выходная мощность при высокой надежности, принадлежат гетеролазерам на квантовых ямах (КЯ) $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$ [1]. Однако спектральный диапазон этих лазеров ограничен с длинноволновой стороны величиной ≈ 1 мкм. Для продвижения в сторону больших длин волн необходимо повышение концентрации индия, а это приводит к появлению дислокаций несоответствия и снижению эффективности излучения. В [2] показано, что использование GaAsSb в качестве квантового слоя вместо InGaAs позволяет продвинуться в диапазон длин волн 1.2–1.3 мкм. Обычно GaAsSb выращивают методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Так как коэффициент распределения сурьмы мал, при МОС-гидридной эпитаксии для ее введения требуется относительно большое количество ядовитых газообразных веществ. В данной работе КЯ $\text{GaAsSb}/\text{GaAs}$ получены методом МОС-гидридной эпитаксии с твердым источником сурьмы. Приводятся результаты исследования роста и свойств этих КЯ.

Образцы состояли из подложки $i\text{-GaAs}$ с ориентацией (001) и квантового слоя $\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ (толщиной ≈ 9 нм), заключенного между буферным и покровным слоями GaAs (0.15 мкм). Поверхность подложек была отклонена на 3° к направлениям [110] или [-110]. Состав полученного квантоворазмерного слоя определяли из сопоставления положений наблюдаемого при 77 К пика фотолуминесценции (ФЛ) с рассчитанным спектром квантовой ямы. Расчет проводился в рамках описанной в [3] модели. Предполагалось, что разрыв энергии зоны проводимости на гетерогранице равен нулю [4]. Однако возможно, что квантовый слой $\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ является барьером для электронов в зоне проводимости. В этом случае расчет дает завышенные значения x .

КЯ выращивали в горизонтальном кварцевом реакторе при атмосферном давлении. В качестве источников использовали триметилгаллий (ТМГ), 100% арсин и

¹⁾ e-mail: fdp@phys.unn.runnet.ru

металлическую сурьму. Источник сурьмы размещался в холодной зоне реактора на расстоянии приблизительно 12 см от подложки. Сфокусированным излучением лазера АИГ: Nd, работавшего в режиме модуляции добротности, в течение времени роста GaAsSb, сурьму распыляли импульсами с энергией 0.3 Дж и частотой следования 12.5 Гц. Подобная методика применялась ранее для легирования эпитаксиального GaAs электрически активными примесями [5]. Здесь она применена для введения основного вещества в процессе МОС-гидридной эпитаксии. Скорость распыления, определенная по уменьшению массы мишени, составляла $(3 - 3.5) \cdot 10^{-8}$ моль/с. При этом часть распыленной сурьмы осаждалась на стенках реактора, не достигнув держателя подложки.

Буферный и покровный слой GaAs выращивали при 600°C и скорости роста ≈ 0.5 нм/с. Потоки арсина и ТМГ составляли $6.6 \cdot 10^{-7}$ и $8.6 \cdot 10^{-8}$ моль/с, соответственно. Температуру роста КЯ GaAsSb выбирали в диапазоне $490-580^\circ\text{C}$. Во время распыления сурьмы скорость роста слоя заметно не изменялась и по-прежнему была пропорциональна потоку ТМГ. Как и ожидалось, сурьма очень слабо входит в эпитаксиальный слой в присутствии мышьяка. Даже при сильном уменьшении потоков арсина и ТМГ (в 6–10 раз) распыление сурьмы не приводило к заметному изменению состава выращенного слоя от GaAs. Поэтому была применена периодическая подача арсина и ТМГ при непрерывном потоке сурьмы.

Режим переключения потоков заключался в следующем. Перед началом роста твердого раствора подача арсина прекращалась, и начиналось распыление сурьмы. В тот же момент открывался клапан ТМГ. После этого в течение промежутка времени t_1 (от 2 до 6 с) в реактор поступало такое количество галлия, которое было необходимо для осаждения приблизительно одного монослоя ($1\text{ML} = 0.3$ нм) GaAs или GaSb на поверхности подложки, стабилизированной элементами V группы. Затем клапан ТМГ закрывали, и в течение времени t_2 (от 0 до 60 с) на подложку подавалась только распыляемая сурьма. При этом поверхность застраивалась атомами сурьмы. Наконец, в течение $t_3 = 1$ с подавался арсин, что позволяло достроить незавершенный слой атомов V группы. При тридцатикратном повторении процесса получали квантоворазмерный слой толщиной 9 нм. Выдержка поверхности, обедненной элементом V группы, в потоке сурьмы в течение времени t_2 облегчила встраивание сурьмы, затрудненное в условиях избытка мышьяка, обычных для МОС-гидридной эпитаксии. В таком режиме роста оказалось возможным управлять составом квантоворазмерного слоя, задавая время t_2 .

На рис.1а представлена зависимость состава выращенного квантоворазмерного слоя от выдержки поверхности в потоке сурьмы при выключенном потоке арсина. Видно, что концентрация сурьмы в слое КЯ пропорциональна времени t_2 и при этом существенно уменьшается с увеличением количества мышьяка, поданного за время t_3 . (Значения x на прямой 1 получены при потоке арсина в 3 раза меньшем, чем для точек 2).

При увеличении количества галлия, поданного за промежуток времени t_1 , (рис.1б) концентрация сурьмы в слое существенно увеличивалась. Таким образом, были выращены слои $\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ с $x \leq 0.45$. Дальнейшее увеличение x приводило к ухудшению морфологии поверхности структуры, обусловленному, по-видимому, невозможностью когерентного роста.

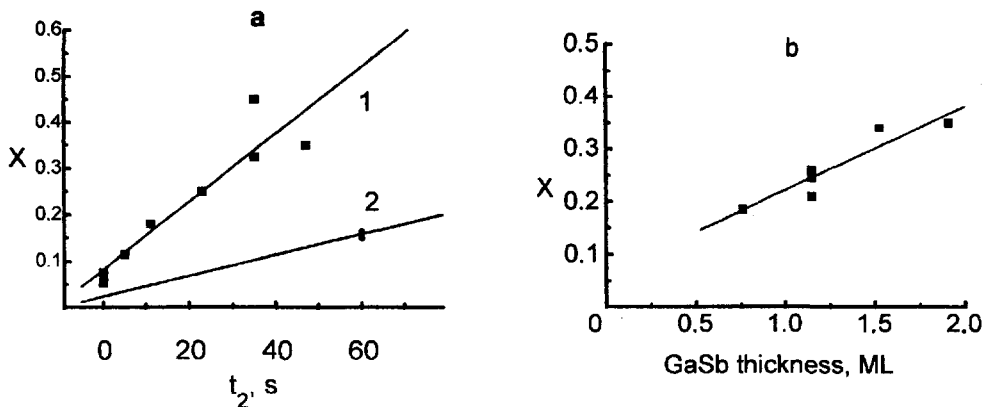


Рис.1. Зависимость состава квантоворазмерного слоя $\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ от условий роста: а) от продолжительности выдержки обогащенной галлием поверхности роста без арсина; б) от количества галлия, поданного за время распыления сурьмы. Поток арсина, подаваемый для достраивания поверхности элементом V группы (в течение периода времени t_3) для прямой 1 в 3 раза меньше, чем для точек прямой 2

Требование использования малых потоков арсина (1% от полной шкалы регулятора расхода газа) обусловило разброс полученных значений x . В некоторых случаях из-за дрейфа нуля регулятора расхода газа, контролирующего поток арсина, рост происходил, очевидно, в условиях недостатка элементов V группы. При этом поверхность образцов становилась матовой, вероятно, из-за появления на поверхности капелек галлия и их последующей кристаллизации в условиях избытка мышьяка при росте верхнего слоя GaAs. Оптические характеристики таких образцов не отличались от характеристик структур с зеркальной поверхностью, что подтверждает связь шероховатости поверхности с избытком галлия, а не сурьмы. Результаты измерений, полученных на таких образцах, на графиках не приводятся.

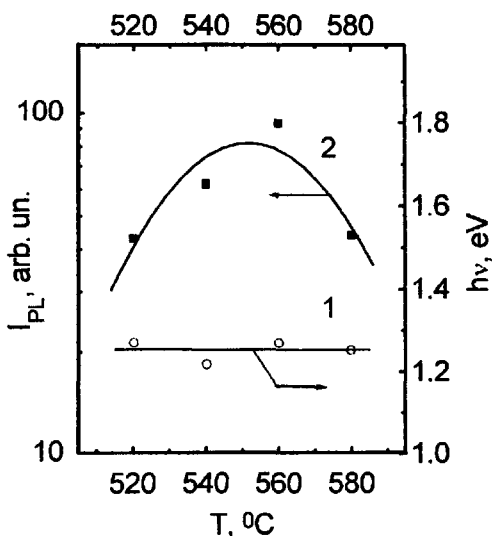


Рис.2. Зависимость энергии максимума (1) и интенсивности ФЛ (2) квантоворазмерного слоя $\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ от температуры роста

Влияние температуры роста на состав полученных слоев не обнаружено (рис.2, кривая 1). Уменьшение эффективности ФЛ с понижением температуры роста от 55°C (рис.2, кривая 2), по-видимому, связано с обычным уменьшением безызлучательного времени жизни в GaAs, выращенном методом МOC-гидридной эпитаксии при низких температурах. При температурах роста выше 550°C эффективность ФЛ также понижается, поскольку увеличение скорости десорбции атомов V группы ускоряет деградацию (увеличение концентрации дефектов) поверхности роста в течение времени выдержки без арсина.

На рис.3 представлены спектры ФЛ КЯ GaAsSb/GaAs шириной 9–10 нм, выращенных описанным способом. Кривые 1–6 соответствуют слоям, полученным в диапазоне t_2 от 0 до 35 с. Видно, что полоса ФЛ КЯ GaAsSb сильно сдвигается в сторону длинных волн при увеличении времени выдержки в потоке сурьмы. При этом, однако, она оказывается гораздо шире, чем в случае КЯ InGaAs. Для сравнения приведена кривая 7 от образца с двумя КЯ $In_xGa_{1-x}As/GaAs$ с $x = 0.1$ и $x = 0.2$. Большая ширина полосы ФЛ отмечалась и в [2] для КЯ GaAsSb. Увеличение ширины спектра может быть обусловлено наличием гетероперехода II рода, так как в нем происходит непрямая (в реальном пространстве) рекомбинация, а именно: рекомбинация захваченных КЯ дырок с электронами в GaAs.

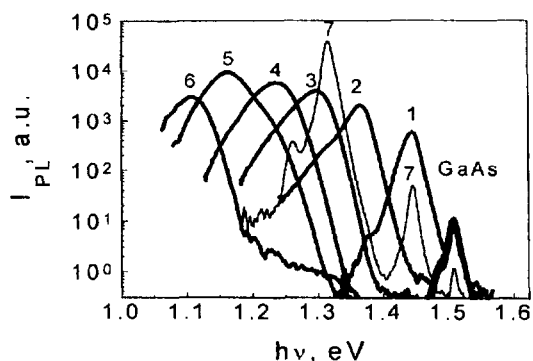


Рис.3. Спектры ФЛ КЯ $GaAs_{1-x}Sb_x/GaAs$ (1–6). Порядок нумерации кривых соответствует увеличению t_2 . Для сравнения приведен спектр структуры с двумя КЯ $Ga_{1-x}In_xAs/GaAs$ (7)

С другой стороны, сравнение кривых 1–6 показывает, что ширина спектра возрастает с увеличением концентрации сурьмы, а это свидетельствует о наличии упорядоченных включений или расслоения в твердом растворе GaAsSb.

На рис.4 (кривая 1) изображена зависимость ширины спектра ФЛ КЯ GaAsSb от энергии фотонов в максимуме (состава квантового слоя). Независимо от вариации условий роста (температура и/или потоков ТМГ и арсина), экспериментальные данные укладываются на одну кривую. Ширина линии возрастает от 10 до 60 мэВ при уменьшении энергии фотонов (увеличении x), достигает максимального значения при ~ 1.2 эВ ($x = 0.3$), а затем начинает снижаться.

Для выяснения природы этого явления была исследована линейная поляризация ФЛ. Степень поляризации рассчитывали по формуле: $P = (I_{max} - I_{min}) / (I_{max} + I_{min})$, где I_{max} , I_{min} – соответственно, максимальная и минимальная интенсивности ФЛ при изменении угла поворота поляризатора. Обнаружено, что ФЛ сильно поляризована. Направление поляризации (вектора электрического поля ФЛ) в плоскости подложки всегда совпадало с направлением $[-110]$, определенным химическим трав-

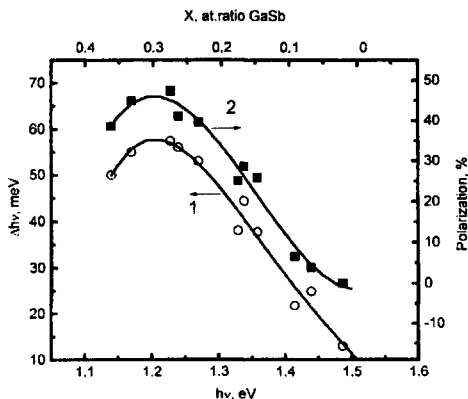


Рис.4. Зависимость ширины спектра (1) и степени поляризации (2) ФЛ КЯ GaAs_{1-x}Sb_x/GaAs от энергии максимума интенсивности ФЛ (состава квантового слоя)

лением, и не зависело от направления отклонения поверхности образца от плоскости (001). Степень поляризации ФЛ достигала 50%. Ее зависимость от энергии максимума (рис.4, кривая 2) повторяет ход зависимости ширины спектра (кривая 1), что свидетельствует об их общей причине.

Такой причиной может являться расслоение твердого раствора GaAsSb [4], приводящее к образованию включений с пониженной шириной запрещенной зоны, вытянутых вдоль [-110]. Эта гипотеза подтверждается результатами измерений поляризации ФЛ, излучаемой вдоль слоев структуры из сколотого торца: излучаемая из торца вдоль [-110] ФЛ слабо поляризована (< 10%), а ФЛ вдоль направления [110] сильно поляризована в плоскости КЯ.

Обнаружено, что параметры ФЛ (энергия, ширина линии и интенсивность) не изменяются и после отжига структуры при температуре 650°C в течение 30 минут, и описанная методика роста применима для выращивания лазерных гетероструктур. Лазерные структуры с квантовыми слоями GaAs_{0.8}Sb_{0.2}, активной областью GaAs и слоями InGaP в качестве ограничивающих твердых растворов были получены на подложках GaAs. Из них были изготовлены лазерные диоды с шириной активной области 100 мкм и длиной резонатора 1 мм. Они излучали на длине волны ≈ 1 мкм и имели плотность порогового тока 3 кА/см² при возбуждении импульсами тока длительностью 200 нс при комнатной температуре.

Работа была поддержана РФФИ (грант #98-02-16688) и Миннауки (программа ФТНС 97-1089).

1. Ж.И.Алферов, ФТП **32**, 3 (1998).
2. T.Anan, K.Nishi, Sh.Sugou et al., *10th Annual Meeting of IEEE LEOS*, PD1.4, San Francisco, Nov. (1997).
3. G.Huang, D.Yi, V.K.Reddy et al., *J. Appl. Phys.* **62**, 3366 (1987).
4. М.А.Херман, *Semiconductor Superlattice*, Akademie-Verlag, Berlin, 1986.
5. В.Н.Звонков, В.В.Подольский, В.П.Лесников и др., *Высокочистые вещества* **4**, 114 (1993).
6. S-K.Sun, G.Wang, J.E.Bowers et al., *Appl. Phys. Lett.* **68**, 1545 (1996).