

воров и многослойных структур становится очевидной. Для примера достаточно упомянуть вопрос о получении с высокой точностью состава твердых растворов типа $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ или многослойных гетероструктур субмикронных толщин $\sim 0,1$ мкм и меньше.

Использование в качестве базы для систем автоматизации аппаратуры, выполненной в стандарте и идеологии КАМАК, как показала практика, облегчает поставленную задачу — создание автоматизированной системы молекулярно-лучевой эпитаксии. Разработанный на сегодня набор программ и средств КАМАК обеспечивает сопряжение технологического эксперимента с автоматизированной системой контроля и управления. Возникающая в ходе работы потребность в дополнительных средствах сопряжения легко реализуется в рамках идеологии и стандарта КАМАК.

Исследования свойств синтезированных структур показывают, что созданная технологическая система, режимы роста и легирования обеспечивают воспроизводимое получение эпитаксиальных слоев GaAs, GaP и твердых растворов GaP—InP заданных составов и хороших электрофизических свойств.

В заключение авторы выражают благодарность Ю. Н. Золотухину, А. Н. Касперовичу, С. В. Бредихину, П. М. Песляку, В. И. Прокопенко, В. Н. Вьюхину — разработчикам системы управления на базе КАМАК.

ЛИТЕРАТУРА

1. Cho A. Y., Hayashi I. *P-n-Junction Formation During Molecular-Beam Epitaxy of Ge-Doped GaAs.*— J. Appl. Phys., 1971, vol. 2, N 11.
2. Cho A. Y., Arthur J. R. *Molecular Beam Epitaxy.*— Progress in Solid State Chem., 1975, vol. 10, p. 3, p. 157—191.
3. Miller B. I., McFee J., Martin R., Tien P. K. *Room-Temperature Operation of Lattice-Matched InP, Ga_{0,47}In_{0,53}As/InP Double-Heterostructure Laser Grown by Molecular Beam Epitaxy.*— Appl. Phys. Lett., 1978, vol. 33, N 1.
4. Ezaki L. E. *Computer-Controlled Molecular Beam Epitaxy.*— In: Proc. 6th Intern. Vacuum Congr., 1974.
5. Система производства и анализа эпитаксиальных пленок MBE-500.— Проспект фирмы «Рибер» (Франция), 1977.
6. Система производства и анализа эпитаксиальных пленок MBE-1000.— Проспект фирмы «Рибер» (Франция), 1979.
7. Что такое КАМАК? — Оперативный информационный материал. Новосибирск: изд. ИАВЭ СО АН СССР, 1978.
8. Алферов Ж. И. и др. *Получение пленок арсенида галлия методом молекулярной эпитаксии.*— В кн.: Труды II Всесоюз. конф. «Физические процессы в полупроводниковых гетероструктурах». Т. II. Ашхабад, 1978, с. 124—125.
9. Бударных В. И., Иванченко В. А., Логвинский Л. М., Рябченко В. Э. *Нелегированные пленки арсенида галлия, выращенные методом молекулярной эпитаксии.*— Письма в ЖТФ, 1979, вып. 5, № 1.

Поступила в редакцию 15 июня 1980 г.

УДК 621.315.592

Н. А. БЕРТ, А. Т. ГОРЕЛЕНКО, А. Г. ДЗИГАСОВ, С. Г. КОННИКОВ,
Т. Б. ПОПОВА, И. С. ТАРАСОВ, В. К. ТИБИЛОВ

(Ленинград)

ТВЕРДЫЕ РАСТВОРЫ InGaAsP , ИЗОПЕРИОДИЧЕСКИЕ С InP

Известно, что для получения идеальных гетероструктур необходимо полное совпадение параметров решетки и коэффициентов термического расширения контактирующих материалов. Это условие в первом прибли-

жении выполняется только для гетероструктур GaAs—AlGaAs*. Более полно это условие можно выполнить для гетероструктур с многокомпонентными твердыми растворами, используя принцип **изопериодического** замещения, предложенный в [1]. Изопериодическое замещение позволяет при различной ширине запрещенной зоны (E_g) сопрягающихся на гетерогранице материалов получать полное совпадение параметров решетки в случае четверных твердых растворов и коэффициентов термического расширения в случае пятерных и более твердых растворов.

Из четверных твердых растворов особый интерес представляют твердые растворы InGaAsP, изопериодические с InP, так как они позволяют перекрыть интервал E_g от 0,73 до 1,35 эВ ($\lambda = 0,9—1,7$ мкм), на который приходится минимум потерь излучения и нулевая дисперсия в стекловолокне ($\lambda = 1,3$ мкм) [2]. Поэтому излучающие и фотоприемные гетероструктуры в системе InGaAsP—InP являются перспективными для элементной базы волоконных оптических линий связи [3].

Ранее сообщалось о создании гетеролазеров [4—8] и фотоприемников [9—11] в этом диапазоне длин волн. Однако для создания изопериодических гетероструктур необходимо знать элементы фазовой диаграммы системы In—Ga—As—P во всем интервале E_g твердых растворов InGaAsP, изопериодических с InP. Имеющиеся в литературе данные [12—23] относятся к различным методикам эпитаксиального выращивания из жидкой фазы, различным температурно-временным режимам и ориентациям подложек. Поэтому представлялось целесообразным исследовать элементы диаграммы состояния во всем интервале составов твердых растворов InGaAsP, изопериодических с InP, в одном и том же температурно-временном режиме при одной и той же ориентации подложек. Кроме того, данная работа посвящена исследованию особенностей эпитаксиального роста InGaAsP из жидкой фазы в зависимости от технологических и кристаллографических факторов во всем диапазоне составов с целью установления оптимальных условий для выращивания излучающих и фотоприемных гетероструктур.

Методика эксперимента. Твердые растворы InGaAsP изготовлялись методом жидкостной эпитаксии в открытой системе в атмосфере водорода, очищенного диффузией через палладий из раствора-расплава Ga, As и P в индии; источником Ga служил GaAs, источником As—InAs, источником P—InP. Эпитаксиальное наращивание проводилось в режиме принудительного охлаждения. Рост осуществлялся в графитовых кассетах пенального типа, помещенных в нагреватель печи типа СДО 125/4 с тепловой трубой марки ВКТТ-45/600. Изменение температуры по длине кассеты, определенное по растворимости InP в In, не превышало $\pm 0,1^\circ\text{C}$. Скорость охлаждения изменялась от 0,17 до 2 град/мин.

В качестве подложек использовался нелегированный n -InP с концентрацией $n = (1—6) \cdot 10^{16}$ см⁻³, плотностью дислокаций $10^4—10^5$ см⁻², ориентированный по кристаллографическим плоскостям (111) *A*, (111) *B* и (100). Подложки перед эпитаксиальным наращиванием механически полировались до 12—13-го класса чистоты поверхности и затем «освежались» посредством травления в смеси HCl:HNO₃ (1:3) в течение 5—10 с при температуре 50—60°C. В ряде случаев подложки перед эпитаксиальным наращиванием подвергались металлическому травлению в In в течение 3—5 с.

Формирование раствора-расплава In—Ga—As—P проводилось следующим образом. При $T = 660^\circ\text{C}$ в In растворялись GaAs и InAs, расплав выдерживался в течение 20—30 мин, после чего насыщался фосфором при той же температуре из подложки InP в течение 30 мин. Концентрация Ga изменялась в пределах (0,078—2,8) ат.%, As — (0,8—6,8) ат.%,

* Имеются в виду следующие гетероструктуры: бинарное соединение $A_{III}B_{IV}$, тройные твердые растворы $A_{III}B_{IV}$ с прямой структурой энергетических зон.

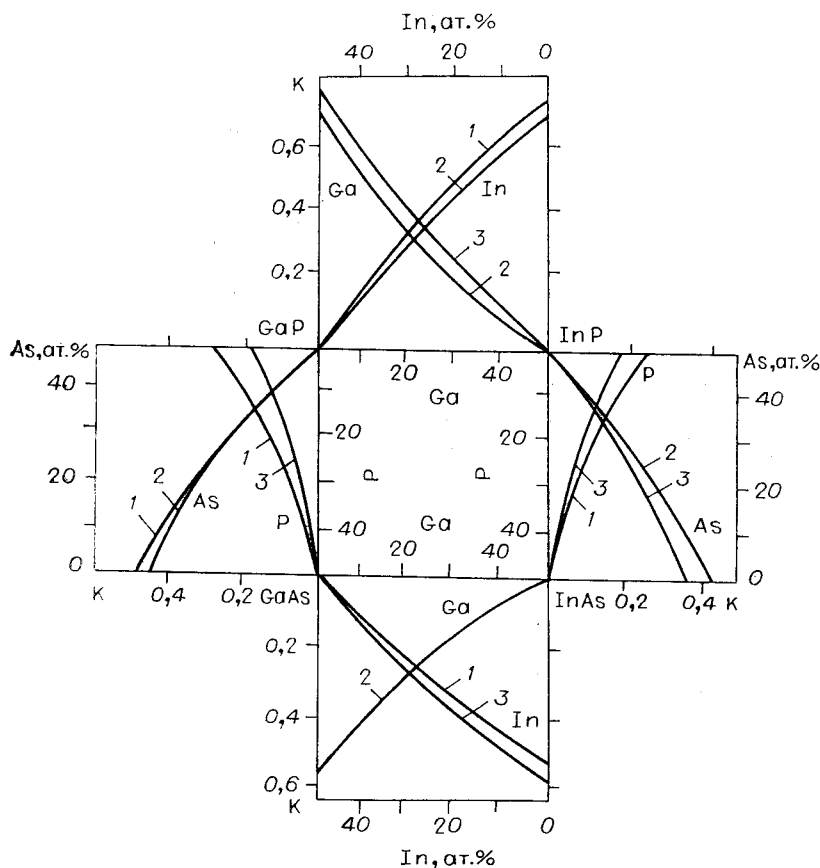


Рис. 1. Концентрационный квадрат для графического определения концентраций In, Ga, As и P в твердой фазе:
1 — 10, 2 — 15, 3 — 20 кэВ.

P — (0—0,85) ат.%, причем процентное содержание каждого элемента в жидкой фазе относилось к суммарному содержанию всех элементов.

Эпитаксиальный рост твердого раствора InGaAsP всегда проводился в интервале температур 650—645°C. Предварительно в интервале температур 660—650°C выращивался буферный слой фосфида индия. Толщина буферного слоя обычно составляла 5—10, а твердого раствора 2—3 мкм в зависимости от скорости охлаждения. Все эпитаксиальные слои преднамеренно не легировались и имели *n*-тип проводимости с $n = 5 \cdot 10^{16} - 1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$.

Исследование растворимости фосфора в расплавах In—Ga—As проводилось посредством подрастворения подложки InP при температуре 660°C в течение 30 мин, и растворимость рассчитывалась по потере веса InP.

Фотолюминесценция слоев изучалась по стандартной методике с синхронным детектированием при возбуждении He-Ne-лазером. В качестве фотоприемника использовался германиевый фотодиод. Морфология поверхности в зависимости от технологических и кристаллографических факторов исследовалась с помощью электронного растрового микроскопа JSM-50A. Рассогласование параметра решетки (Δa) твердого раствора InGaAsP и подложки InP определялось из рентгенодифракционных измерений на установке JXA-5A по методике, изложенной в [24].

Состав твердой фазы определялся с помощью рентгеноспектрального локального анализа на установках «Camebax» и JXA-5A. Расчет поправок

Ga	2—3	—	>5	—	>10
In	2—3	0,4—0,6	1,6—2,0	0,8—1,0	2,8—3,2
As	2—3	—	1,2—1,6	—	2,4—2,8
P	4—7	0,4—0,6	1,4—1,8	0,8—1,0	2,6—3,0

Примечание. N^s — концентрация элементов в твердой фазе,
 L_{\parallel} и L_{\perp} — продольная и поперечная локальности соответственно.

количественного микроанализа твердых растворов InGaAsP проводился методом «изогипс». Так как суммы концентраций In и Ga, а также P и As в этой системе равны 50% и систему можно представить в виде комбинации квазибинарных систем, концентрационный тетраэдр, применяемый в методике «изогипс», для данной четверной системы целесообразно заменить «концентрационным квадратом». Таким образом, все построения переносятся в одну плоскость, и возможно графическое определение концентраций компонентов (рис. 1). При расчете теоретических калибровочных кривых квазибинарных систем, образующих данную четверную систему, мы учитывали эффекты атомного номера, поглощение рентгеновского излучения и вторичную флуоресценцию. Применимость поправок и точность результатов анализа были проверены при исследовании бинарных соединений $A_{III}B_V$ известного состава, а также при изучении влияния различных факторов (режима работы, состава и толщины слоев и т. д.) на точность анализа. При выборе оптимальных режимов работы учитывалось влияние локальности анализа на точность. Расчет локальности проводился методом Монте-Карло [25]. В таблице приведены значения точности и локальности анализа элементов в четверной системе InGaAsP. Интервалы точности и локальности связаны с изменением состава твердых растворов. Большие величины локальности по Ga обусловлены наличием эффекта вторичной флуоресценции, в таблице приведены величины экспериментальных оценок.

Результаты и их обсуждение. Для эпитаксиального наращивания из жидкой фазы твердых растворов InGaAsP, изопериодических с InP во всем интервале составов, необходимо было прежде всего исследовать соответствующую часть фазовой диаграммы состояния системы In—Ga—As—P. В литературе, как уже отмечалось, такой информации для выбранной нами методики эпитаксиального наращивания в достаточном объеме не имеется. Расчетными же данными пользоваться невозможно, так как они сильно расходятся с экспериментальными [12, 18]. Поэтому нами было вначале проведено исследование растворимости фосфора (N_P^L) в расплавах In—Ga в зависимости от содержания в них мышьяка (N_{As}^L) при различных соотношениях Ga:In, а также N_P^L в расплавах In—As в зависимости от концентрации в них галлия (N_{Ga}^L) при различных соотношениях As:In, а затем установлена зависимость изопериодических составов твердой фазы растворов InGaAsP от составов жидкой фазы.

Данные по растворимости фосфора в In—Ga—As при 660°C крайне необходимы для формирования жидкой фазы при эпитаксиальном выращивании твердых растворов InGaAsP. Температура 660°C для исследования растворимости фосфора была выбрана на 10°C выше температуры начала эпитаксиального наращивания (650°C) твердых растворов InGaAsP для того, чтобы была возможность формировать пересыщенную жидкую

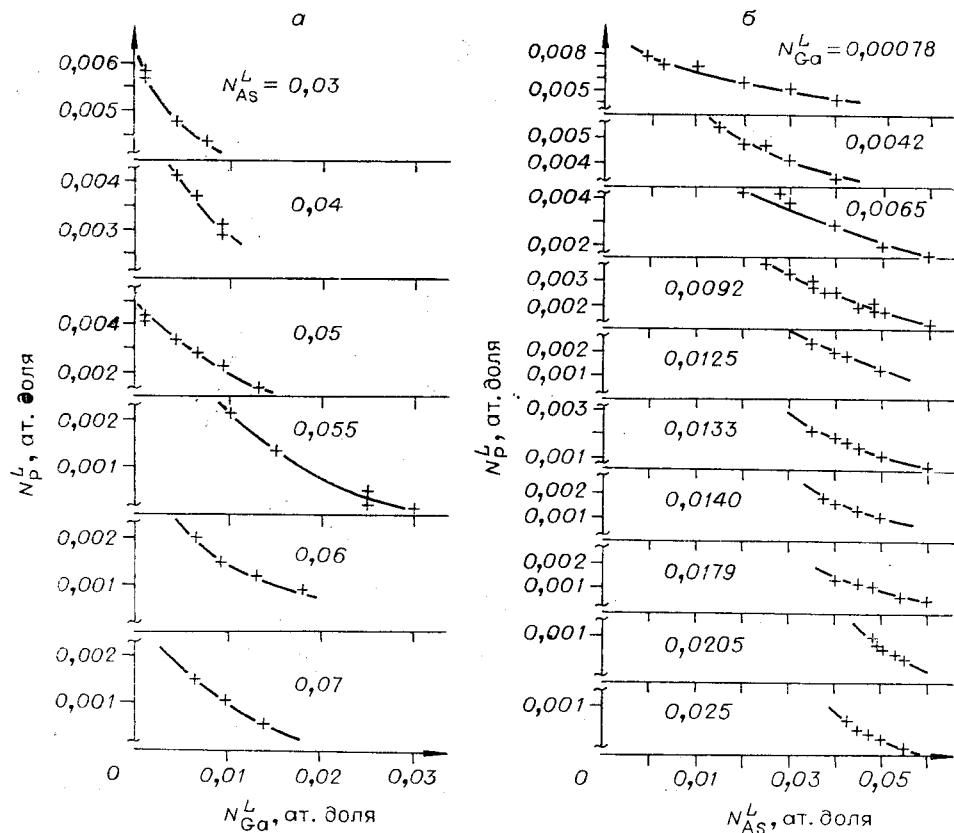


Рис. 2. Кривые растворимости фосфора в расплавах In — Ga — As:

а — в зависимости от концентрации Ga в жидкой фазе при различных фиксированных N_{As}^L ,
 б — в зависимости от концентрации As в жидкой фазе при различных фиксированных N_{Ga}^L
 при $T = 660^\circ\text{C}$.

фазу для подавления неравновесных процессов на границе раздела раствор InP — расплав InGaAsP. Результаты этих исследований для ориентации подложки (111)B представлены на рис. 2. Видно, что с увеличением концентраций N_{As}^L и N_{Ga}^L в расплаве растворимость фосфора падает, причем значительно сильнее уменьшается N_P^L при увеличении N_{Ga}^L при постоянной N_{As}^L , чем при увеличении N_{As}^L при постоянной N_{Ga}^L . Такая закономерность находится в согласии с данными [18, 23]. Из этих данных также следует, как будет показано ниже, что для установления изопериодических составов твердой фазы InGaAsP от состава жидкой фазы методом проб и ошибок более целесообразно в жидкой фазе фиксировать N_{Ga}^L и варьировать концентрацию As, а не наоборот, как поступали ряд авторов [12, 14, 16—18, 23], так как при равных изменениях ΔN_{As}^L и ΔN_{Ga}^L состав твердой фазы меняется значительно меньше в случае вариации N_{As}^L .

Исследование зависимости изопериодических составов твердой фазы растворов InGaAsP от состава жидкой фазы проводилось для двух ориентаций подложек InP — (111)B и (100). Формирование жидкой фазы осуществлялось на основании данных по растворимости фосфора в In—Ga—As. Причем при фиксированной N_{Ga}^L в достаточно широких пределах варьировалась концентрация As в жидкой фазе. Нелегированные эпитаксиальные слои InGaAsP всегда наращивались на буферный

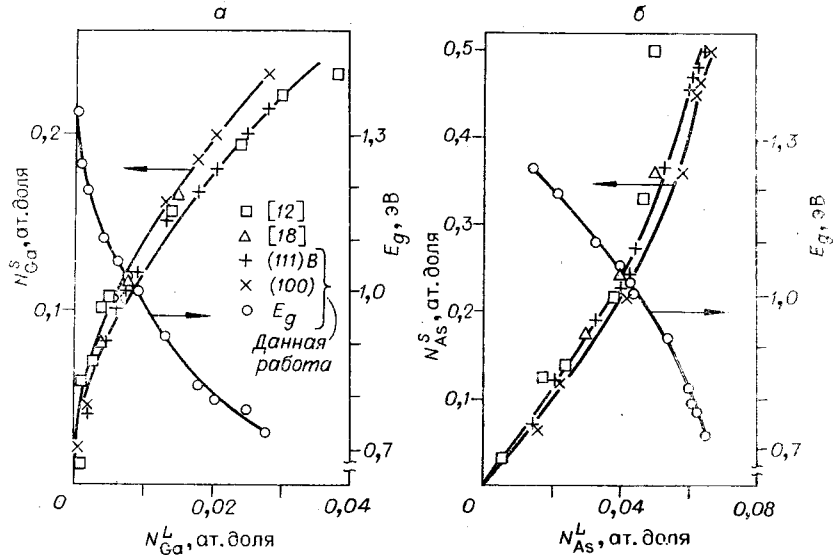


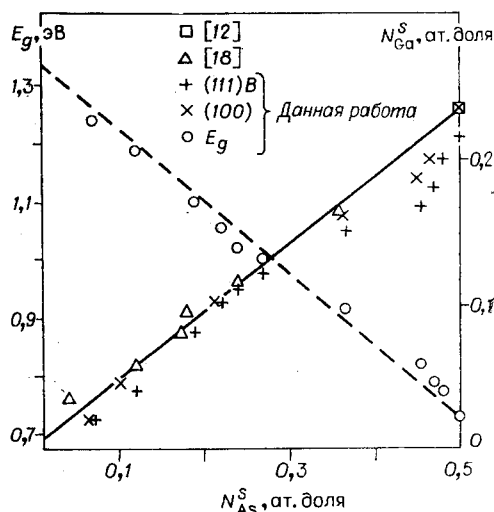
Рис. 3. Зависимости концентрации Ga в твердой фазе и ширины запрещенной зоны от концентрации Ga в жидкой фазе (а) и концентрации As в твердой фазе и E_g от концентрации As в жидкой фазе (б) для твердых растворов InGaAsP, изопериодических с InP на ориентациях (111)В и (100) при $T=650^\circ\text{C}$.

слой InP. Толщина слоев InGaAsP составляла обычно 2—3 мкм. Для установления изопериодических составов InGaAsP и ширины их запрещенной зоны исследовались состав твердой фазы слоев, рассогласование параметров решетки слоя и InP ($\Delta a = a_{\text{сл}} - a_{\text{п}}$) и фотолюминесценция при 300 и 77 К. О ширине запрещенной зоны судилось по максимуму краевой полосы люминесценции с учетом энергии связи экситона. Изопериодические слои InGaAsP при 77 К имели полуширину ($\Delta h\nu$) краевой полосы излучения заметно увеличивалась, особенно при отрицательном рассогласовании параметра решетки. Следует отметить, что слои твердых растворов InGaAsP на подложках с ориентациями (111)В и (100) наращивались в одной ячейке графитовой кассеты из одного и того же состава жидкой фазы. Однако состав твердой фазы и ширина запрещенной зоны на обеих ориентациях при всех составах жидкой фазы различались. Ширина запрещенной зоны слоев с ориентацией (100) была в среднем на 20 мэВ больше, чем слоев с ориентацией (111)В. Этот факт, по-видимому, как и в [26], обусловлен различным ориентирующим действием разных кристаллографических плоскостей.

На рис. 3, а представлены экспериментальные зависимости концентрации Ga в твердой фазе (N_{Ga}^S) и ширины запрещенной зоны (E_g) от концентрации Ga в жидкой фазе, а на рис. 3, б — зависимости концентрации As в твердой фазе (N_{As}^S) и E_g от N_{As}^L для твердых растворов InGaAsP, изопериодических с InP для (111)В и 100 ориентаций. На этих же рисунках приведены данные [12, 18] для ориентации (111)В и близких температурно-временных режимов эпитаксиального наращивания. Некоторое расхождение в экспериментальных данных, по-видимому, можно объяснить разницей температурно-временных режимов и методическими погрешностями измерений разных авторов. Однако приведенные данные могут служить основой для получения слоев InGaAsP, изопериодических с InP.

На рис. 4 приведены зависимость составов твердой фазы для изопериодических твердых растворов InGaAsP, рассчитанная по закону Ве-

Рис. 4. Расчетная (штриховая линия) и экспериментальная зависимости E_g от состава твердой фазы InGaAsP, изопериодического с InP, и расчетная (сплошная линия) и экспериментальная зависимости для изопериодических твердых растворов InGaAsP.



гарда (сплошная кривая), наши экспериментальные данные для ориентаций (111)B и (100) и данные работ [12, 18]. На этом же рисунке штриховой линией показаны расчетная зависимость E_g от состава твердой фазы InGaAsP, изопериодической с InP [27], и наши экспериментальные данные. Расхождение экспериментальных и расчетных данных обусловлено отклонением реальных твердых растворов от закона Вегарда [19]. Очень часто в тонких эпитаксиальных слоях рассогласование параметра элементарной ячейки подложки и слоя не приводит к появлению дислокаций несоответствия, а происходит однородная упругая деформация эпитаксиального слоя [28]. При этом постоянные элементарной ячейки эпитаксиального слоя представляют собой величину анизотропную. Так, например, в случае сжатия эпитаксиального слоя постоянная элементарной ячейки больше в направлении, перпендикулярном (a_{\perp}), и меньше в направлении, параллельном (a_{\parallel}) гетерогранице. Рентгенодифракционные и рентгенотопографические исследования гетероструктур InP—InGaAsP показали, что в эпитаксиальных слоях с $\Delta a_{\perp} = 0,0010$ нм линейная плотность дислокаций несоответствия была на уровне 10^2 см $^{-1}$, что соответствовало $\Delta a_{\parallel} = 0,000003$ нм. Это явление связано с частичной релаксацией упругих напряжений в исследуемых структурах. Рис. 5 иллюстри-

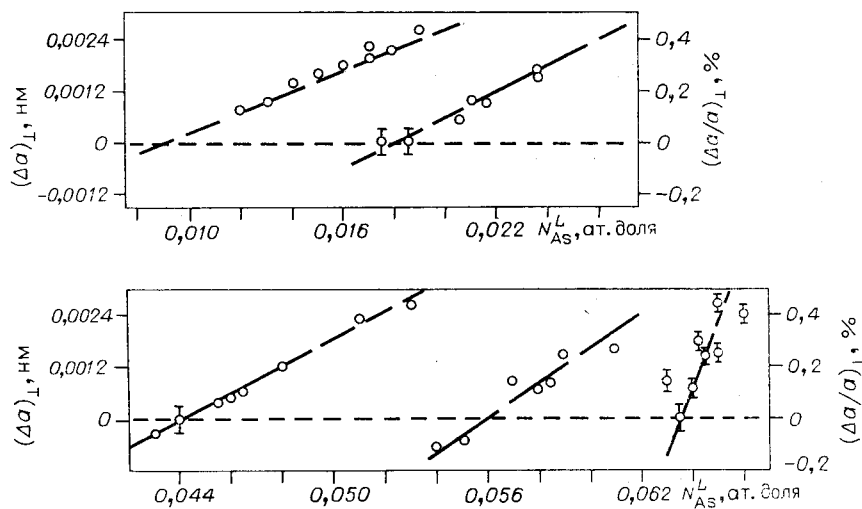


Рис. 5. Зависимость перпендикулярной составляющей рассогласования решетки (Δa_{\perp}) от N_{As}^L для различных фиксированных N_{Ga}^L .

Ширина запрещенной зоны изопериодических твердых растворов для $N_{Ga}^L = 0,00078$ ат. дол — 1,24; 0,002 — 1,19; 0,0092 — 1,00; 0,0133 — 0,91; 0,028 — 0,73 эВ. Штриховая линия — постоянная решетки InP.

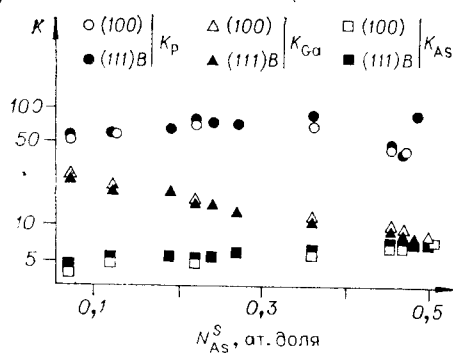


Рис. 6. Зависимость коэффициентов распределения галлия, мышьяка и фосфора от концентрации As в твердой фазе для (111)B и (100) ориентаций при $T=650^\circ\text{C}$.

N_{As}^L в жидкой фазе, так как в этом случае параметр решетки твердой фазы изменяется более плавно, чем при обратной ситуации.

Поведение коэффициентов распределения Ga (K_{Ga}), As (K_{As}) и P (K_{P}) в зависимости от ориентации подложки и концентрации As в твердой фазе показано на рис. 6. Видно, что K_{As} и K_{P} по мере увеличения N_{As}^S растут для обеих ориентаций: от 4—5 до 8 для K_{As} и от 50—60 до 90 для K_{P} . В то же время K_{Ga} падает от 25—28 до 7—8 и для тройного твердого раствора $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ становится близким к значению K_{As} . Что касается зависимости коэффициентов распределения от ориентации подложки, то, резюмируя наши данные и данные [13] для эпитаксиального наращивания в режиме принудительного охлаждения от 650°C , можно заметить, что они изменяются следующим образом: для Ga $K_{(111)\text{A}} \approx K_{(100)} > K_{(111)\text{B}}$, а для As и P $K_{(111)\text{A}} \approx K_{(100)} < K_{(111)\text{B}}$. Заметим также, что при эпитаксиальном наращивании в режиме принудительного охлаждения, особенно при больших интервалах охлаждения, следует считаться с достаточно сильной температурной зависимостью коэффициентов распределения As и P [15, 20], приводящей к градиенту состава.

Исследование спектров фотолюминесценции эпитаксиальных слоев InGaAsP, выращенных из одной и той же жидкой фазы на разных ориентациях подложек — (111)A, (111)B и (100), — показало, что энергия максимума краевой полосы излучения в этом ряду изменяется следующим образом:

$$h\nu_{(111)\text{A}} \approx h\nu_{(100)} > h\nu_{(111)\text{B}}.$$

В данной работе изучалось также влияние технологических и кристаллографических факторов на морфологию поверхности эпитаксиальных слоев. На начальном этапе исследований было установлено, что более совершенной морфологией обладают слои твердых растворов, осажденные на предварительно выращенный буферный слой InP толщиной 5—10 мкм. В этом случае наблюдается и более эффективная люминесценция (в 2—3 раза выше, чем без буферного слоя) [21, 29]. Кроме того, было установлено, что наилучшие результаты с точки зрения структурного совершенства и морфологии поверхности получаются в случае химического травления подложки на глубину 10—15 мкм после механической полировки либо после металлического травления в In перед эпитаксиальным наращиванием. Что касается кристаллографической ориентации, то лучшая морфология поверхности слоя, как было показано нами ранее [21], получается при ориентациях подложки (111)B и (100). Разориентация подложки также сильно сказывается на морфологии слоя. Так, разориентация в 1° уже приводит к образованию волн и террас и непланарности границы раздела слой — подложка.

Рассогласование параметров решетки слоя и подложки приводит как к непланарной границе раздела слой — подложка, так и к ухудшению морфологии поверхности. При $(\Delta a/a)_\perp > 0,5\%$ на подложке либо вообще не наблюдается эпитаксиального роста, либо вырастают пирамиды и нет



Рис. 7. Электронная микрофотография поверхности твердых растворов $\text{In}_{0,76}\text{Ga}_{0,24}\text{As}_{0,54}\text{P}_{0,46}$ на (111)В InP и границы раздела буферный слой — твердый раствор на сколе с различным рассогласованием параметра решетки $\Delta a_{\perp}/a$, %:

а — $-0,25$; б — ≈ 0 ; в — $+0,25$.

сплошного слоя. При $(\Delta a/a)_{\perp} \leq -0,1\%$ слои получают сильно напряженными (растянутыми), при $(\Delta a/a)_{\perp} = -(0,2 - 0,3)\%$ на поверхности слоев появляются трещины. Морфологию поверхности слоев и границы раздела слой — подложка для различного рассогласования иллюстрирует рис. 7.

Следует заметить, что скорость роста слоя в значительной степени влияет на морфологию поверхности. Как было показано нами ранее [30], с уменьшением скорости роста морфология улучшается.

На рис. 8 представлена электронная микрофотография на отражение скола двойной лазерной гетероструктуры с изопериодическими эмиттерами InGaAsP с $E_g = 1,2$ эВ и активной областью InGaAsP с $E_g = 0,95$ эВ. В этой связи хотелось бы отметить, что обычно при выборе эмиттеров все авторы отдают предпочтение InP из-за простоты их выращивания. Однако, кроме согласования параметров решетки, следует принимать во внимание различия коэффициентов термического расширения, которые согласно [31] для InP составляют $(4,56 \pm 0,10) \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, для $\text{In}_{0,14}\text{Ga}_{0,26}\text{As}_{0,60}\text{P}_{0,40}$ — $(5,42 \pm 0,10) \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ и для $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ — $(5,66 + 0,10) \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Поэтому предпочтительнее эмиттеры из твердых растворов InGaAsP, например, с E_g 1,2—1,25 эВ. В гетеролазерах с эмиттерами из InGaAsP нами были достигнуты пороговые плотности тока $J_{\text{пор}} \sim 1 \text{ кА/см}^2$ [6, 7] на длине волны 1,3 мкм.

Заключение. Основные результаты работы сводятся к следующему.

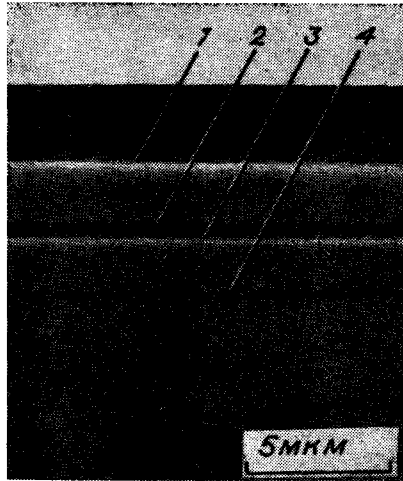


Рис. 8. Электронная микрофотография скола двойной лазерной гетероструктуры с активной областью и эмиттерами из InGaAsP. 1 — $\text{In}_{0,96}\text{Ga}_{0,04}\text{As}_{0,12}\text{P}_{0,88}$: Mg, 2 — $\text{In}_{0,76}\text{Ga}_{0,24}\text{As}_{0,54}\text{P}_{0,46}$, 3 — $\text{In}_{0,96}\text{Ga}_{0,04}\text{As}_{0,12}\text{P}_{0,88}$: Sn, 4 — InP (111) В.

1. Исследована растворимость Р в расплавах In—Ga—As при 660°C в пределах 0—0,85 ат. % при различных соотношениях In : Ga : As, необходимых для формирования жидкой фазы In—Ga—As—Р при получении эпитаксиальных слоев твердых растворов InGaAsP, изопериодических с InP во всем интервале E_g (0,73 — 1,35 эВ) для (111)В ориентации.

2. Изучена зависимость состава твердой фазы InGaAsP, ширины запрещенной зоны от состава жидкой фазы во всем интервале изопериодических твердых растворов для (111)В и (100) ориентаций при температуре начала эпитаксиального наращивания 650°C .

3. Установлены коэффициенты распределения Ga, As и Р во всем интервале изопериодических твердых растворов InGaAsP для (111)В и (100) ориентаций.

4. Исследована морфология поверхности слоев и границы раздела слоев — подложка в зависимости от различных кристаллографических и технологических факторов.

5. Предложено при создании гетероструктур для лучшего согласования коэффициентов термического расширения в качестве эмиттеров использовать твердые растворы InGaAsP вместо InP.

В заключение авторы выражают искреннюю благодарность Ж. И. Алферову за постоянный интерес и внимание к работе, Д. З. Гарбузову и П. С. Копьеву за полезные дискуссии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Alferov Zh. I. et al. Heterojunction of the Base of AmBv Semiconducting Compounds and of Their Solid Solutions.— In: Intern. Conf. on the Physics and Chemistry of Semiconductors Heterojunctions and Layer Structures. Proc. of the Conf. Budapest, 1971, vol. 1, p. 93.
2. Kimura T., Daikoku K. A Proposal on Optical Fibre Transmission Systems in a Low-Loss 1,0—1,4 mm Wavelength Region.— Opt. Quant. Electron., 1977, vol. 9, N 1.
3. Алферов Ж. И. и др. Волоконно-оптическая линия передачи сигналов для систем дальней связи на длине волны 1,3 мкм.— Квант. электроника, 1978, т. 5, № 11.
4. Богатов А. П. и др. Излучательные характеристики лазерных гетероструктур на основе InP — InGaPAs.— ФТП, 1975, т. 9, № 10.
5. Алферов Ж. И. и др. Низкопороговые лазеры на основе гетероструктур в системе In — Ga — As — P.— Письма в ЖТФ, 1977, т. 3, № 22.
6. Алферов Ж. И. и др. Инжекционные гетеролазеры в системе InGaAsP с длиной волны 1,3—1,5 мкм.— Письма в ЖТФ, 1978, т. 4, № 22.
7. Алферов Ж. И. и др. Гетеролазеры непрерывного действия в системе InGaAsP.— Изв. АН СССР. Сер. Физика, 1979, т. 43, № 7, с. 1447.
8. Yamamoto T., Sakai K., Akiba S. 10000-h Continuous C. W. Operation of $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}/\text{InP}$ DH Lasers at Room Temperature.— IEEE J. Quant. Electron., 1979, vol. QE-15, N 8.
9. Долгинов Л. М. и др. Фотоэлектрические свойства гетероструктур на основе четырехкомпонентного раствора $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}_{1-y}\text{As}_y$ с высокой квантовой эффективностью на длине волны 1060 нм.— Письма в ЖТФ, 1976, т. 2, № 14.
10. Алферов Ж. И. и др. Излучательные и фотоэлектрические свойства гетероструктур InP — InGaAsP.— В кн.: Тез. докл. Всесоюз. научно-техн. совещания «Дальнейшее развитие оптоэлектроники». М., 1977, с. 29.

11. Nishido K., Taguchi K., Matsumoto Y. InGaAsP Heterostructure Avalanche Photodiodes with High Avalanche Gain.— Appl. Phys. Lett., 1979, vol. 35, N 3.
12. Sankaran R. et al. Growth and Characterization of InGaAsP — InP Lattice-Matched Heterojunctions.— J. Vac. Sci. Technol., 1976, vol. 13, N 4.
13. Antypes G. A., Shen L. Y. Orientation Dependence of the Incorporation of Ga, As and Zn During LPE Growth of InGaAsP Alloys.— In: GaAs and Related Compounds, 1976. Conf. Ser. N 336. London: Inst. of Physics and Phys. Soc., 1977, p. 96.
14. Oe K., Sugiyama K. Orientation Effects in the LPE Growth of GaInAsP Quaternary Alloys.— Appl. Phys. Lett., 1978, vol. 33, N 5.
15. Antypes G. A., Edgecumbe J. Distribution Coefficients of Ga, As and P During Growth of InGaAsP Layers by Liquid-Phase Epitaxy.— J. Cryst. Growth, 1976, vol. 34, p. 132.
16. Pollack M. A., Nahory R. E., De Winter J. C., Ballman A. A. Liquid Phase Epitaxial $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ Lattice Matched to $\langle 100 \rangle$ InP over the Complete Wavelength Range $0,92 \leq \lambda \leq 1,65$ μm .— Appl. Phys. Lett., 1978, vol. 33, N 4.
17. Sakai K., Matsushima Y., Akiba S., Yamamoto T. Growth of $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ on $\langle 100 \rangle$ — Oriented InP from Supercooled Solution.— Jap. J. Appl. Phys., 1979, vol. 18, N 5.
18. Nakajima K., Kusumoki T., Akita K., Kotani T. Phase Diagram of the InGaAsP Quaternary System and LPE Growth Conditions for Lattice Matching on InP Substrates.— J. Electrochem. Soc. Solid-State Sci. and Technol., 1978, vol. 125, N 1.
19. Nahory R. E., Pollack M. A., Johnson W. D. Band Gap Versus Composition and Demonstration of Vegard's Law for $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ — Lattice Matched to InP.— Appl. Phys. Lett., 1978, vol. 33, N 7.
20. Coleman J. J. Arsenic and Gallium Distribution Coefficients in Liquid-Phase Epitaxial $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}_y\text{As}_{1-y}$.— Appl. Phys. Lett., 1978, vol. 32, N 6.
21. Гореленок А. Т. и др. Эпитаксиальные твердые растворы в системе GaInAsP с шириной запрещенной зоны 0,75—1,25 эВ.— В кн.: Тез. докл. Всесоюз. конф. по физике полупроводниковых соединений А³В⁵, 21 октября 1978. Л., 1978.
22. Годлиник Т. Б. и др. Излучательные и фотоэлектрические свойства гетероструктур InP — InGaAsP.— В кн.: Тез. докл. Всесоюз. научно-техн. совещания «Дальнейшее развитие оптоэлектроники». М., 1977.
23. Antypes G. A., Moon R. L. Growth and Characterization of GaInAsP — InP Lattice-Matched Heterojunctions.— J. Electrochem. Soc. Solid-State Sci. and Technol., 1973, vol. 120, N 11.
24. Берг Н. А., Конников С. Г., Уманский В. Е. Рентгеноструктурные исследования гетероэпитаксиальных слоев с помощью электронного зонда.— Автометрия, 1980, № 6.
25. Годлиник Т. Б., Гунько Н. А., Конников С. Г., Тропи Э. А. Определение локальности микрорентгеноспектрального анализа полупроводниковых соединений Al_mB_n методом Монте-Карло.— В кн.: Материалы 7-й Междунар. конф. по оптике рентгеновских лучей и микроанализу. Москва — Киев, 1974. Л.: Машиностроение, 1976.
26. Абрамов А. В. и др. Люминесцентные свойства и некоторые особенности выращивания из растворов-расплавов твердых растворов $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}$.— Письма в ЖТФ, 1976, т. 2, № 5.
27. Moon R. L., Antypes G. A., James L. W. Band Gap and Lattice Constant of GaInAsP as a Function of Alloy Composition.— J. Electron. Mater., 1974, vol. 3, p. 635.
28. Oe K., Shinoda Y., Sugiyama K. Lattice Deformations and Misfit Dislocations in GaInAsP/InP Double-Heterostructure Layers.— Appl. Phys. Lett., 1978, vol. 33, N 11.
29. Гореленок А. Т., Копьев П. С., Тарасов И. С., Тибилев В. К. Люминесцентные свойства твердых растворов InGaAsP и гетероструктур на их основе.— В кн.: Тез. докл. II Всесоюз. конф. по физ. процессам в полупроводниковых гетеропереходах, III. Ашхабад, 1978.
30. Алферов Ж. И. и др. Электронно-зондовые исследования многокомпонентных систем на основе соединений Al_mB_n .— In: Beiträge zur 4. Tagung Mikrosonde. Dresden, 1978, p. 122.
31. Bisaro R., Herenda P., Pearsall T. P. The Thermal-Expansion Parameters of Some $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ Alloys.— Appl. Phys. Lett., 1979, vol. 34, N 1.

Поступила в редакцию 22 декабря 1979 г.