

образом, чтобы осуществить генерацию ионов заданного диапазона энергий в центре плазменного шнура. Реализации эффективного нагрева должно способствовать поддержание концентрации плазмы в процессе ВЧ импульса на одном уровне.

### Список литературы

- [1] Голант В. Е., Федоров В. И. // Высоочастотные методы нагрева плазмы в тороидальных термоядерных установках. М.: Энергоатомиздат, 1986. С. 116—141.
- [2] Porkolab M., Schuss J., Takase Y. et al. // Proc. 2<sup>nd</sup> Joint Grenoble-Varenna International Symposium. Como, 1980. Vol. 1. P. 355—365.
- [3] Eckhardt D., Leuterer F., Söldner F. et al. // 12<sup>th</sup> European Conf. on Controlled Fusion and Plasma Physics. Budapest, 1985. Pt. 2. P. 678—680.
- [4] Budnikov V. N., Dyachenko V. V., Esipov L. A. et al. // 15<sup>th</sup> European Conf. on Controlled Fusion and Plasma Heating. Dubrovnik, 1988. Pt. III. P. 900—903.

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

Поступило в Редакцию  
27 сентября 1988 г.

06; 12

Журнал технической физики, т. 59, в. 8, 1989

## ДВОЙНОЕ ИЗОВАЛЕНТНОЕ ЛЕГИРОВАНИЕ АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ ВИСМУТОМ И ИНДИЕМ

В. В. Воробьева, О. В. Зушинская, С. В. Новиков, И. Г. Савельев, В. В. Чалдышев

В последние годы интенсивно исследуются возможности снижения концентрации остаточных фоновых примесей в эпитаксиальных слоях полупроводниковых соединений  $A^3B^5$  путем изоваalentного легирования [1]. Показано, что при эпитаксии слоев арсенида галлия из растворов-расплавов в висмуте можно получить значительно более чистый материал, нежели из растворов-расплавов в галлии при тех же экспериментальных условиях [2—4]. Кроме того, известно, что легирование слоев арсенида галлия индием при выращивании из галлиевых растворов-расплавов также влияет на концентрацию фоновых примесей [5—7].

В данной работе приводятся результаты экспериментального исследования двойного легирования арсенида галлия висмутом и индием.

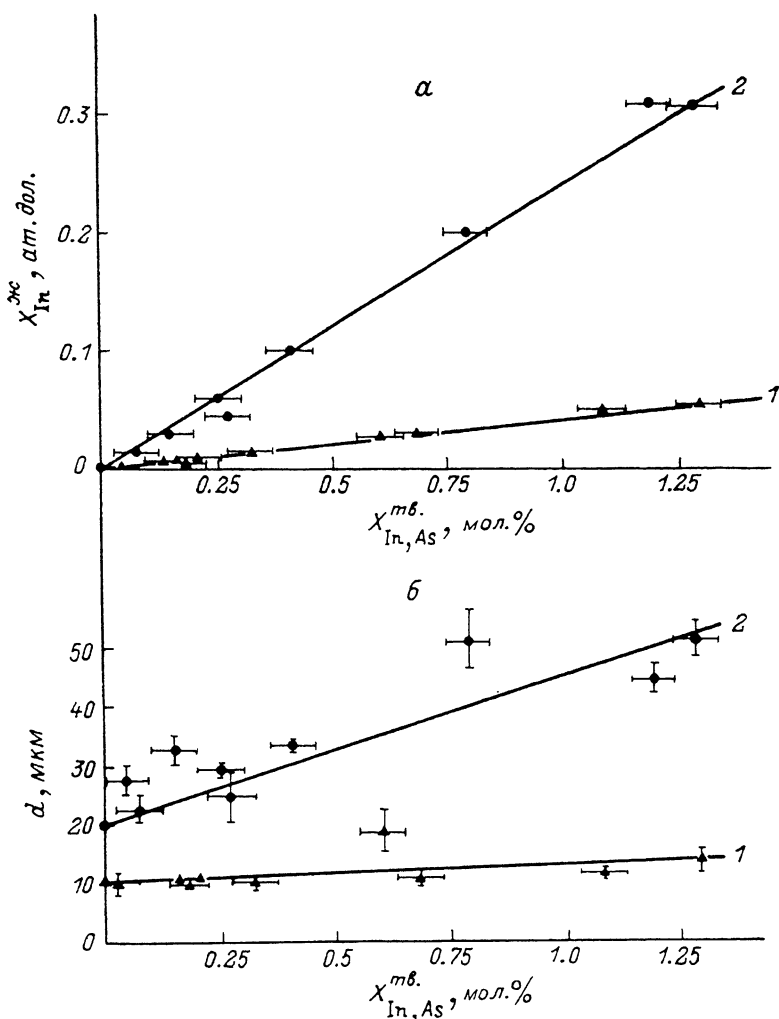
Слой арсенида галлия выращивались методом жидкофазной эпитаксии на полуизолирующих подложках GaAs с ориентацией (100) по технологии, аналогичной [4]. Температура начала эпитаксии 800 °С, интервал охлаждения 50 °С при скорости ~0.45 град/мин. В качестве растворителя при формировании раствора-расплава использовались либо чистый галлий, либо чистый висмут. Количество индия варьировалось в пределах, обеспечивающих получение слоев с содержанием InAs от 0 до 1.3 мол.%. При варьировании состава жидкой фазы ее масса поддерживалась постоянной во всех экспериментах.

Исследования электропроводности и эффекта Холла проводились при 77 и 300 К. Содержание индия в слоях ( $X_{InAs}^{Tb}$ , мол.%) определялось по энергетическому сдвигу спектра фотолюминесценции при 4.2 К относительно спектра, не легированного индием арсенида галлия  $\Delta h\omega$  (мэВ) по соотношению [8]  $X_{InAs}^{Tb} = \Delta h\omega / 15,9$ . Спектры фотолюминесценции исследовались по методике [4] с разрешением не хуже 0.5 мэВ.

На рисунке, а представлены зависимости  $X_{InAs}^{Tb}$  в слоях, выращенных из галлиевого (2) и висмутового (1) растворов-расплавов, от содержания индия в жидкой фазе. В обоих случаях наблюдается линейная зависимость, характерная для примесей в соединениях  $A^3B^5$  [9]. Из рисунка, а следует, что эффективный коэффициент сегрегации индия  $K_{эфф}$  при выращивании из висмутового раствора-расплава (0.17—0.19) примерно на порядок превышает  $K_{эфф}$  при выращивании из галлиевого растворителя (0.018—0.020). Причиной этого является существенно меньшее (практически на полтора порядка) количество Ga в жидкой фазе в случае висмутового раствора-расплава.

На рисунке, б представлены зависимости толщин полученных слоев от содержания индия. Толщина слоев, не легированных индием и выращенных из галлиевого раствора-расплава,

вдвое больше, чем для слоев, выращенных из раствора-расплава в висмуте. Причина этого явления состоит в том [4], что в висмутовых растворах-расплавах эффективный коэффициент диффузии мышьяка и высота жидкой фазы при равной массе меньше, чем в галлиевых растворах-расплавах, а растворимость мышьяка в галлии и висмуте практически одинакова [10]. Из рисунка, б видно, что индий слабо влияет на толщину слоев, выращиваемых из висмутовых растворов-расплавов. Это, по-видимому, связано с крайне низким содержанием индия в жидкой фазе (большой  $K_{\text{эфф}}$ ) (рисунок, а) и вследствие этого его малым влиянием на раство-



Зависимости от содержания индия в слоях  $X_{\text{InAs}}^{\text{ж}}$  содержания индия в жидкой фазе (а) и толщины слоев (б).

1 — раствор-расплав на основе висмута, 2 — на основе галлия.

римость мышьяка и процессы массопереноса. Напротив, при использовании галлиевого растворителя наблюдается линейное увеличение толщины слоев в  $\sim 2.5$  раза с возрастанием содержания InAs в твердой фазе от 0 до 1.3 мол.%. В этом случае  $K_{\text{эфф}}$  индия мал и концентрация индия в растворе-расплаве достигает 0.3 ат. дол. (рисунок, а), что приводит к существенным изменениям параметров жидкой фазы: повышению растворимости мышьяка [9] и изменению коэффициентов диффузии компонентов.

Типичные электрофизические параметры образцов с различным содержанием индия, выращенных из галлиевых и висмутовых растворов-расплавов, приведены в таблице. Видно, что концентрация свободных электронов ниже, а их подвижность выше в слоях, выращенных из растворов-расплавов в висмуте. Причины указанной «очистки» рассматривались ранее в [2-4]. Зависимость электрофизических параметров от уровня легирования индием существ.

венно немонотонна и качественно подобна для образцов, выращенных как из висмутовых, так и из галлиевых растворов-расплавов. Малые добавки индия приводят к некоторому увеличению концентрации электронов и уменьшению их подвижности по сравнению с нелегированными образцами. Однако при большем содержании индия  $X_{\text{InAs}}^{\text{TB}} \sim 0.25$  мол. % концентрация электронов уменьшается примерно на порядок, а их подвижность существенно возрастает. Следует отметить, что при указанной концентрации индия подвижность электронов выше, а их концентрация ниже, чем в слоях, индием не легированных. При дальнейшем увеличении содержания индия электрофизические параметры материала ухудшаются примерно до уровня не легированных индием образцов и в диапазоне  $0.3 < X_{\text{InAs}}^{\text{TB}} < 1.3$  мол. % изменяются относительно слабо.

Растворитель	$X_{\text{InAs}}^{\text{TB}}$ , мол. %	$n$ , см <sup>-3</sup>		$\mu$ , см <sup>2</sup> /В	
		77 К	300 К	77 К	300 К
Ga	0	$2.3 \cdot 10^{16}$	$2.3 \cdot 10^{16}$	11000	7900
Bi	0	$3.1 \cdot 10^{14}$	$2.3 \cdot 10^{14}$	42000	5600
Ga	0.044	$4.3 \cdot 10^{16}$	$6.0 \cdot 10^{16}$	8500	3700
Bi	0.044	$1.0 \cdot 10^{15}$	$1.2 \cdot 10^{15}$	31000	6000
Ga	0.27	$5.5 \cdot 10^{15}$	$6.6 \cdot 10^{15}$	19000	5500
Bi	0.21	$9.5 \cdot 10^{13}$	$5.5 \cdot 10^{13}$	67000	6300
Ga	0.36	$2.0 \cdot 10^{16}$	$2.5 \cdot 10^{16}$	10000	5000
Bi	0.32	$1.7 \cdot 10^{15}$	$1.6 \cdot 10^{15}$	36000	6200
Ga	0.79	$2.4 \cdot 10^{16}$	$3.2 \cdot 10^{16}$	10000	5300
Bi	0.68	$9.1 \cdot 10^{14}$	$3.4 \cdot 10^{14}$	43000	6300
Ga	1.28	$1.2 \cdot 10^{16}$	$1.6 \cdot 10^{16}$	14000	5500
Bi	1.29	$7.1 \cdot 10^{14}$	$5.0 \cdot 10^{14}$	29000	5900

Подобная описанной выше зависимость концентрации свободных электронов от уровня легирования индием наблюдалась ранее [11] для образцов, полученных жидкофазной эпитаксией из галлиевых растворов-расплавов. Авторы [11] высказали предположение, что наличие особенности в зависимости концентрации электронов от уровня легирования индием при  $X_{\text{InAs}}^{\text{TB}} \sim 0.2$  мол. % ( $[\text{In}]_T \sim 5 \cdot 10^{19}$  см<sup>-3</sup>) связано с локальными упругими напряжениями, создаваемыми изовалентными примесями в кристаллах. Возможна, однако, и альтернативная точка зрения, согласно которой изменения электрофизических параметров материала могут быть связаны с изменением свойств жидкой фазы и процессов роста кристаллов [1]. Подобный подход позволяет, например, понять изменение свойств эпитаксиальных слоев, выращенных из галлиевых, висмутовых и смешанных галлий-висмутовых растворов-расплавов [4].

Для понимания механизма воздействия индия на электрофизические свойства арсенида галлия представляют интерес следующие экспериментальные факты: зависимости концентрации и подвижности свободных электронов от уровня легирования индием качественно подобны для двух исследованных серий образцов и не зависят от химической природы растворителя; минимум концентрации электронов и максимум их подвижности для обеих серий образцов имеют место при одном и том же содержании индия в твердой фазе, соответствующие концентрации индия в жидкой фазе для галлиевых и висмутовых растворов-расплавов отличаются на порядок. На основании этих экспериментальных фактов можно заключить, что эффект повышения подвижности и снижения концентрации свободных электронов при легировании арсенида галлия индием, по-видимому, обусловлен процессами, происходящими в твердой фазе.

Таким образом, проведенные исследования показали, что физические механизмы воздействия изовалентных примесей индия и висмута на ансамбль дефектов и фоновых примесей в арсениде галлия различны. Влияние висмута обусловлено в основном изменениями свойств жидкой фазы [4], а индия — процессами, происходящими в кристалле. Совместное легирование арсенида галлия индием и висмутом в процессе жидкофазной эпитаксии позволяет в идентичных технологических условиях получать слои с более высокими электрофизическими параметрами по сравнению с нелегированными слоями или слоями, легированными отдельно индием или висмутом.

Авторы благодарны Ю. В. Шмарцеву, Т. А. Полянской, Л. В. Голубеву, Ю. Ф. Бирюлину за полезные обсуждения.

- [1] Баженов В. К., Фистуль В. И. // ФТП. 1984. Т. 18. Вып. 8. С. 1345—1362.  
 [2] Ганина Н. В., Уфимцев В. Б., Фистуль В. И. // Письма ЖТФ. 1982. Т. 8. Вып. 10. С. 620—623.  
 [3] Бирюлин Ю. Ф., Голубев Л. В., Новиков С. В. и др. // ФТП. 1987. Т. 21. Вып. 5. С. 949—952.  
 [4] Бирюлин Ю. Ф., Воробьева В. В., Голубев В. Г. и др. // ФТП. 1987. Т. 21. Вып. 12. С. 2201—2209.  
 [5] Соловьева Е. В., Рытова Н. С., Мильвидский М. Г., Ганина Н. В. // ФТП. 1981. Т. 15. Вып. 11. С. 2141—2146.  
 [6] Соловьева Е. В., Мильвидский М. Г., Ганина Н. В. // ФТП. 1982. Т. 16. Вып. 10. С. 1810—1815.  
 [7] Бирюлин Ю. Ф., Ганина Н. В., Чалдышев В. В., Шмарцев Ю. В. // ФТП. 1985. Т. 19. Вып. 6. С. 1104—1107.  
 [8] Yu P. W., Walters D. C., Mitchel W. C. // J. Appl. Phys. 1986. Vol. 60. N 11. P. 3864—3867.  
 [9] Уфимцев В. Б., Акчурич Р. Х. Физико-химические основы жидкофазной эпитаксии. М.: Металлургия. 1983. 224 с.  
 [10] Якушева Н. А., Чижичев С. И. // Изв. АН СССР. Сер. Неорганич. материалы. 1987. Т. 23. № 10. С. 1607—1609.  
 [11] Соловьева Е. В., Мильвидский М. Г. // ФТП. 1983. Т. 17. Вып. 11. С. 2022—2024.

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

Поступило в Редакцию  
 21 ноября 1988 г.

## МОДУЛЯЦИЯ МЕССБАУЭРОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИМ СИГНАЛОМ В ПРИСУТСТВИИ СИЛЬНЫХ ШУМОВ

Н. В. Табриян, А. А. Мартиросян

1. В настоящее время развиты многие области применения эффектов акустической модуляции мессбауэровского излучения (см., например, обзоры [1, 2]). Как известно, характер ультразвуковой (УЗ) модуляции спектра мессбауэровского излучения определяется соотношением между тремя временными параметрами [3]: временем жизни возбужденного ядерного уровня  $\tau_N \sim \Gamma^{-1}$ , временем когерентности УЗ  $\tau_s \sim (\Delta\Omega)^{-1}$  ( $\Delta\Omega$  — разброс частот УЗ) и временем измерения  $\tau_m$ . Если центральная частота УЗ  $\Omega \gg \Gamma$ , то конечность ширины линии  $\gamma$ -излучения можно не принимать во внимание. Тогда при  $\tau_s > \tau_m$  имеет место обычное когерентное возбуждение спектра с появлением спутников на частотах  $\omega \pm n\Omega$  ( $\omega$  — частота  $\gamma$ -перехода,  $n = \pm 1, 2, \dots$ ) с интенсивностями  $I_n \sim S_n^2 (A/\hbar)$ , где  $\hbar = c/\omega$ ,  $c$  — скорость света,  $A$  — амплитуда УЗ колебания. Зависимость интенсивности спутников в спектре излучения (или поглощения) от амплитуды УЗ, несет информацию о характере УЗ модуляции, причем в общем случае частично когерентного УЗ, информация о степени когерентности должна быть получена в результате громоздких вычислений решением обратной задачи [4].

В настоящей работе мы рассмотрим заданное акустическое поле, предположив, что оно включает когерентную сигнальную составляющую, и покажем возможность ее выявления в нетривиальном случае, когда центральная частота некогерентного (частично когерентного) УЗ совпадает с частотой сигнальной УЗ волны. В этом случае положение и интенсивность спутников практически не позволяют делать заключение о параметрах когерентного составляющей акустического поля.

2. Рассмотрим ситуацию, в которой фольга  $\gamma$ -источника находится в воздухе и приводится в движение благодаря силе  $f$ , действующей на него в акустическом поле. Для простоты будем считать, что силы действуют только в направлении оси  $z$  и  $\gamma$ -источник может совершать только малые колебания вблизи равновесного состояния при  $z=0$ .

В выражение для силы  $f$ , которое получается с помощью известного тензора плотности потока импульса, входят линейные по скорости  $v$  движения частиц жидкости слагаемые, а также слагаемые  $\sim \rho v^2$ , где  $\rho$  — невозмущенная акустическим полем плотность среды (воздуха) [5].