

ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ЛЕГИРОВАННОГО ОЛОВОМ GaAs, ВЫРАЩЕННОГО ЖИДКОФАЗНОЙ ЭПИТАКСИЕЙ ИЗ СМЕШАННОГО Ga-VI РАСТВОРИТЕЛЯ

© В.В. Чалдышев, Н.А. Якушева[†]

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

[†]Институт физики полупроводников

Сибирского отделения Российской академии наук,
630090 Новосибирск, Россия

(Получена 9 июня 1995 г. Принята к печати 5 июля 1995 г.)

Исследованы электрические свойства и низкотемпературная фотолюминесценция слоев n -GaAs(Sn), выращенных методом жидкофазной эпитаксии из галлиевого, висмутового и смешанных галлий-висмутовых растворителей при различных температурах и ориентациях подложки. Показано, что концентрация мелких доноров Sn увеличивается при повышении температуры роста, а также при увеличении содержания висмута в составе растворителя и при переходе от ориентации подложки (100) к (111) В.

В спектрах фотолюминесценции обнаружены линии, связанные с глубокими акцепторами Sn. Показано, что концентрация компенсирующих акцепторов квадратично увеличивается с повышением концентрации свободных электронов и уменьшается при повышении температуры роста и при введении висмута в растворитель. Слои с минимальной концентрацией глубоких акцепторов Sn получены эпитаксией из чисто висмутового растворителя при температуре 700 °С.

Построена термодинамическая модель формирования глубоких компенсирующих акцепторов, позволяющая объяснить наблюдаемые явления. Построенная модель предполагает захват в растущий кристалл двухатомной молекулы олова с последующим переходом одного из атомов Sn в междоузлие.

Введение

Использование галлиевого, висмутового и смешанных Ga-VI-растворителей является эффективным методом изменения захвата примесей в арсенид галлия, выращиваемый методом жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ) [1–5]. Особый интерес в связи с этим представляет примесь IV группы — олово, проявляющая в GaAs амфотерные свойства. Наряду с мелкими акцепторными уровнями олово образует в арсениде галлия компенсирующие глубокие акцепторные центры при замещении атомов мышьяка или в результате взаимодействия с собственными

точечными дефектами решетки. Ранее [3] было показано, что выращивание GaAs(Sn) из галлий-висмутовых растворителей позволяет значительно увеличить коэффициент распределения олова, причем этот эффект существенно зависит от условий эпитаксии.

Цель данной работы — исследование фотолюминесценции (ФЛ) и изменений концентрации дефектов и примесей в GaAs, легированном оловом, в зависимости от состава растворителя и условий выращивания эпитаксиальных пленок.

Методика эксперимента

Исследованные слои GaAs(Sn) выращивались методом жидкофазной эпитаксии на подложки полуизолирующего GaAs ориентацией (100) и (111) В в двух температурных интервалах — 700–630 и 850–820 °С. Для простоты в дальнейшем будем указывать только температуру начала эпитаксии — $T_G = 700$ и 850 °С, соответственно. Состав растворителя последовательно изменялся от 100% галлия до 100% висмута, при этом концентрация олова в жидкой фазе поддерживалась постоянной: $[Sn_l] = 5.0 \cdot 10^{-3}$ ат. долей в одной серии опытов и $[Sn_l] = 2.9 \cdot 10^{-2}$ ат. долей в другой. Все слои имели электронный тип проводимости. Концентрация свободных электронов n и их подвижность измерялись методом Ван-дер-Пау. Более подробно методика выращивания и электрических измерений, а также анализ электрофизических свойств исследованных слоев приведены в работе [3]. Спектры ФЛ исследовались при 4.2 К в спектральном диапазоне 0.7–1.2 мкм с разрешением не хуже 1 мэВ.

Результаты эксперимента

Варьирование условий роста приводило к изменению концентраций электронов в слоях (рис. 1). С увеличением доли висмута в составе растворителя x_{Bi} от 0 до 0.5–0.9 концентрация электронов при $[Sn] = \text{const}$ оставалась практически неизменной или незначительно возрастала. При дальнейшем увеличении x_{Bi} происходил резкий рост n , особенно при $T_G = 700$ °С (более чем на порядок величины). Повышение температуры роста приводило к возрастанию n при любых составах растворителя, кроме точки $x_{Bi} = 1$. Концентрация электронов

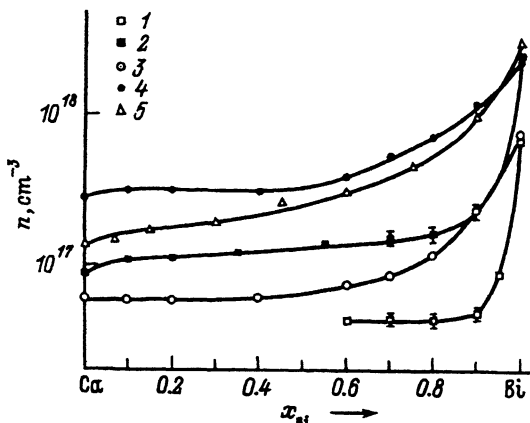


Рис. 1. Зависимость концентрации свободных носителей зарядов от содержания висмута в растворителе для различных серий образцов. 1 — $[Sn_l] = 5.0 \cdot 10^{-3}$, $T_G = 700$ °С, ориентация подложки (100); 2 — $[Sn_l] = 2.9 \cdot 10^{-2}$, $T_G = 700$ °С, ориентация подложки (100); 3 — $[Sn_l] = 5.0 \cdot 10^{-3}$, $T_G = 850$ °С, ориентация подложки (100); 4 — $[Sn] = 2.9 \cdot 10^{-2}$, $T_G = 850$ °С, ориентация подложки (100); 5 — $[Sn] = 5.0 \cdot 10^{-3}$, $T_G = 850$ °С, ориентация подложки (111) В.

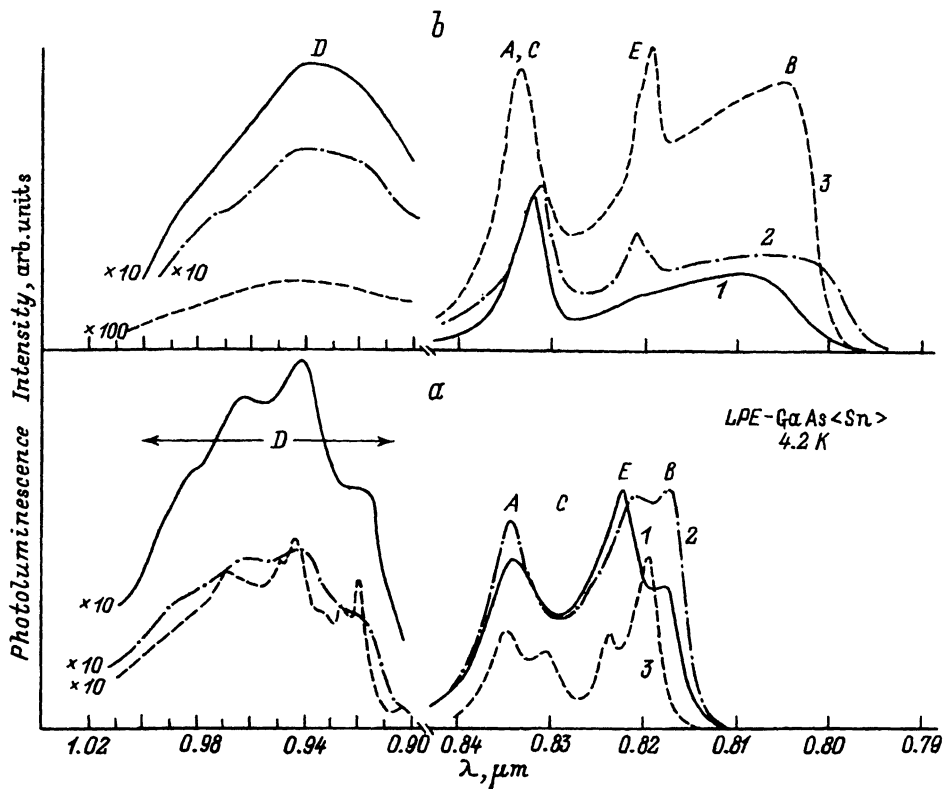


Рис. 2. Спектры ФЛ при 4.2 К эпитаксиальных слоев GaAs(Sn), выращенных в различных условиях, а: 1 — $[Sn_I] = 2.9 \cdot 10^{-2}$, $T_G = 850^\circ\text{C}$, ориентация подложки (100), $x_{Bi} = 0$, $n = 2.9 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$; 2 — $[Sn_I] = 2.9 \cdot 10^{-2}$, $T_G = 850^\circ\text{C}$, ориентация подложки (100), $x_{Bi} = 0.7$, $n = 5.6 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$; 3 — $[Sn_I] = 5.0 \cdot 10^{-3}$, $T_G = 850^\circ\text{C}$, ориентация подложки (100), $x_{Bi} = 0$, $n = 6.2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$; б: 1 — $[Sn_I] = 2.4 \cdot 10^{-1}$, $T_G = 850^\circ\text{C}$, ориентация подложки (100), $x_{Bi} = 0$, $n = 2.0 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$; 2 — $[Sn_I] = 2.9 \cdot 10^{-2}$, $T_G = 850^\circ\text{C}$, ориентация подложки (100), $x_{Bi} = 1$, $n = 2.3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$; 3 — $[Sn_I] = 2.9 \cdot 10^{-2}$, $T_G = 700^\circ\text{C}$, ориентация подложки (100), $x_{Bi} = 1$, $n = 2.4 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$.

возрастала при изменении кристаллографической ориентации подложки от (100) к (111) В и, конечно, при увеличении концентрации олова в жидкой фазе.

На рис. 2 представлены типичные спектры ФЛ эпитаксиальных слоев GaAs(Sn), выращенных в различных условиях. В спектрах можно выделить несколько основных линий излучения различной физической природы, обозначенных А, В, С, D и Е.

Краевая линия В связана с переходами мелкий донор-валентная зона или, при высокой концентрации свободных электронов, с межзонными переходами. При увеличении концентрации свободных электронов в слоях, например при увеличении содержания висмута в растворе, краевая линия ФЛ уширялась и принимала асимметричную форму, характерную для сильно легированных полупроводников, а ее максимум смещался в коротковолновую сторону в соответствии с движением уровня Ферми в зону проводимости (рис. 2). Интегральная

интенсивность краевого рекомбинационного излучения почти не зависела от содержания висмута в растворятеле практически при всех исследованных в данной работе условиях выращивания эпитаксиальных пленок. Этот результат выглядит достаточно неожиданным, поскольку при изменении x_{Bi} от 0 до 1 концентрация мелких нейтральных доноров S_n и концентрация электронов n , определяющие скорость квазимежзонной рекомбинации, увеличиваются более чем на порядок. К сколько-нибудь существенному изменению интенсивности краевой полосы ФЛ не приводило и изменение почти на порядок уровня легирования за счет простого изменения содержания S_n в жидкой фазе. Наиболее существенным фактором, влияющим на интенсивность краевой полосы ФЛ, оказалась температура роста эпитаксиальных слоев. При увеличении T_G от 700 до 850 °С интенсивность краевой линии уменьшалась примерно в 2 раза, несмотря на увеличение концентрации носителей заряда, причем этот эффект имел место при любом содержании висмута и олова в жидкой фазе. Возможными причинами наблюдаемых явлений могут быть высокий внутренний квантовый выход люминесценции, а также нарастание концентрации центров безызлучательной рекомбинации как с повышением уровня легирования, так и повышением температуры роста.

Линии A и C , расположенные в области $\hbar\omega = 1.494-1.486$ эВ и сопровождаемые фоновыми повторениями, обусловлены излучательной рекомбинацией на мелких акцепторах. Поскольку олово, как известно [6], не создает в GaAs мелких акцепторных уровней, вопрос о природе и особенностях линий A и C в данной работе обсуждаться не будет. Детальное исследование проблемы мелких акцепторных уровней в GaAs выращиваемом из галлий-висмутовых растворителей, можно найти в [4,5] и ряде других работ, специально посвященных этому вопросу. Отметим только, что интенсивности линий A и C не зависели от уровня легирования оловом и оставались относительно узкими даже при предельно высоких уровнях легирования ($n > 1 \cdot 10^{18}$ см⁻³). Последнее обстоятельство, по-видимому, свидетельствует о значительном вкладе излучения из подложки [7] в спектр ФЛ образца в рассматриваемой области длин волн.

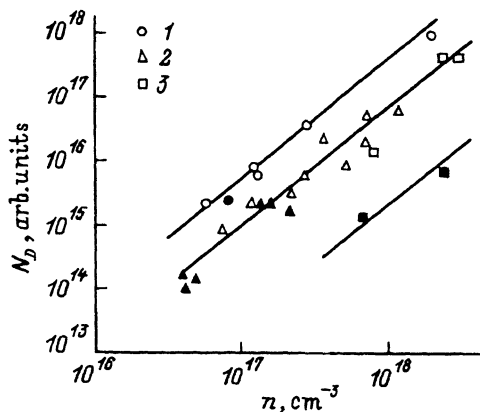
Линия D , имеющая сложную фоновую структуру с бесфононным максимумом при 1.349 эВ по своим спектральному положению и форме была идентична полосе ФЛ, исследованной в работе [8]. С ростом уровня легирования отдельные пики в полосе D уширялись и в конечном итоге фоновая структура исчезает, что коррелирует с уширением краевой полосы ФЛ и, по-видимому, связано с вырождением основных носителей заряда. Согласно [8], линию D следует приписать излучательной рекомбинации на глубоком акцепторном уровне олова с энергией ионизации 0.167 эВ.

Из спектров ФЛ можно рассчитать концентрацию глубоких акцепторов, ответственных за линию D , по формуле

$$N_D = C \cdot n \cdot I_D / I_B, \quad (1)$$

где I_D , I_B — интенсивности соответствующих линий ФЛ, n — концентрация равновесных носителей заряда (рассматривается случай низкого уровня возбуждения), C — некоторая константа, величина кото-

Рис. 3. Зависимости концентрации глубоких акцепторов олова от концентрации свободных электронов для различных составов растворителя x_{Bi} , ат. доли: 1 — 0, 2 — 0.6–0.9, 3 — 1. Темные точки — $T_G = 700^\circ\text{C}$, светлые — $T_G = 850^\circ\text{C}$.



рой зависит от сечений захвата и рекомбинации носителей заряда и, вообще говоря, не известна.

На рис. 3 представлены зависимости N_D (в относительных единицах) от концентрации свободных электронов для различных составов растворителя. Видно, что N_D возрастает с увеличением уровня легирования оловом, что дает основание считать, что соответствующий глубокий акцептор действительно связан с оловом. Соответствующую зависимость можно аппроксимировать как $N_D \sim n^2$ (прямые на рис. 3). То обстоятельство, что закономерность, связывающая концентрацию электронов и глубоких уровней, остается в целом неизменной при переходе от галлиевого к галлий-висмутовым и чисто висмутовому растворителям наряду с анализом формы, энергетического положения и тонкой структуры полосы ФЛ позволяет сделать вывод о сохранении физической природы глубокого акцептора при изменении x_{Bi} . Однако, как видно из рис. 3, в слоях, выращенных их висмутового и галлий-висмутовых растворителей, N_D ниже, чем в слоях, выращенных традиционным способом из раствора GaAs в расплаве чистого галлия. Кроме того, можно видеть, что концентрация глубоких акцепторов в слоях, выращенных при 700°C , ниже, чем в слоях, полученных при 850°C . Это явление особенно ярко выражено в области сильного легирования.

На рис. 4 представлены зависимости концентрации глубоких акцепторов от содержания висмута в составе растворителя для различных серий образцов, отличающихся условиями роста и уровнем легирования оловом. Как видно из рис. 4, все зависимости в общих чертах однотипны. В области $0 < x_{Bi} < 0.9$ изменения N_D не велики, однако при увеличении x_{Bi} от 0.9 до 1 концентрация глубоких акцепторов возрастает в несколько раз, а в ряде случаев — на порядок. Такой характерный вид зависимостей N_D от x_{Bi} качественно согласуется с увеличением концентрации доноров олова в слоях (см. рис. 1). Из рис. 4, так же как и из рис. 3, можно сделать вывод, что концентрация глубоких акцепторов уменьшается с понижением температуры эпитаксии от 850 до 700°C .

Заключивая рассмотрение длинноволновой области спектров ФЛ необходимо отметить, что мы не обнаружили в спектрах исследованных образцов полосы с максимумом около 1.2эВ , связанной с акцепторным комплексом $\text{Sn}_{Ga}\text{V}_{Ga}$ [9,10], характерной, например, для мо-

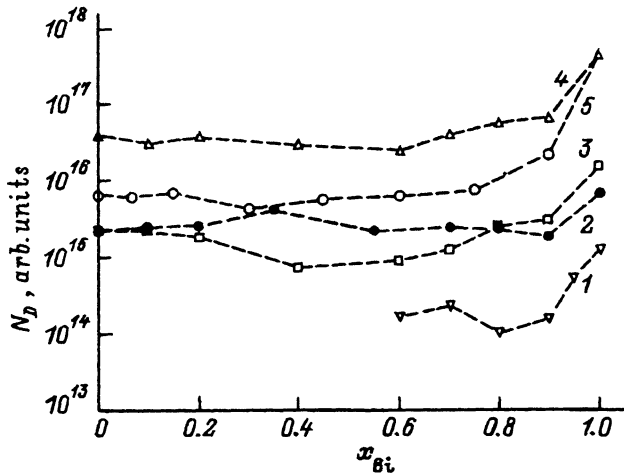


Рис. 4. Зависимости концентрации глубоких акцепторов олова от содержания висмута в растворителе для различных серий образцов. 1 — $[Sn_I] = 5.0 \cdot 10^{-3}$, $T_G = 700^\circ C$, ориентация подложки (100); 2 — $[Sn_I] = 2.9 \cdot 10^{-2}$, $T_G = 700^\circ C$, ориентация подложки (100); 3 — $[Sn_I] = 5.0 \cdot 10^{-3}$, $T_G = 850^\circ C$, ориентация подложки (100); 4 — $[Sn_I] = 2.9 \cdot 10^{-2}$, $T_G = 850^\circ C$, ориентация подложки (100); 5 — $[Sn_I] = 5.0 \cdot 10^{-3}$, $T_G = 850^\circ C$, ориентация подложки (111) В.

нокристаллов GaAs(Sn), выращиваемых методом Чохральского. Этот факт, по-видимому, обусловлен особенностями дефектообразования в условиях ЖФЭ и согласуется с результатами предшествующих работ [8,11].

Рассмотрим, наконец, линию E . Эта линия по своему энергетическому положению (1.507 эВ), близка к краевой полосе B . При низком уровне легирования полуширины линий B и E примерно одинаковы. Однако линия E сохраняет относительно небольшую полуширину и при высоком уровне легирования, когда краевая полоса B существенно уширяется (рис. 2).

В работе [8] на основании данных по расщеплению и поляризации в магнитном поле и под одноосным давлением линия E была идентифицирована как экситон, связанный на глубоком акцепторе олова. Действительно, линия E отсутствует в спектрах ФД образцов, оловом не легированных, а ее интенсивность возрастает с повышением уровня легирования оловом и при увеличении температуры роста. Тем не менее мы не обнаружили прямой корреляции между интенсивностями линий E и D , которые, согласно [8], обусловлены одним и тем же глубоким акцептором Sn_{As} . Следует отметить, что в выбранном интервале легирования оловом (оптимальном с точки зрения исследования электрических свойств и донорно-акцепторной излучательной рекомбинации на глубоком акцепторе олова) линия B и E в спектрах большинства образцов сильно перекрываются, что делает невозможным детальный количественный анализ интенсивности экситонного пика E . Вследствие этого, вопрос об идентичности центров, ответственных за линии D и E , а также вопрос о детальном характере зависимости интенсивности линии E от условий роста и состава растворителя остаются за рамками данной работы.

Обсуждение результатов

Как известно (см., например, [1-5]), главной особенностью выращивания GaAs из смешанных галлий-висмутовых растворов-расплавов является изменение отношения концентраций Ga и As в жидкой фазе, приводящее к соответствующим изменениям отклонения от стехиометрии в кристалле и к изменению процессов дефектообразования и захвата легирующих примесей. На языке квазихимических реакций захват олова из раствора-расплава в кристалл описывается реакцией



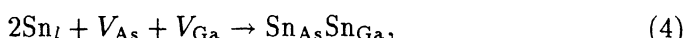
С учетом того что выращивание GaAs(Sn) методом ЖФЭ происходит в условиях, близких к равновесным, для концентрации мелких доноров олова можно записать:

$$[\text{Sn}_{\text{Ga}}] = K_1[\text{Sn}_l][V_{\text{Ga}}], \quad (3)$$

где K_1 — константа равновесия, зависящая, вообще говоря, не только от температуры, но и весьма существенно от ориентации подложки. В области умеренных уровней легирования ($n \approx 5 \cdot 10^{16} - 1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$), когда влияние фоновых примесей уже не существенно, а эффекты самокомпенсации олова еще не слишком сильны, соотношение (3) можно использовать для интерпретации зависимостей концентрации свободных электронов от содержания олова в жидкой фазе и состава растворителя (рис. 1). В частности, из рис. 1 можно видеть, что в согласии с (3) в указанной области изменения n при неизменном составе растворителя, ориентации подложки и температуры роста сохраняется прямая пропорциональность между концентрацией электронов и содержанием олова в жидкой фазе. Понижение температуры эпитаксии приводит к уменьшению равновесной концентрации вакансий и, как следствие, к уменьшению концентрации доноров олова и свободных электронов. Замена в растворителе Ga на Bi должна приводить к увеличению $[V_{\text{Ga}}]$ в кристалле и, следовательно, к увеличению $[\text{Sn}_{\text{Ga}}]$ и n , особенно сильному в области $x_{\text{Bi}} > 0.9$, что действительно наблюдается экспериментально (рис. 1). Таким образом, термодинамический подход к анализу легирования GaAs оловом при выращивании из галлий-висмутовых растворителей оказывается вполне корректным. Более детальный анализ холловских данных в рамках этого подхода был сделан в работе [3].

Для обобщения этого подхода на случай глубокого центра необходимо задаться какой-либо моделью этого центра. В работе [8] на основании спектроскопических исследований полосы D в магнитном поле и при одноосном давлении был сделан вывод о том, что соответствующий акцептор представляет собой одиночный атом олова в узле мышьяка. Такая модель, однако, не согласуется с полученными в данной работе экспериментальными данными по зависимости концентрации глубоких акцепторов от уровня легирования оловом, температуры эпитаксии и состава растворителя. Поэтому попытаемся построить иную модель для центра D исходя из имеющихся экспериментальных данных.

Как видно из рис. 3, при повышении уровня легирования оловом концентрация глубоких акцепторов возрастает быстрее, чем концентрация мелких доноров. Соответствующие зависимости для разных составов растворителей можно аппроксимировать как $N_D \sim n^2$ (прямые на рис. 3). Такой характер зависимости для связанных с оловом глубокого акцептора ранее наблюдался в работе [12] и заставляет предположить, что формирование этого акцептора происходит путем захвата в кристалл не одиночного атома, как в случае мелких доноров, а двух атомов Sn, которые могут, например, находиться в соседних узлах решетки. Соответствующая реакция запишется как

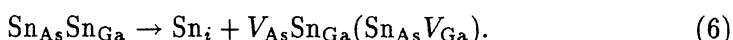


а равновесная концентрация таких центров

$$[\text{Sn}_{\text{As}}\text{Sn}_{\text{Ga}}] = K_2[\text{Sn}_I]^2[V_{\text{As}}][V_{\text{Ga}}]. \quad (5)$$

Нетрудно видеть, что соотношение (5) действительно дает квадратичную зависимость концентрации дефектов от содержания олова в жидкой фазе. Однако дефект $\text{Sn}_{\text{As}}\text{Sn}_{\text{Ga}}$ в GaAs представляет собой изоэлектронную пару. Такой дефект не должен проявлять электрической активности. Более того, такой дефект должен обладать относительно малым сечением захвата неравновесных носителей заряда и, как следствие, не должен активно проявляться в спектрах ФЛ. Отметим, что полоса D хорошо видна в спектрах ФЛ еще при весьма малых уровнях легирования оловом. Указанные соображения и факты заставляют предположить, что после захвата двухатомной молекулы Sn в кристалл в структуре центра происходят определенные изменения. Можно предположить, что один из атомов олова, входящих в состав центра, переходит в междоузлие. Резкое возрастание концентрации межузельных атомов было ранее обнаружено при исследовании зависимости параметра решетки от уровня легирования арсенида галлия оловом в процессе газовой эпитаксии [13].

Кроме того, следует отметить, что при выращивании GaAs(Sn) методом ЖФЭ расплав-расплав находится в равновесии не с объемом выращиваемой эпитаксиальной пленки, а с некоторым приповерхностным слоем кристалла [14]. Это обстоятельство собственно и приводит к линейной зависимости концентрации мелких доноров от содержания олова в расплаве (см. соотношение (3) и рис. 1). Вследствие этого, по мере роста кристалла захваченные пары $\text{Sn}_{\text{As}}\text{Sn}_{\text{Ga}}$ оказываются в иных термодинамических условиях, чем вблизи поверхности роста, что может являться причиной трансформации центра по реакции:



Две возможные конфигурации акцепторного центра в правой части (6) термодинамически эквивалентны, а вопрос о внутренней структуре центра не может быть решен путем рассмотрения такого рода реакций. Для реакции (6) с учетом соотношений (3) и (5) нетрудно получить:

$$[V_{\text{As}}\text{Sn}_{\text{Ga}}] = K[\text{Sn}_{\text{Ga}}]^2[V_{\text{As}}]/[V_{\text{Ga}}][\text{Sn}_i], \quad (7)$$

где K — константа равновесия. В (7) для простоты записана только одна из двух возможных конфигураций центра. Видно, что, помимо квадратичной зависимости от концентрации мелких доноров, концентрация рассматриваемых глубоких центров зависит и от равновесных концентраций вакансий в подрешетках кристалла. В случае традиционного метода выращивания из галлиевого растворителя содержание галлия в расплаве намного превышает содержание мышьяка и отношение $[V_{As}]/V_{Ga}$ в кристалле должно быть предельно большим. Концентрация вакансий мышьяка в этих условиях ограничивается только конечным размером области гомогенности материала при данной температуре. При понижении температуры область гомогенности сужается, и можно ожидать уменьшения концентрации данного типа глубоких центров. Как видно из рис. 4, такой эффект действительно наблюдается экспериментально.

Замена галлия на висмут в растворителе должна приводить к уменьшению отношения $[V_{As}]/[V_{Ga}]$ в кристалле (см. расчет в [15]), другими словами, мы перемещаемся на фазовой диаграмме от края области гомогенности к стехиометрическому составу. В этом случае, согласно (7), концентрация глубоких центров должна уменьшаться, что согласуется с экспериментом (рис. 3). Экстремально низкую концентрацию глубоких центров при заданном уровне легирования следует, согласно (7), ожидать при сочетании обоих факторов — низкой температуры роста и использования чисто висмутового растворителя, что также подтверждается экспериментом.

Таким образом, построенная термодинамическая модель хорошо описывает всю совокупность экспериментальных данных, касающихся влияния условий роста и состава растворителя на концентрации мелких доноров и глубоких компенсирующих акцепторов в $GaAs(Sn)$.

Следует отметить, что модель центра, разработанная на основе полученных в данной работе оригинальных экспериментальных результатов, не является новой. Такая же модель была ранее использована для интерпретации закономерностей легирования арсенида галлия оловом в условиях газофазной эпитаксии [12]. То обстоятельство, что одна и та же модель позволяет описать закономерности легирования арсенида галлия оловом в существенно различных условиях, представляется весьма важным и несомненно является еще одним аргументом в пользу данной модели.

Заключение

Исследование электрических свойств слоев $n-GaAs(Sn)$, выращенных методом жидкофазной эпитаксии из галлиевого, висмутового и смешанных галлий-висмутовых растворителей при различных температурах и ориентациях подложки, показали, что концентрация мелких доноров Sn увеличивается при повышении температуры роста, а также при увеличении содержания висмута в составе растворителя и при переходе от ориентации одложки (100) к (111) В.

В спектрах фотолюминесценции обнаружены линии, связанные с глубокими акцепторами Sn. Показано, что концентрация компенсирующих акцепторов квадратично увеличивается с повышением концентрации свободных электронов и уменьшается при понижении температуры роста и при введении висмута в растворитель. Слои с минимальной концентрацией глубоких акцепторов Sn получены эпитаксией из чисто висмутового растворителя при температуре 700 °С.

Построена термодинамическая модель формирования глубокого компенсирующего акцептора, ответственного за широко известную линию 1.349 эВ в спектрах ФЛ GaAs(Sn), позволяющая объяснить наблюдаемые явления. Согласно этой модели, формирование глубокого акцептора Sn происходит в две стадии. На первой стадии в кристалл захватывается два атома олова $\text{Sn}_{\text{Ga}}\text{Sn}_{\text{As}}$. На второй стадии, вдали от поверхности роста, эти изоэлектронная пара распадается и один из атомов олова переходит в междоузлие. Термодинамические оценки влияния условий эпитаксии, уровня легирования и содержания висмута в растворителе на концентрацию получающихся таким путем глубоких центров хорошо согласуются со всеми экспериментальными данными, полученными в настоящей работе, и совпадают с одной из моделей глубокого акцептора, использованных ранее для объяснения закономерностей легирования GaAs оловом в процессе газофазной эпитаксии.

Проведенные исследования электрических свойств и низкотемпературной фотолюминесценции эпитаксиальных слоев арсенида галлия, легированного оловом, позволяют заключить, что использование в качестве растворителя висмута в сочетании с низкой температурной эпитаксии позволяет получить материал со значительно более низкой концентрацией компенсирующих глубоких акцепторов, чем в случае традиционной ЖФЭ из галлиевого растворителя.

Авторы благодарны А.А. Гуткину и А.Е. Алексенскому за полезное обсуждение, В.Г. Погадаеву — за помощь в выращивании эпитаксиальных слоев.

Список литературы

- [1] В.В. Чалдышев, Н.А. Якушева. ФТП, **23**, 44 (1989).
- [2] В.В. Чалдышев, Н.А. Якушева. ФТП, **23**, 221 (1989).
- [3] N.A. Yakusheva, V.G. Pogadaev. Cryst. Res. Technol., **27**, 21 (1992).
- [4] Ю.Ф. Бирюлин, В.В. Воробьева, В.Г. Голубев, Л.В. Голубев, В.И. Иванов-Омский, С.В. Новиков, А.В. Осутин, И.Г. Савельев, В.В. Чалдышев, Ю.В. Шмарцев, О.В. Ярошевич. ФТП, **21**, 2201 (1987).
- [5] N.A. Yakusheva, K.S. Zhuravlev, S.I. Chikichev, O.A. Shegaj. Cryst. Res. Technol., **24**, 235 (1989).
- [6] А. Берг, П. Дин. *Светодиоды* (М., Мир, 1979) [A.A. Bergh, P.J. Dean Light-emitting Diodes (Charendon Press, Oxford, 1976)].
- [7] J. De-Sheng, Y. Makita, K. Ploog, H.J. Queisser. J. Appl. Phys., **53**, 999 (1982).
- [8] W. Shairer, D. Bimberg, W. Kottler, K. Cho, M. Schmidt. Phys. Rev. B., **13**, 3452 (1976).
- [9] E.W. Williams. Phys. Rev., **168**, 922 (1968).
- [10] А.А. Гуткин, М.А. Решиков, В.Р. Сосновский. ФТП, **27**, 1516 (1993).
- [11] S. Zemon, M.O. Vassel, G. Lambert, R.H. Bartram. J. Appl. Phys., **60**, 4253 (1986).
- [12] И.А. Бобровникова, М.Д. Вилисова, Л.П. Пороховниченко, М.П. Рузайкин, В.Н. Рязанов. Изв. вузов. Физика, **33**, 37 (1990).
- [13] И.А. Бобровникова, М.Д. Вилисова, О.М. Ивлева, В.А. Московкин, Л.П. Пороховниченко, М.В. Туршатова. Изв. вузов. Физика, **32**, 54 (1989).
- [14] Х. Кейси, М. Паниш. *Лазеры на гетероструктурах* (М., Мир, 1981) т. 2 [H.C. Casey, M.V. Panish. Heterostructure lasers (Academic Press, 1978) pt. B.].
- [15] Р.Х. Акчурина, И.О. Донская, С.И. Дулин, В.Б. Уфимцев. Кристаллография, **33**, 464 (1988).

Редактор В.В. Чалдышев

Photoluminescence of tin doped GaAs grown by liquid phase epitaxy from mixed Ga-Bi solvent

V.V. Chaldyshev*, N.A. Yakusheva†

*A.F. Ioffe Physico-Technical Institute, 194021 St. Petersburg, Russia

†Institute of Semiconductor Physics, 630090 Novosibirsk, Russia

Electrical properties and photoluminescence have been studied for n -GaAs(Sn) layers grown by liquid phase epitaxy from pure Ga-, Bi- or mixed Ga-Bi-solution at various temperatures and substrate orientations. Shallow Sn donor concentration was found to be higher at higher growth temperature and bismuth content in the solution as well as for (111)B substrate orientation as compared to (100).

The lines related to deep Sn acceptor were revealed in the photoluminescence spectra. The acceptor concentration was found to increase as a square of the free electron concentration and decrease at the low growth temperature and when bismuth was used as a solvent component. The layers with the lowest concentration of deep Sn acceptor were obtained from pure bismuth solvent at the growth temperature of 700 °C.

A thermodynamic model has been developed, which accounted for the phenomena observed. The model assumes the incorporation of two-atomic tin molecule into the growing crystal and subsequent escape of the Sn atoms into the intersite position.
