

ОСОБЕННОСТИ ЖИДКОФАЗНОЙ ЭПИТАКСИИ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЕВ $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$: Sb

Гоголадзе Д. Т., Долгинов Л. М., Малькова Н. В.,
Мильвидский М. Г., Новикова В. М., Соловьева Е. В.,
Шепкина Г. В.

Введение изовалентной примеси — сурьмы в нелегированные эпитаксиальные слои $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$, полученные жидкофазной эпитаксией из расплавов, содержащих геттерирующую примесь редкоземельного элемента (гадолиния), приводит к инверсии типа проводимости эпитаксиальных слоев ($p \rightarrow n$). Увеличение концентрации сурьмы в слоях выше $\sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$ приводит к возрастанию концентрации электрически активных центров донорного типа. При этом рассеяние электронов на флуктуациях решеточного потенциала приобретает резонансный характер, что может быть обусловлено изменением пространственного расположения основных и примесных атомов в твердом растворе.

Введение. Метод жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ) широко используется для получения нелегированных эпитаксиальных слоев (ЭС) твердого раствора $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$ — основного материала для фотоприемников в спектральном диапазоне 1.1—1.6 мкм и ряда других приборных реализаций. На практике преимущественно используются два подхода к решению задачи получения нелегированных ЭС $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ с обычно требуемой в приборах концентрацией носителей на уровне $n \leq 10^{15} \text{ см}^{-3}$: проведение длительных (до 100 ч и более) отжигов раствора-расплава перед эпитаксией [1]; введение в расплав геттерирующих примесей, обычно редкоземельных элементов (РЗЭ) ряда лантана, связывающих остаточные примеси в расплаве [2].

В последнем случае удается решить задачу получения ЭС с $n \leq 10^{15} \text{ см}^{-3}$ при непродолжительных (несколько часов) отжигах расплава, однако при этом воспроизводимость получения слоев n -типа проводимости с заданной низкой концентрацией носителей ($n \sim 10^{14} - 10^{15} \text{ см}^{-3}$) снижается прежде всего из-за сложности прецизионного введения требуемых малых количеств геттерирующей примеси в расплав (обычно на уровне менее $5 \cdot 10^{-3}$ ат%) и неконтролируемого остаточного примесного фона в ЭС. В то же время при увеличении концентрации РЗЭ в расплаве возрастает вероятность получения ЭС p -типа проводимости.

В этой связи представляет интерес введение при ЖФЭ изовалентных примесей, которые могут приводить к изменению состояния ансамбля собственных точечных дефектов в ЭС и способствовать переходу остаточных примесей в электрически не активное состояние, а также взаимодействовать с остаточными примесями в расплаве, вызывая дополнительную «очистку» ЭС [3, 4]. Цель настоящей работы — исследование особенностей электрических свойств ЭС в системе $\text{InGaAsP}/\text{InP}$ (в основном $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$), полученных ЖФЭ из растворов-расплавов, легированных сурьмой.

Э к с п е р и м е н т а л ь н ы е р е з у л ь т а т ы и и х о б с у ж д е н и е

ЭС выращивались методом ЖФЭ в атмосфере проточного водорода (с точкой росы не выше -70°C) в традиционных графитовых контейнерах пенального типа на подложках полужизолирующего ($\rho \geq 10^7 \text{ Ом}\cdot\text{см}$) фосфида индия, ориен-

проводимых по плоскости (100). Выращивание слоев проводилось при температурах эпитаксии (T_s) 650, 550 и 750 °С. В качестве геттерирующей примеси в расплав вводился гадолиний (10^{-3} — 10^{-2} ат.%). Содержание сурьмы в расплаве варьировалось в пределах 0,03—2 ат.%. Сурьма вводилась в шихту как в элементарном виде, так и в виде химических соединений (антимонид индия, антимонид гадолиния).

При ЖФЭ слоев InGaAsP/InP из расплавов, содержащих сурьму, но не содержащих гадолиний, отмечалось некоторое (на уровне менее 20—30 %) снижение остаточного донорного фона для составов ЭС, близких к фосфиду индия, тогда как для $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ он оставался на том же уровне, что и при ЖФЭ из расплавов, не содержащих сурьму [$n = (5 \div 10) \cdot 10^{16}$ см $^{-3}$].

При ЖФЭ слоев из расплавов, содержащих гадолиний, но не содержащих сурьму, были получены ЭС как p - ($p \sim 10^{13}$ — 10^{15} см $^{-3}$), так и n -типа проводимости ($n \leq 10^{15}$ см $^{-3}$). Введение в эти расплавы сурьмы и варьирование ее количества в указанных выше пределах приводят к изменению концентрации носителей заряда в ЭС (рис. 1). При этом варьирование концентрации сурьмы в ЭС в диапазоне до $\sim 10^{20}$ см $^{-3}$ не приводило к существенному изменению величины несоответствия параметров решетки на гетерогранице подложка—ЭС (Δa), которая во всех исследуемых образцах находилась внутри области когерентного роста ЭС [5].

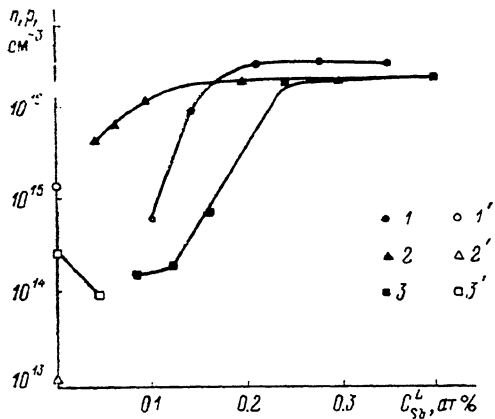


Рис. 1. Зависимость концентрации носителей в ЭС $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ от содержания сурьмы в расплаве.

Температура эпитаксии, °С: 1, 1' — 650; 2, 2' — 750; 3, 3' — 550. 1, 3 — n -тип, 1'—3' — p -тип.

Полученные (на основе измерений по методу масс-спектро스코пии вторичных ионов) зависимости концентрации сурьмы в ЭС от концентрации сурьмы в расплаве позволили определить коэффициенты распределения сурьмы, которые составили 0,11, 0,24 и 0,4 для $T_s = 750$, 650 и 550 °С соответственно.

Как видно из рис. 1, введение сурьмы в ЭС $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$, полученные ЖФЭ из расплавов индий—галлий—мышьяк, содержащих гадолиний, приводит к существенным изменениям электрических свойств слоев. Прежде всего даже незначительная добавка сурьмы в расплав, соответствующая концентрации сурьмы в ЭС на уровне менее 10^{18} см $^{-3}$, приводит к инверсии типа проводимости ($p \rightarrow n$) ЭС, которые при отсутствии сурьмы в расплаве имели p -тип проводимости. Дальнейшее увеличение концентрации сурьмы приводит к увеличению концентрации носителей в слоях до уровня $n \geq 10^{15}$ см $^{-3}$ в зависимости от концентрации сурьмы и температуры выращивания ЭС.

Увеличение концентрации сурьмы в ЭС приводит к возрастанию в них суммарной концентрации ионизованных доноров и акцепторов (N_i). Расчет N_i для нелегированных (N_i^0) и легированных сурьмой (N_i^{Sb}) ЭС также свидетельствует (рис. 2) о наличии «критической» концентрации сурьмы в расплаве (и ЭС), для которой очистка ЭС заменяется на генерацию дополнительных электрически активных центров донорного типа. Расчет проводился путем сопоставления экспериментальной температурной зависимости подвижности электронов $\mu(T)$ с теоретической [6], которая учитывает рассеяние электронов на колебаниях решетки, «сплавной» механизм рассеяния и рассеянию на ионизованных примесях, а также с учетом дополнительного рассеяния электронов на флуктуациях решеточного потенциала [7].

С увеличением концентрации сурьмы меняется и характер дополнительного (исключая указанные выше механизмы рассеяния) рассеяния электронов на флуктуациях решеточного потенциала (рис. 3). В ЭС с концентрацией сурьмы на уровне 10^{17} — $5 \cdot 10^{17}$ см $^{-3}$ зависимость подвижности электронов от темпера-

туры, обусловленная этим дополнительным механизмом рассеяния, имеет вид $\mu_{\text{дон}} \sim T^{-n}$, где $n=0.5-1$. В ЭС с большей концентрацией сурьмы (на уровне выше 10^{18} см^{-3}) вид зависимости $\mu_{\text{дон}}(T)$ свидетельствует о резонансном характере рассеяния электронов. Согласно [8], подобный характер $\mu_{\text{дон}}(T)$ может иметь место при рассеянии электронов на сферически симметричной прямоугольной потенциальной яме радиусом r в условиях, когда $kr \gg 1$ (k — волновое число). При $kr \ll 1$ $\mu(T) \sim T^{-1/2}$. Зависимость $\mu \sim T^{-1/2}$ возникает также из модели рассеяния носителей на областях объемного заряда [9].

В настоящее время, по-видимому, преждевременно говорить о конкретной модели, объясняющей изменения в дополнительном механизме рассеяния. В то же время имеющиеся в литературе данные позволяют достаточно обоснованно предполагать наличие в ЭС периодических флуктуаций состава по основным и примесным компонентам. В частности, электронно-микроскопические исследования ЭС $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ [10] приводят к выводу о проявлении эффектов

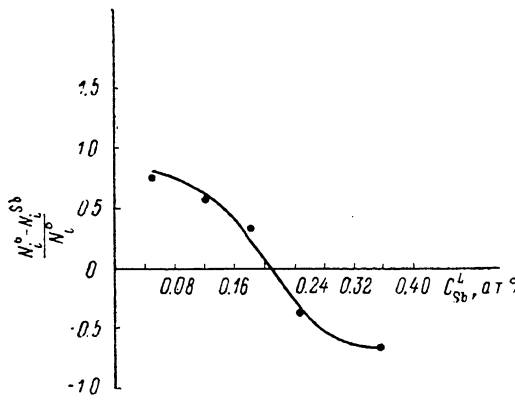


Рис. 2. Зависимость концентрации ионизованных доноров в ЭС $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ от содержания сурьмы в ЭС ($T_3=650^\circ\text{C}$).

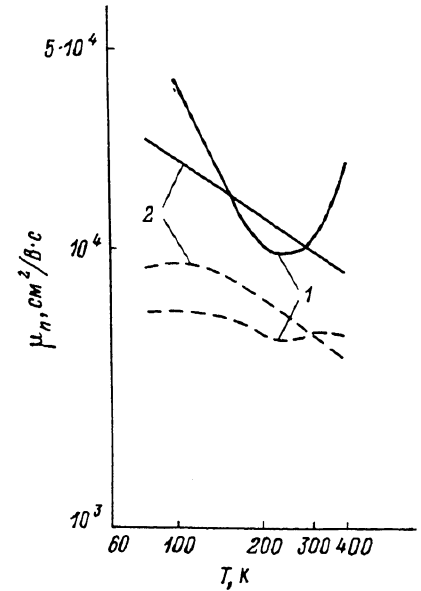


Рис. 3. Температурная зависимость $\mu_{\text{дон}}(T)$ в образцах с различным содержанием сурьмы. $C_{\text{Sb}}^S, \text{ см}^{-3}$: 1 — $3 \cdot 10^{17}$; 2 — $2 \cdot 10^{18}$; сплошные кривые — расчет, пунктир — эксперимент, $T_3 = 650^\circ\text{C}$.

упорядочения и разупорядочения в данном твердом растворе. Это же подтверждается и результатами исследования электрических и оптических свойств ЭС данного материала, полученного ЖФЭ [7]. В то же время термодинамический анализ устойчивости системы InGaAsSb , учитывающий упругое искажение связей между атомами III и V групп, показывает, что минимум энергии, соответствующий более устойчивому состоянию системы, достигается при увеличении числа связей In-As и Ga-Sb по сравнению со статистическим распределением атомов в твердом растворе [11]. Все это позволяет предполагать, что введение сурьмы может привести к изменению пространственного расположения как основных, так и примесных атомов в твердом растворе, а соответственно и к изменению электрофизических свойств ЭС. Естественно, что более полная информация, объясняющая влияние сурьмы на электрические свойства ЭС $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$, может быть получена на основе исследований оптических и структурных свойств ЭС $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}_3 : \text{Sb}$.

Авторы выражают благодарность П. Б. Орлову за проведение измерений образцов по методу масс-спектрографии вторичных ионов, В. И. Кусикову за выполнение рентгеновских исследований образцов и Г. И. Виноградовой за помощь в проведении исследований электрических свойств образцов.

Список литературы

- [1] Kuphal E., Röcker A. // *J. Cryst. Growth*. 1982. V. 58. N 1. P. 133—142.
- [2] Баграев Н. Т., Власенко П. С., Гацов К. А., Гореленок А. Т., Каманин А. В., Маму-тин В. В., Пушный Б. В., Тибилев В. К., Толпаров Ю. П., Шубин А. Е. // *ФТП*. 1984. Т. 18. В. 1. С. 83—85.
- [3] Мильвидский М. Г., Рытова Н. С., Соловьева Е. В. // *Проблемы кристаллографии*. М., 1987. С. 215—232.
- [4] Ганина Н. В., Уфимцев В. Б., Фистуль В. И. // *Письма ЖТФ*. 1982. Т. 8. В. 10. С. 610—623.
- [5] Авдеева В. М., Долгинов Л. М., Красильников В. С., Малькова Н. В., Свердлов Б. Н., Югова Т. Г. // *Кристаллография*. 1988. Т. 33. В. 3. С. 712—720.
- [6] Takeda Y., Sasaki A. // *Japan. J. Appl. Phys.* 1980. V. 19. N 2. P. 383—384.
- [7] Виноградова Г. И., Гоголадзе Д. Т., Долгинов Л. М., Малькова Н. В., Мильвид-ский М. Г., Соловьева Н. В. // *ФТП*. 1989. Т. 23. В. 7. С. 1177—1181.
- [8] Marsh J. H. // *Appl. Phys. Lett.* 1982. V. 41. N 8. P. 732—734.
- [9] Weisberg L. R. // *J. Appl. Phys.* 1962. V. 33. N 5. P. 1817—1821.
- [10] Shu S. N., Nakahara S., Stregе K. S., Johnston W. D. // *J. Appl. Phys.* 1985. V. 57. N 10. P. 4610—4615.
- [11] Ishimura M., Sasaki A. // *Phys. Rev. B*. 1987. V. 36. N 18. P. 9694—9702.

Государственный
научно-исследовательский
и проектный институт
редкометаллической промышленности
Москва

Получена 6.11.1990
Принята к печати 14.11.1990

