

УДК 532.78

ПРИМЕНЕНИЕ НОВОЙ РАЗНОВИДНОСТИ ЭЛЕКТРОЖИДКОСТНОЙ ЭПИТАКСИИ ДЛЯ ВЫРАЩИВАНИЯ ПЛЕНОК InSbAsBi И ДИОДНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР НА ИХ ОСНОВЕ

В.М. АРУТЮНЯН, В.А. ГЕВОРКЯН, К.М. ГАМБАРЯН

Ереванский государственный университет

(Поступила в редакцию 4 октября 1994 г.)

Для выращивания эпитаксиальных слоев InSbAsBi и диодных гетероструктур на их основе применяется новая разновидность метода электрожидкостной эпитаксии. Данным способом на подложках InSb выращены эпитаксиальные слои InSb и твердых растворов $\text{InSb}_{1-x}\text{As}_x$ ($x \leq 0.05$) и $\text{InSb}_{1-x-y}\text{As}_x\text{Bi}_y$ ($x \leq 0.05, y \leq 0.01$). Исследована зависимость толщины пленок InSb , InSbAs и InSbAsBi от плотности электрического тока. Созданы диодные гомо- и гетероструктуры $p\text{-InSb}/n\text{-InSb}$, $p\text{-InSb}/n\text{-InSbAs}$, $p\text{-InSb}/n\text{-InSbAsBi}$ и исследованы их вольт-амперные характеристики.

Введение

В последнее время все большее применение при выращивании эпитаксиальных слоев и структур на основе твердых растворов соединений A^3B^5 находит метод электрожидкостной эпитаксии (ЭЖЭ) в его классическом исполнении [1,2] и различные его варианты [3-6]. Это связано с тем, что по сравнению с методом жидкостной эпитаксии (ЖЭ), метод ЭЖЭ, благодаря пропусканию электрического тока через кристаллизационную систему, позволяет расширить возможности управления параметрами выращиваемых слоев. Метод ЭЖЭ успешно применяется при выращивании практически всех бинарных и многокомпонентных твердых растворов соединений A^3B^5 . Однако и в случае использования метода ЭЖЭ определенные трудности возникают при выращивании твердых растворов на основе бинарных соединений с большим отличием в постоянных решеток, так как уменьшение структурных дефектов в эпитаксиальных слоях таких твердых растворов требует еще более точного управления их составом.

Для решения ряда прикладных задач оптоэлектроники твердые растворы в системе InSb-InAs представляют особый интерес. Это связано с тем, что из-за аномального поведения зависимости ширины запрещенной зоны от состава твердого раствора $\text{InSb}_{1-x}\text{As}_x$, а именно, уменьшения ширины запрещенной зоны с увеличением содержания мышьяка вплоть до $x=0.3$ [7], имеется возможность создания приемников излучения, фоточувствительных в диапазоне атмосферного окна дальнего инфракрасного излучения 7-12 мкм. Интерес к выращиванию и исследованию твердых растворов $\text{InSb}_{1-x}\text{As}_x$ и $\text{InSb}_{1-x-y}\text{As}_x\text{Bi}_y$ обусловлен также и тем, что данные соединения являются альтернативой из

класса полупроводниковых соединений A^3B^5 к ставшему уже классическим в вышеуказанном диапазоне длин волн твердому раствору $Cd_{1-x}Hg_xTe$. В работе [8] при выращивании эпитаксиальных слоев $InSb_{1-x}As_x$ и напряженных сверхрешеток на их основе был применен метод молекулярно-лучевой эпитаксии, а в работе [9] - метод осаждения из газовой фазы металлоорганических соединений. Метод жидкофазной эпитаксии также применялся при выращивании данного твердого раствора [10]. Однако наличие существенной разницы ($\approx 7\%$) между значениями постоянных решеток соединений $InSb$ и $InAs$ значительно затрудняет применение метода ЖЭ для выращивания совершенных слоев твердого раствора $InSb_{1-x}As_x$ из-за ограниченных возможностей данного метода по управлению составом выращиваемых слоев твердых растворов.

Методика эксперимента

В настоящей работе приводятся результаты исследований по выращиванию с помощью новой разновидности метода ЭЖЭ [5,6] эпитаксиальных слоев $InSb$, твердых растворов $InSb_{1-x}As_x$ ($x \leq 0.05$), $InSb_{1-x-y}As_xBi_y$ ($x \leq 0.05$, $y \leq 0.01$), и диодных гетероструктур на их основе. Сущность данной методики заключается в том, что управление составом выращиваемой пленки твердого раствора осуществляется путем прецизионного изменения состава рабочего раствора-расплава за счет его контролируемой с помощью электрического тока подпитки (электроподпитки) отдельным элементом или независимо друг от друга несколькими элементами, образующими твердый раствор. Для подпитки рабочего раствора-расплава используется "жидкий источник", представляющий собой отдельный раствор-расплав, насыщенный подпитывающим элементом. Рабочий раствор-расплав и "жидкий источник" сообщаются друг с другом посредством разделительного канала, размерные характеристики которого выбираются таким образом, чтобы практически предотвратить неконтролируемое за счет диффузионных потоков изменение их составов. При пропускании через данную кристаллизационную систему постоянного электрического тока определенной величины и полярности за счет электропереноса компоненты через канал происходит подпитка рабочего раствора-расплава заданным компонентом из соответствующего "жидкого источника". Количество подпитывающей компоненты, определяющее состав выращиваемой пленки твердого раствора, задается выбором величины электрического тока и времени его пропускания.

Пленки $InSb$ и твердых растворов $InSb_{1-x}As_x$ и $InSb_{1-x-y}As_xBi_y$ выращивались на подложках $p-InSb$ толщиной 450 ± 10 мкм, с концентрацией носителей заряда $p = (2 \div 5) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$. Для получения слоев $InSb$, $InSb_{1-x}As_x$ и $InSb_{1-x-y}As_xBi_y$ n -типа проводимости в качестве легирующей примеси использовался теллур. При выращивании на подложках $InSb$ слоев $InSb$ в качестве рабочего раствора-расплава и подпитывающего "жидкого источника" использовался индий, насыщенный сурьмой. При выращивании твердых растворов $InSb_{1-x}As_x$ и $InSb_{1-x-y}As_xBi_y$ в качестве "жидких источников" использовались отдельные растворы-расплавы индия, насыщенные,

соответственно, сурьмой, мышьяком и висмутом. Процесс выращивания проводился в кристаллизационной кассете пенального типа при температуре эпитаксии $T_0=300^\circ\text{C}$ в потоке очищенного через палладиевые фильтры водорода. Электрический контакт к нерабочей поверхности подложки создавался с помощью распыла индия, насыщенного InSb , аналогично методике, описанной в [3,5].

Обсуждение полученных результатов

На рис.1 представлены экспериментальные зависимости толщины пленок InSb (а), $\text{InSb}_{1-x}\text{As}_x$ (б) и $\text{InSb}_{1-x-y}\text{As}_x\text{Bi}_y$ (в) от плотности электрического тока. Толщина слоев InSb и твердых растворов $\text{InSb}_{1-x}\text{As}_x$ и $\text{InSb}_{1-x-y}\text{As}_x\text{Bi}_y$ не превышала 30 мкм. Толщина пленок определялась по сколу, обработанному в селективном травителе.

Как видно из рис.1а, зависимость толщины пленок InSb от плотности электрического тока имеет линейный характер.

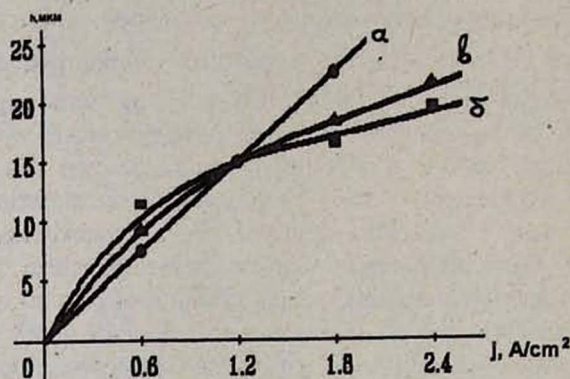


Рис.1. Зависимость толщины пленок InSb (а), твердых растворов $\text{InSb}_{1-x}\text{As}_x$ (б) и $\text{InSb}_{1-x-y}\text{As}_x\text{Bi}_y$ (в) от плотности электрического тока. Время роста $t=3$ часа, температура эпитаксии $T_0=300^\circ\text{C}$.

Известно, что как в классическом варианте равновесной ЭЖЭ [4], так и в применяемой нами новой ее разновидности [5] при выращивании бинарных соединений A^3B^5 толщина пленки (h) определяется выражением

$$h = \mu \rho j t \frac{C_0}{C_s - C_0} \quad (1)$$

где μ - подвижность компоненты B^5 в жидкой фазе, ρ - удельное сопротивление жидкой фазы, j - плотность электрического тока, t - время его пропускания, $C_s = 0.5$ - концентрация компоненты B^5 в твердой фазе, а C_0 - ее равновесная концентрация в жидкой фазе при температуре эпитаксии.

Подставляя в выражение (1) экспериментальные значения входящих в него параметров можно оценить величину $\mu_{\text{Sb}} \rho_{\text{In-Sb}}$. При температуре $T_0=300^\circ\text{C}$ величина $\mu_{\text{Sb}} \rho_{\text{In-Sb}} \approx (8 \div 12) \cdot 10^{-7} \text{ см}^3/\text{с.А}$. $\mu \rho$ является одной из важных

характеристик ЭЖЭ и знание ее величины необходимо для управления и контроля в процессе роста толщины выращиваемых эпитаксиальных слоев и структур.

Анализ данных рентгеноспектрального микроанализа, проведенного на установке "CAMECA", показал, что в выращенных слоях твердых растворов $\text{InSb}_{1-x}\text{As}_x$ и $\text{InSb}_{1-x-y}\text{As}_x\text{Bi}_y$ значения x и y менялись в пределах от $x=0.005$ до $x=0.05$ и $y=0.001$ до $y=0.01$.

Как видно из рис. 1б и 1в, при выращивании слоев твердых растворов $\text{InSb}_{1-x}\text{As}_x$ и $\text{InSb}_{1-x-y}\text{As}_x\text{Bi}_y$ с увеличением плотности электрического тока наблюдается отклонение толщины пленки от линейной зависимости, что, на наш взгляд, связано с вкладом в термодинамический потенциал кристаллизации деформационного члена, обусловленного наличием разницы в значениях параметров решеток соединений InSb , InAs и InBi . Несмотря на плавное и слабое изменение состава по толщине растущего слоя, наличие большой разницы ($\approx 7\%$) в постоянных решеток, образующих твердый раствор бинарных соединений, приводит к смещению условий термодинамического равновесия на границе раздела фаз и уменьшению скорости кристаллизации [11]. Как показали результаты исследований, при увеличении состава пленки, когда кристаллизация проводится при постоянной плотности электрического тока, также наблюдается уменьшение скорости роста, что свидетельствует в пользу данного предположения. Аналогичное явление нами наблюдалось и при выращивании на подложках InAs твердого раствора $\text{InAs}_{1-x}\text{P}_x$ [5], характеризующегося также большим отличием в постоянных решеток бинарных соединений ($\approx 4\%$). Из рис. 1б и 1в видно также, что отклонение от линейной зависимости толщины пленок InSbAsBi меньше, чем у пленок InSbAs . Это, скорее всего, связано с тем, что введение четвертой компоненты (Bi) в слой твердого раствора InSbAs приводит к уменьшению вклада деформационного члена в термодинамический потенциал кристаллизации.

Выращенные структуры имели однородную толщину и планарную границу раздела подложка-пленка. Высокое совершенство границы раздела подложка-пленка (отсутствие следов подрастворения и малая ее дефектность) достигается благодаря плавному увеличению содержания мышьяка.

Пленки InSb имели практически зеркальную поверхность и, как показали металлографические исследования, плотность дислокаций находилась на уровне ее значения в промышленной подложке и составляла $N_D \approx 4 \cdot 10^4 \text{ см}^{-2}$. При выращивании твердого раствора $\text{InSb}_{1-x}\text{As}_x$ происходило ухудшение качества поверхности пленки с увеличением содержания мышьяка в слое твердого раствора. В частности, плотность дислокаций в слое твердого раствора $\text{InSb}_{1-x}\text{As}_x$ с $x=0.01$ составляла $N_D \approx 2 \cdot 10^5 \text{ см}^{-2}$, а при $x=0.05$ $N_D \approx 5 \cdot 10^6 \text{ см}^{-2}$. Увеличение содержания мышьяка в слое твердого раствора $\text{InSb}_{1-x}\text{As}_x$ приводит к увеличению несоответствия постоянной кристаллической решетки, в результате чего и наблюдаются увеличение плотности дислокаций несоответствия и ухудшение качества поверхности. Как показали наши исследования, введение в слой твердого раствора $\text{InSb}_{1-x}\text{As}_x$ четвертой компоненты - висмута приводит к существенному улучшению (уменьшению N_D на порядок) совершенства поверхности пленок, выращенных при тех же технологических условиях. В частности, плотность дислокаций в

слое $\text{InSb}_{1-x-y}\text{As}_x\text{Bi}_y$ с $x=0.05$ и $y=0.01$ составляла $N_D \approx 6 \cdot 10^5 \text{ см}^{-2}$

Для исследования электрофизических характеристик полученных диодных структур нами были отработаны оптимальные технологические режимы создания мезоструктур и формирования омических контактов. Диаметр рабочей площади мезоструктур составлял 400 мкм. Как показали исследования вольтамперных характеристик (ВАХ), обратные токи диодных гомо- и гетероструктур с высоколегированными n- и p-областями ($p \approx 10^{14}$, $n_p \approx 10^{17} \text{ см}^{-3}$) слабо менялись с температурой (в пределах $T=77 \div 300 \text{ K}$) и имели резко возрастающий характер при малых, до $U = -0.1 \text{ В}$, значениях напряжений. Характер и величина обратных токов ВАХ существенно меняются при уменьшении концентрации примеси в подложке и пленке до $p \approx 10^{12} \text{ см}^{-3}$ и $n \approx 10^{16} \text{ см}^{-3}$, соответственно.

На прямой ветви ВАХ диодных гетероструктур наблюдались два экспоненциальных участка $j = j_s \exp(eU/\beta kT)$ с разными значениями j_s и β , где j_s — обратный ток насыщения, а β — коэффициент неидеальности p-n-перехода. Участок с большим значением $\beta \approx 3 \div 5$, по-видимому, обусловлен поверхностными токами утечки. Значения β , рассчитанные при больших значениях прямого напряжения и характеризующие p-n-переход, лежали в пределах $\beta \approx 1.9 \div 2.2$, что свидетельствует о генерационно-рекомбинационном механизме токопрохождения через p-n-переход.

На рис.2 приведены ВАХ диодных гетероструктур p-InSb/n-InSb_{1-x}As_x ($x=0.05$) - а и p-InSb/n-InSb_{1-x-y}As_xBi_y ($x=0.05$; $y=0.01$) - б при $T=77 \text{ K}$.

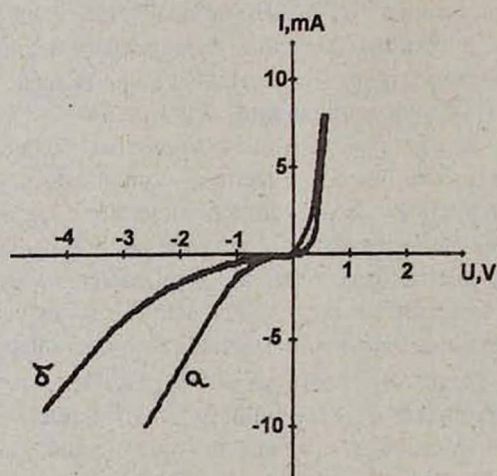


Рис.2. Вольт-амперные характеристики диодных гетероструктур p-InSb/n-InSb_{1-x}As_x ($x=0.05$) - а и p-InSb/n-InSb_{1-x-y}As_xBi_y ($x=0.05$; $y=0.01$) - б, при $T = 77 \text{ K}$.

Как видно из рисунка, введение висмута (на уровне изовалентной примеси) в слой твердого раствора $\text{InSb}_{1-x}\text{As}_x$ приводит к уменьшению обратных токов ВАХ. Это, скорее всего, связано как с уменьшением дислокаций несоответствия в пленке, так и с эффектом ее "изовалентной очистки". Аналогичные явления наблюдались в твердых растворах $\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ (Bi) [12].

Выводы

1. На подложках p-InSb путем электроподпитки жидкой фазы сурьмой выращены совершенные ($N_D \approx 4 \cdot 10^4 \text{ см}^{-2}$) слои n-InSb, для которых наблюдалась линейная зависимость толщины от плотности электрического тока.
2. На основании сравнения расчетных и экспериментальных данных получено значение $\mu_{\text{Sb}} \rho_{\text{In-Sb}} \approx (8+12) \cdot 10^{-7} \text{ см}^3/\text{с.А}$ при $T_0 = 300^\circ \text{С}$.
3. Впервые методом электрожидкостной эпитаксии на подложках InSb путем электроподпитки жидкой фазы мышьяком, а также одновременно мышьяком и висмутом, выращены слои твердых растворов $\text{InSb}_{1-x}\text{As}_x$ ($x \leq 0.05$) и $\text{InSb}_{1-x-y}\text{As}_x\text{Bi}_y$ ($x \leq 0.05$, $y \leq 0.01$). С увеличением концентрации мышьяка наблюдалось отклонение толщины пленок InSbAs и InSbAsBi от линейной зависимости в сторону уменьшения, что объяснено вкладом деформационного члена в термодинамический потенциал кристаллизации.
4. Исследованы вольт-амперные характеристики полученных диодных гомо- и гетероструктур. Показано, что введение четвертой компоненты (Bi) в слой твердого раствора $\text{InSb}_{1-x}\text{As}_x$ приводит к уменьшению обратных токов ВАХ диодных гетероструктур, что обусловлено улучшением совершенства кристаллической структуры твердых растворов (уменьшением плотности дислокаций на порядок), а также эффектом "изовалентной очистки" выращенных слоев.

В заключение авторы выражают благодарность **Ю.В.Шмарцеву** и Л.В.Голубеву за внимание и интерес к работе, полезные критические замечания, а также С.Г.Конникову и его сотрудникам за проведение рентгеноспектрального микроанализа полученных структур.

ЛИТЕРАТУРА

1. В.А. Геворкян, Л.В. Голубев, С.Г. Петросян и др. ЖТФ, **47**, 6, 1306 (1977).
2. M. Kumagawa, A.F. Witt, M. Lichtenstager et al. J. Electrochem. Soc., **120**, N4, 583 (1973).
3. С.А. Никишин. ЖТФ, **54**, 938 (1984).
4. Л.В. Голубев, О.В. Зеленова, С.В. Новиков и др. Письма в ЖТФ, **11**, 230 (1985).
5. В.М. Арутюнян, К.М. Гамбарян, В.А. Геворкян. ЖТФ, **56**, 2145 (1986).
6. В.М. Арутюнян, В.А. Геворкян, К.М. Гамбарян. Авторское свидетельство СССР, 1575586, 1990.
7. Г. Крессел, Г.Нельсон. Физика тонких пленок, под. ред. Дж.Хасса, М.Х. Франкомба и Р.У. Гофмана, М., "Мир", 1977.
8. W.J. Schaffer. 3rd MBE Workshop, Univ. of Calif., Santa Barbara, 1981.
9. G.Nataf, C. Verie. J. Cryst. Growth, **55**, 87 (1981).
10. Л.В. Голубев, О.В. Зеленова, С.В. Новиков, Ю.В. Шмарцев. ЖТФ, **54**, 2233 (1984).
11. В.А. Геворкян, А.Е. Хачатрян. Межвузовский сб. "Кристаллизация и свойства кристаллов", Новочеркасск. **33** (1991).

APPLICATION OF NEW APPROACH TO LIQUID-PHASE
ELECTROEPITAXY FOR InSbAsBi LAYERS AND DIOD
HETEROSTRUCTURES GROWTH

V.M. AROUTIOUNIAN, V.A. GEVORKYAN, K.M. GAMBARYAN

A new approach to liquid-phase electroepitaxy has been used for InSbAsBi layers and diod heterostructures growth. InSb and $\text{InSb}_{1-x}\text{As}_x$ ($x \leq 0.05$), $\text{InSb}_{1-x-y}\text{As}_x\text{Bi}_y$ ($x \leq 0.05$, $y \leq 0.01$) solid solution layers were grown on InSb substrates by this method. The dependence of InSb, InSbAs and InSbAsBi layers thickness versus electric current density was investigated. p-InSb/n-InSb, p-InSb/n-InSbAs and p-InSb/n-InSbAsBi diod homo- and heterostructures were fabricated and investigated their current-voltage characteristics.

*ԷԼԵԿՏՐՈԴԵՂՈԼԿԱՅԻՆ ԷՊԻՏԱԲՍԻԱՅԻ ՆՈՐ ՏԱՐԱՏԵՍԱԿԻ ԿԻՐԱՌՈՒՄԸ
InSbAsBi ԹԱՂԱՆԹՆԵՐԻ ԵՎ ՆՐԱՆՑ ԴԻՍԱՆ ՎՐԱ ԴԻՌՂԱՅԻՆ
ՀԵՏԵՐՈԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔՆԵՐԻ ԱՃԵՑՄԱՆ ՀԱՄԱՐ*

Վ. Մ. ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ, Վ.Ա. ԳԵՎՈՐԳՅԱՆ, Կ.Մ. ԴԱՄԲԱՐՅԱՆ

InSbAsBi թաղանթների և նրանց հիման վրա դիողային հետերոկառուցվածքների աճեցման համար օգտագործվում է էլեկտրահեղուկային էպիտաքսիայի նոր տարատեսակը: Տվյալ մեթոդով InSb տակդիրի վրա աճեցվել են InSb-ի և $\text{InSb}_{1-x}\text{As}_x$ ($x \leq 0.05$), $\text{InSb}_{1-x-y}\text{As}_x\text{Bi}_y$ ($x \leq 0.05$, $y \leq 0.01$) պինդ լուծույթների թաղանթները: Հետազոտվել է InSb, $\text{InSb}_{1-x}\text{As}_x$ և $\text{InSb}_{1-x-y}\text{As}_x\text{Bi}_y$ թաղանթների հաստության կախվածությունը էլեկտրական հոսանքի խտությունից: Ստեղծվել են p-InSb/n-InSb, p-InSb/n-InSbAs, p-InSb/n-InSbAsBi դիողային հոմո- և հետերո կառուցվածքներ և հետազոտվել են նրանց վոլտ-ամպերային բնութագրերը: