

О ВОЗМОЖНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ИЗОПЕРИОДИЧЕСКИХ С ПОДЛОЖКОЙ InP СЛОЕВ $In_{0.52}Al_{0.48}As$ МЕТОДОМ ЖИДКОФАЗНОЙ ЭПИТАКСИИ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ ($\sim 650^\circ C$)

Б. Я. Бер, С. Б. Быстров, Д. А. Зушинский, О. В. Корнякова, Ле Туан,
С. В. Новиков, И. Г. Савельев, В. В. Третьяков, В. В. Чалдышев,
Ю. В. Шмарцев

Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук, 194021,
Санкт-Петербург, Россия
(Получена 23 марта 1993 г. Принята к печати 29 марта 1993 г.)

Разработана технология получения методом жидкофазной эпитаксии при низких температурах ($\sim 650^\circ C$) эпитаксиальных слоев $In_{0.52}Al_{0.48}As$, изопериодических с подложками InP, что подтверждается исследованиями оже-спектров и спектров фотолюминесценции, а также результатами рентгеноспектрального микроанализа и гальваномангнитных измерений.

Слои твердого раствора $In_{0.52}Al_{0.48}As$, изопериодические с монокристаллическим InP, являются перспективным материалом для изготовления приборов СВЧ и сверхбыстродействующих фотодетекторов. Возможность получения гетероструктур $In_{1-x}Ga_xAs/In_{1-x}Al_xAs$ с двумерным электронным газом (2МЭГ) с высокой подвижностью носителей заряда ($1.7 \cdot 10^5 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ [1]) при большом разрыве зон проводимости материалов гетеропары ($E_c = 500 \text{ мэВ}$ [2]) и большая величина барьера Шоттки к $In_{0.52}Al_{0.48}As$ (0.82 эВ [3]) делает привлекательной эту гетеропару для создания на подложках InP полевых транзисторов с высокой электронной подвижностью.

Слои $In_{0.52}Al_{0.48}As$ в основном получают методами молекулярно-лучевой эпитаксии и газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений. Получение слоев $In_{0.52}Al_{0.48}As$ методом жидкофазной эпитаксии (ЖЭФ) [$^{4-6}$] существенно затруднено по следующим причинам. Фазовая диаграмма тройной системы In—Al—As до сих пор не изучена достаточно ни теоретически, ни экспериментально. В бинарной системе In—Al существует область несмешиваемости при температурах, обычно используемых для эпитаксии слоев $In_{1-x}Al_xAs$ [7]. Высокий коэффициент сегрегации Al обуславливает высокие температуры эпитаксии слоев $In_{1-x}Al_xAs$ ($750-800^\circ C$), только при которых они и были экспериментально получены методом ЖФЭ [$^{4-6}$]. Однако при температурах роста $750-800^\circ C$ велика термическая деградация подложки InP, что существенно ухудшает качество слоев и гетерограниц. Гетероструктуры $In_{1-x}Ga_xAs/In_{1-x}Al_xAs$ с 2МЭГ, полученные ЖФЭ при таких высоких температурах, имели подвижность носителей не более $1.3 \cdot 10^4 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ при 4.2 К [6]. Все это обуславливает интерес к разработке технологии получения слоев $In_{0.52}Al_{0.48}As$ и гетероструктур с 2МЭГ на их основе при более низких температурах эпитаксии.

Цель данной работы — разработка технологии получения слоев $In_{0.52}Al_{0.48}As$ на подложках InP методом жидкофазной эпитаксии при оптимальных для материала подложек температурах эпитаксии — $650^\circ C$.

Из-за большой величины коэффициента сегрегации Al в системе In—Al—As, количество Al в растворе—расплаве, необходимое для роста изопериодических с

подложкой InP слоев $\text{In}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ при температурах 650°C , составляет порядка $(1\div 4) \cdot 10^{-4}$ ат. долей. При ЖФЭ из раствора—расплава In—Al—As одного и того же состава постоянная решетки слоя, вырастающего на подложке с ориентацией $\langle 111 \rangle$ А, больше, чем слоя, вырастающего на подложке с ориентацией $\langle 100 \rangle$ [5]. Иными словами, количество Al в жидкой фазе, необходимое для получения изопериодического слоя на подложке InP, больше при использовании подложек с ориентацией $\langle 111 \rangle$ А, чем при использовании подложек с ориентацией $\langle 100 \rangle$. Поэтому нами в экспериментах применялись полуизолирующие подложки InP с ориентацией $\langle 111 \rangle$ А, обуславливающие большую массу навески Al, воспроизводимо получаемую в эксперименте.

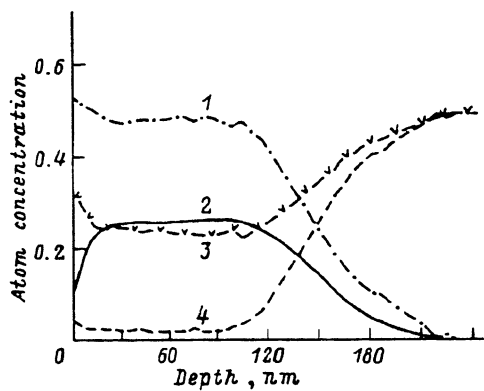
Процессы ЖФЭ проводились в горизонтальной графитовой cassette сдвигового типа в потоке очищенного водорода. Для преодоления проблем, связанных с наличием области несмешиваемости в фазовой диаграмме In—Al, индий и алюминий непосредственно перед проведением процесса роста отжигались в потоке водорода при температурах порядка 500°C . После отжига расплава In—Al cassette охлаждалась до комнатной температуры и в нее загружались подложка InP и остальные компоненты раствора—расплава. Общий вес навесок для формирования раствора—расплава составлял 2.5 г. Температура cassette поднималась выше температуры начала роста на $30\text{—}40^\circ\text{C}$, cassette выдерживалась при данной температуре 30 мин и охлаждалась со скоростью $(0.5\text{—}2.5)$ град/мин. Температура начала роста составляла $T = 680\text{—}675^\circ\text{C}$, интервал температур охлаждения $10\text{—}30^\circ\text{C}$. Концентрация Al в растворе—расплаве варьировалась от 10^{-4} до $5 \cdot 10^{-4}$ ат. долей.

Эпитаксиальные слои $\text{In}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ с зеркальной поверхностью были получены при температуре начала роста 675°C и содержании Al в растворе—расплаве $3 \cdot 10^{-4}$ ат. долей. Толщина эпитаксиальных слоев по результатам исследования с помощью профилометра при увеличении скорости охлаждения от 1.25 до 2.5 град/мин меняется от 1200 до 800 \AA . Следует отметить, что уже при незначительных отклонениях от заданной концентрации алюминия в растворе—расплаве (менее $1 \cdot 10^{-4}$ ат. долей), а также при малых скоростях охлаждения наблюдалось либо подрастворение подложки, либо отсутствие роста слоя.

В некоторых технологических режимах при тех же температурах начала эпитаксии и интервалах охлаждения были получены слои InAs толщиной порядка 10 мкм. При этом по результатам рентгеноспектрального микроанализа Al отсутствовал в составе эпитаксиального слоя. Получение эпитаксиальных слоев InAs большой толщины и достаточно совершенных при такой высокой разнице постоянных решеток слоя и подложки является весьма неожиданным. Особо интересным представляется тот факт, что получить слои InAs из растворов—расплавов, не содержащих Al, нам не удалось. Причины данного явления заслуживают отдельных дополнительных исследований.

Были проведены исследования фотолюминесценции (ФЛ) слоев $\text{In}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ при 4.2 К. Спектр ФЛ представлял собой одиночную широкую линию (длина волны в максимуме 0.84 мкм), положение и форма которой несколько изменялись от образца к образцу. В спектрах наблюдались также характерные линии излучения подложки InP, расположенные в более длинноволновой области. По энергетическому положению полосы ФЛ оценивалось отклонение состава твердого раствора $\text{In}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ в полученных образцах от $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ (ширина запрещенной зоны $E_g = 1.508 \text{ эВ}$ [8]), обеспечивающего согласование постоянных решетки в гетероструктуре $\text{In}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}/\text{InP}$. По данным ФЛ состав слоев соответствовал $x = 0.48$ с точностью $\Delta x \approx 0.02$. Таким образом, можно заключить, что разработанная технология роста слоев позволила получить эпитаксиальные слои $\text{In}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$, согласованные по постоянной решетки с подложкой InP.

Было проведено исследование состава полученных слоев $\text{In}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ с помощью рентгеноспектрального микроанализа. Так как слои имеют малые толщины,



Профили распределения компонентов As (1), Al (2), In (3), P (4) в слое твердого раствора $\text{In}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ по глубине травления образца ионами Ag^+ , полученные из оже-измерений.

использовалась тонкопленочная методика расчета толщины и состава на основе учета эффективного атомного номера системы пленка—подложка [9]. Образцы, показавшие по данным оже-профилирования наличие слоя с постоянным составом, были измерены для большей достоверности результатов при 5, 10, 15 кВ. Затем для всех значений были рассчитаны состав и толщина слоя,

данные усреднены. Погрешность расчета оценивается в 10% для элементов в слое и 20% — в подложке. Определенные таким образом значения концентрации алюминия и толщины слоя твердого раствора $\text{In}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ составляли $x = 0.46-0.48$ и $d = 1200-1300 \text{ \AA}$. Результаты измерений указывают на возможность присутствия фосфора в слое в концентрации порядка 1%. Значение x в пределах ошибки соответствует результатам измерений ФЛ и свидетельствует о согласовании постоянных решетки выращенного слоя и подложки InP.

Были получены оже-профили концентрации атомов по глубине в выращенных образцах. Послойное травление производилось ионами Ag^+ с энергией 2 кэВ при токе 80 нА. Ионный луч разворачивался в растр, обеспечивая скорость травления 59 \AA/мин (по данным рентгеноспектрального микроанализа). Количественный анализ проводился с использованием коэффициентов элементной чувствительности, определяемых по внутренним эталонам. Пример распределения концентраций по глубине в типичном образце приведен на рисунке. В профиле концентраций имеются приповерхностная область (толщиной $\sim 100 \text{ \AA}$), слой InAlAs толщиной порядка 1200 \AA с небольшим изменением содержания In и Al и переходный слой толщиной порядка $500-650 \text{ \AA}$. То обстоятельство, что наблюдается «толстый» переходный слой, может быть как обусловлено технологическими обязанностями во время роста (подрастворение подложки InP), так и связано с неоднородностью толщины эпитаксиального слоя по площади подложки в пределах области с латеральными размерами порядка диаметра электронного луча, т. е. 10 мкм.

Исследования гальваномагнитных параметров слоев $\text{In}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ проводились методом Ван-дер-По в магнитном поле до 0.7 Т от комнатной до гелиевых температур. Контакты на образцах изготавливались путем вжигания In и сплава In + Mn при температурах $T \approx 450 \text{ }^\circ\text{C}$ в вакууме.

Полученные нелегированные эпитаксиальные слои $\text{In}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ имели n -тип проводимости при концентрации электронов $n = 10^{14} \div 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Приведенные здесь значения концентрации следует считать оценочными, так как при таких малых толщинах эпитаксиальных слоев большое влияние на результаты гальваномагнитных измерений оказывают приповерхностные изгибы зон.

Разработанная технология выращивания слоев $\text{In}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ позволила методом ЖФЭ получить при температурах порядка $650 \text{ }^\circ\text{C}$ гетероструктуры InP/In_{0.52}Al_{0.48}As/In_{0.53}Ga_{0.47}As с зеркальной поверхностью. Технология получения слоев $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ при этом была аналогична [10]. Для создания двумерного канала в таких гетероструктурах слои In_{0.53}Ga_{0.47}As выращивались p -типа проводимости с концентрацией носителей $10^{14}-10^{15} \text{ см}^{-3}$ из растворов—расплавов, легированных редкоземельной примесью Sm, а толщина составляла $2-4 \text{ мкм}$ [6, 10]. Слои In_{0.52}Al_{0.48}As легировались до уровня $n \approx 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Гальваномагнитные

исследования при 4.2 К данных гетероструктур показали наличие анизотропии слабополюевого магнитосопротивления, что, по-видимому, свидетельствует о существовании в полученных образцах квазидвумерного электронного газа [11] на гетерогранице InAlAs/InGaAs.

Таким образом, результаты измерений с помощью профилометра, исследование оже-спектров и спектров фотолюминесценции, результаты рентгеноспектрального микроанализа и гальваномагнитные исследования полученных слоев $\text{In}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ и гетероструктур на их основе позволяют сделать вывод о том, что разработана технология получения методом ЖФЭ при низких температурах (650 °С) изопериодических с подложкой InP слоев $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] D. J. Newson, K. F. Berggren, M. Pepper, H. W. Myron, C. J. Davis, E. G. Scott. *J. Phys. C: Sol. St. Phys.*, **19**, 403 (1986).
- [2] W. Stolz., J. C. Maan, M. Altarelli, L. Tapfer, K. Ploog. *Phys. Rev. B*, **36**, 4310 (1986).
- [3] C. L. Lin, P. Chu, A. L. Kellner, H. H. Wieder, E. A. Rezek. *Appl. Phys. Lett.*, **49**, 1593 (1966).
- [4] K. Nakajima, T. Tanahashi, K. Akita. *Appl. Phys. Lett.*, **41**, 194 (1982).
- [5] K. Nakajima, T. Tanahashi, S. Komiya, K. Akita. *J. Electrochem. Soc.*, **130**, 1927 (1983).
- [6] А. М. Крещук, С. В. Новиков, И. Г. Савельев. *Письма ЖТФ*, **16**, вып. 5, 50 (1990).
- [7] М. Хансен, К. Андерко. *Структуры двойных сплавов*. М. (1962).
- [8] B. Wakefield, M. A. G. Halliwell, T. Kerr, D. A. Andrews, C. J. Davies, D. R. Wood. *Appl. Phys. Lett.*, **44**, 341 (1984).
- [9] С. В. Казаков, С. Г. Конников, В. В. Третьяков. *Изв. АН СССР*, **55**, 1627 (1991)
- [10] В. В. Воробьева, М. В. Егорова, А. М. Крещук, С. В. Новиков, И. Г. Савельев, И. И. Сайдашев. *Письма ЖТФ*, **15**, вып. 11, 73 (1989).
- [11] Ж. И. Алфёров, А. Т. Горелёнок, В. В. Мамутин, Т. А. Полянская, И. Г. Савельев, Ю. В. Шмарцев. *ФТП*, **18**, 1999 (1984).

Редактор Л. В. Шаронова
