

06.2;06.3;12

©1993 г.

ПСЕВДОМОРФНЫЕ НАПРЯЖЕННЫЕ ПЛЕНКИ InGaAsP С УПРУГИМИ ДЕФОРМАЦИЯМИ ДО 0.85% И ТОЛЩИНОЙ 0.1–0.3 МКМ, ПОЛУЧЕННЫЕ МЕТОДОМ ЖИДКОФАЗНОЙ ЭПИТАКСИИ

*Ю.Б.Болховитянов, А.М.Гилинский, Н.В.Номероцкий,
Е.М.Труханов, А.С.Ярошевич*

Пленки твердых растворов InGaAsP, согласованные по параметру решетки с подложками GaAs, используются для изготовления полупроводниковых лазеров [1]. Жидкофазная эпитаксия (ЖФЭ) этого твердого раствора хорошо исследована и согласованные по параметру решетки с подложкой пленки высокого структурного совершенства были выращены на плоскостях GaAs различных ориентаций [2]. В последние несколько лет появилось новое направление использования широкозонных твердых растворов — источники спин-поляризованных электронов, изготавливаемые в конфигурации фотоэмиттеров с отрицательным электронным средством [3]. В [4] впервые для этих целей было предложено использовать твердые растворы InGaP и InGaAsP. Для увеличения степени поляризации эмиттированных электронов пленка полупроводника должна быть напряженной [5]. Настоящая работа посвящена выращиванию и характеристике псевдоморфных напряженных пленок InGaAsP на подложках GaAs.

Выращивание пленок проводилось методом ЖФЭ при температуре 770° С по режимам, описанным в [6]. Как и в [6], галлий вносился в жидкую фазу, состоящую из индия и фосфора, в виде соединения GaAs. Поэтому твердый раствор состоял из четырех компонентов: In, Ga, P и As, причем атомная доля мышьяка в твердой фазе не превышала 1.5%. Пленки выращивались на подложках GaAs трех ориентаций: (100), (111) А и (111) В. Измерения рассогласования параметров решеток пленки и подложки и определение величины упругих деформаций осуществлялись с помощью рентгеновской двухкристальной дифрактометрии на спектрометре УАР ПП. Измерение ширины запрещенной зоны твердых растворов производилось при комнатной температуре фотолуминесцентным методом с использованием Ar⁺-лазера накачки (длина волны 488 нм), монохроматора и стандартной схемы счета фотонов. Ширина запрещенной зоны измерялась также по положению пика производной спектральной зависимости фототока из образца в электролит [7]. Наблюдалось хорошее совпадение длин волн максимума производной фототока и максимума ФЛ.

На рис. 1 представлены зависимости рассогласования параметра решетки псевдоморфной пленки InGaAsP и подложки $\Delta a/a = (a_f - a_s)_\perp / a_s$ для трех ориентаций GaAs как функции состава

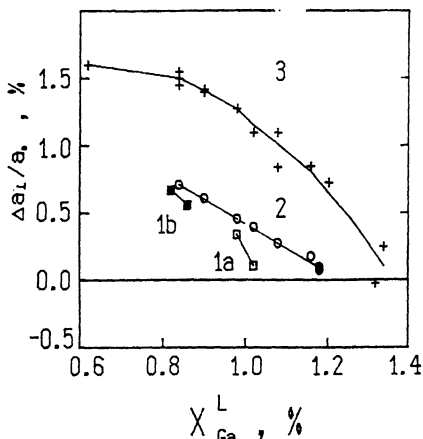


Рис. 1. Нормальное к поверхности рассогласование параметров решетки псевдоморфной пленки InGaAsP и подложки GaAs $\Delta a_{\perp}/a$ в зависимости от состава жидкой фазы X_{Ga}^L . 1 — поверхность (100) (1a и 1b — разные переохлаждения жидкой фазы), 2 — поверхность (111)A, 3 — поверхность (111)B.

ва жидкой фазы. Рис. 2 дает возможность выбора ширины зоны образца в зависимости от состава жидкой фазы или, с использованием рис. 1, в зависимости от рассогласования параметров решетки и пленки.

Как видно из рис. 1, на гранях (100) и (111) A достигнутые рассогласования пленок $\Delta a_{\perp}/a$ были не более 0.7%, что с учетом коэффициента Пуассона, равного 0.3, не превышало величины рассогласования свободных параметров решетки пленки и подложки 0.38%. Ограничения увеличения рассогласования имели морфо-

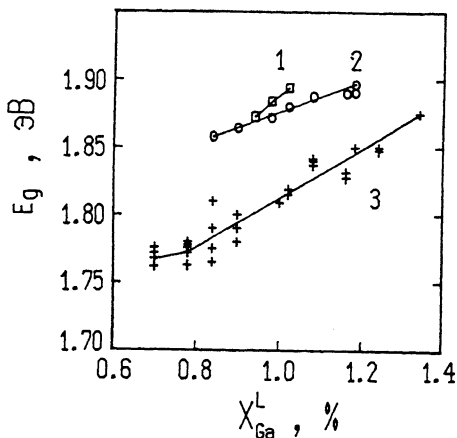


Рис. 2. Ширина запрещенной зоны пленки InGaAsP E_g в зависимости от состава жидкой фазы X_{Ga}^L . 1 — поверхность (100), 2 — поверхность (111)A, 3 — поверхность (111)B.

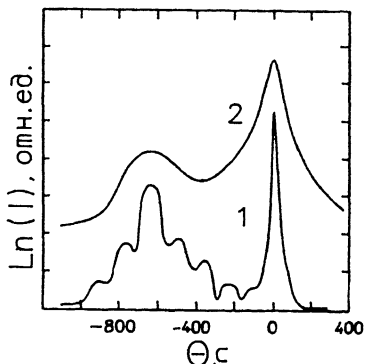


Рис. 3. Рентгеновские кривые качания для гетероструктур InGaAsP/GaAs (111) B. 1 — толщина пленки 0.15 мкм, 2 — толщина пленки 0.5 мкм. Пики справа — подложка GaAs. Полуширина пиков: подложка GaAs — 20 угловых секунд, пленка — 110 с (кривая 1); подложка GaAs — 146 с, пленка — более 200 с (кривая 2).

логический характер: с увеличением $\Delta a_{\perp}/a$ поверхность пленки ориентации (100) становилась нестабильней, покрываясь многочисленными холмиками, препятствовавшими сдвигу раствора. При тех же величинах $\Delta a_{\perp}/a$ ($\approx 0.7\%$) на поверхности пленки (111) A ориентации появлялись плоские пирамиды толщиной 1—1.5 мкм с захватом капель раствора, что делало такие пленки непригодными для дальнейшего использования.

Наибольшего рассогласования удалось достичь, выращивая пленки InGaAsP на подложках ориентации (111) B (рис. 1). Уменьшая толщину пленки с ростом рассогласования, мы смогли получать псевдоаморфные, упруго деформированные пленки InGaAsP во всем интервале рассогласований, приведенных на рис. 1. Максимально достигнутые упругие деформации в пленках равны 0.85%.

На рис. 3 приведены рентгеновские кривые качания для двух гетероструктур InGaAsP/GaAs (111) B, имеющих практически равные величины рассогласования $\Delta a_{\perp}/a = 1.5\%$, но разные толщины. Нижняя кривая измерена на гетероструктуре, для которой пластические деформации еще близки к нулю: полуширина кривой качания для подложки близка к величине, характеризующей совершенный материал GaAs, кривая качания пленки содержит осцилляции, обусловленные интерференцией отраженных рентгеновских лучей от верхней и нижней поверхностей пленки, свидетельствующие о ее высоком структурном совершенстве [8]. По периоду осцилляций толщина пленки была оценена равной 0.15 мкм.

Верхняя кривая качания приведена для более толстой пленки ≈ 0.5 мкм. Большое количество дислокаций несоответствия, следы которых были видны на поверхности пленки в виде характерной сетки ступеней, привело к резкому ухудшению структурного

совершенства как пленки, так и подложки, что проявилось в существенном уширении рентгеновских пиков (рис. 3).

Измерения кривых качания с использованием наклонных отражающих плоскостей позволили определить вклад пластической деформации в величину полной деформации пленок. При рассогласовании $\Delta a_{\perp}/a = 1.5\%$ этот вклад составил 2–3% при толщине пленки 0.45 мкм, а при толщине пленки 0.3 мкм с учетом ошибки измерения Δa_{\parallel} , не превышая 1%. Таким образом, экспериментальная критическая толщина введения дислокаций несоответствия при росте пленок InGaAsP в направлении (111) *B* была получена на порядок больше, чем теоретическая [9]. Такое превышение, по-видимому, связано с кинетическими особенностями роста, присущими ЖФЭ, в частности, с большой скоростью роста.

Полученные величины рассогласования псевдоморфной пленки InGaAsP и подложки GaAs являются рекордными для данного материала, а существенно более высокие, чем теоретические, критические толщины введения дислокаций несоответствия позволяют надеяться на успешное использование пленок InGaAsP в высокоэффективных источниках спин-поляризованных электронов.

Авторы благодарят А.С.Терехова за поддержку и постоянный интерес к работе, а также В.Л.Альперовича за полезные обсуждения. Благодарим также Фонд Сороса за частичную поддержку работы.

Список литературы

- [1] *Eliseev P.G.* In: *Semiconductor Optoelectronics.* /Ed. by M.F.Hermann. Polish Sci. Publishers. Warszawa, 1980. P. 157–186.
- [2] *Asai H., Oe K.* // *J.Cryst.Growth.* 1983. V. 62. N 1. P. 67–74.
- [3] *Hartman W., Conrath D., Gasteyer W. et al.* // *Nuclear Instr. and Methods in Phys. Res.* 1990. V. A286. N 1. P. 1–8.
- [4] *Альперович В.Л., Болховитянов Ю.Б., Паулиш А.Г., Терехов А.С.* // *Письма в ЖТФ.* 1992. Т. 18. Вып. 22. С. 67–71.
- [5] *Nakanishi T., Aoyagi H., Horinaka H. et al* // *Phys. Lett. A.* 1991. V. 158. N 6, 7. P. 345–349.
- [6] *Bolkhovityanov Yu.B., Bolkhovityanova R.I., Chikichev S.I.* // *J.Electron. Mater.* 1983. V. 12. N 3. P. 525–549.
- [7] *Madelon R.* // *Revue de Physique Appliquee.* 1979. V. 14. P. 863–867.
- [8] *Matyi R.J., Melloch M.R., Woodal J.H.* // *Appl. Phys. Lett.* V. 60. N 21. P. 2642–2644.
- [9] *Гутаковский А.К., Пчеляков О.П., Стенин С.И.* // *Кристаллография.* 1980. Т. 25. Вып. 4. С. 806–814.

Институт физики
полупроводников СО РАН,
Новосибирск

Поступило в Редакцию
25 мая 1993 г.