

Спонтанно формирующиеся периодические InGaAsP-структуры с модулированным составом

© Л.С. Вавилова, В.А. Капитонов, А.В. Мурашова, Н.А. Пихтин, И.С. Тарасов[¶],
И.П. Ипатова, В.А. Щукин, Н.А. Берт, А.А. Ситникова

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

(Получена 1 марта 1999 г. Принята к печати 2 марта 1999 г.)

Теоретически и экспериментально установлено, что в определенных интервалах температур и составов твердые растворы InGaAsP представляют собой систему напряженных, чередующихся (во взаимно перпендикулярных направлениях [100] и [010]) доменов твердого раствора двух различных составов с разными постоянными решетки. Домены резко выражены у поверхности эпитаксиальной пленки и размываются в глубину к подложке. Полученные данные с большой вероятностью указывают на спинодальный распад твердых растворов InGaAsP в экспериментальных образцах.

1. Введение

В настоящей работе проведено детальное сопоставление результатов теоретических и экспериментальных исследований четверных твердых растворов InGaAsP в области неустойчивости.

2. Теория

Четверные твердые растворы типа $A_{1-x}B_xC_{1-y}D_y$ с положительной энтальпией образования становятся при некоторой критической температуре T_c неустойчивыми по отношению к флуктуациям состава $\delta x(\mathbf{r})$ и $\delta y(\mathbf{r})$ [1–4]. Неустойчивость означает, что твердый раствор с модулированным составом $x(\mathbf{r}) = \bar{x} + \delta x(\mathbf{r})$ и $y(\mathbf{r}) = \bar{y} + \delta y(\mathbf{r})$ обладает меньшей свободной энергией, чем свободная энергия однородного твердого раствора с составом \bar{x} и \bar{y} . Вследствие этого однородный твердый раствор распадается на модулированную по составу периодическую структуру. Такой термодинамический фазовый переход называется спинодальным распадом твердых растворов.

На рис. 1 показаны области абсолютно неустойчивых (1), метастабильных (2) и устойчивых (3) твердых растворов, рассчитанные при температуре $T = 900$ К. Твердые растворы, относящиеся к области 1, неустойчивы даже относительно бесконечно малых флуктуаций состава, а относящиеся к области 2 — относительно флуктуаций состава конечной амплитуды. Для InGaAsP расчетное значение T_c составляет 1275К [4].

В работах [5,6,7] была исследована устойчивость эпитаксиальной пленки твердого раствора $A_{1-x}B_xC$, когерентно сопряженного с (001)-подложкой кубического кристалла. Показано, что конечным состоянием спинодального распада твердого раствора является система напряженных, т.е. сжатых и растянутых, доменов чере-

дующегося состава. Чередование доменов происходит в одном из направлений наилегчайшего сжатия кубического кристалла: [100], [010], [001]. Модуляция состава максимальна на растущей поверхности и экспоненциально убывает в глубину пленки (направление z), как показано на рис. 2.

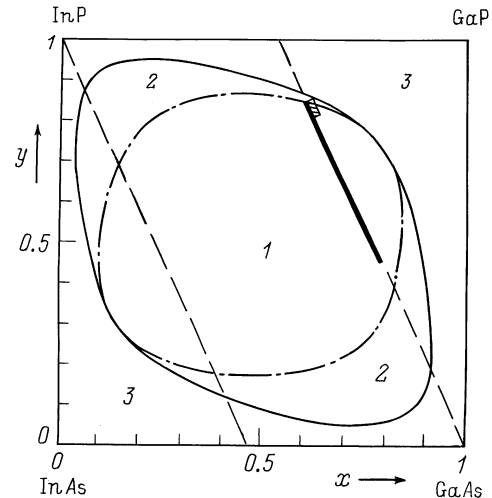


Рис. 1. Диаграмма составов для InGaAsP [4].

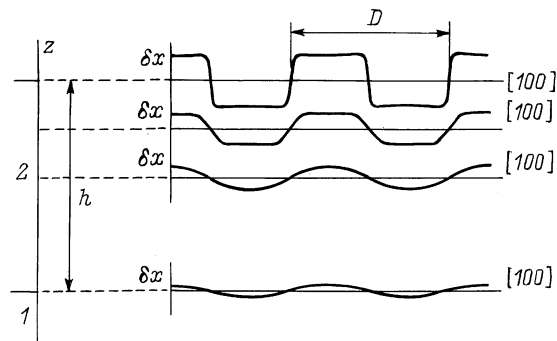


Рис. 2. Теоретически рассчитанный равновесный профиль состава твердого раствора $A_{1-x}B_xC$ в эпитаксиальной пленке (2) на подложке (1) [7].

[¶] Факс: (812)247-80-38 (Tarasov)
E-mail: tarasov@hpld.ioffe.rssi.ru (Tarasov)

3. Экспериментальные результаты

I. Эпитаксиальные слои InGaAsP, изготовленные на подложках InP(001) и GaAs(001) методом жидкостной эпитаксии при температурах ниже критической ($T_{\text{growth}} < T_c$), в области спинодального распада имеют характерный спектр фотолуминесценции (ФЛ), состоящий из двух полос. В качестве примера такой спектр приведен на рис. 3 для образца InGaAsP, который был выращен на подложке GaAs (001) при $T_{\text{growth}} = 1023$ К.

Наличие двух полос в спектрах ФЛ таких образцов позволяет предположить, что эпитаксиальный слой неоднороден и состоит из двух твердых растворов различного состава.

II. На этих же образцах с помощью просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) в рефлексе (200), чувствительном к составу твердого раствора, была получена периодическая дифракционная картина (например, рис. 4, *a*).

В образцах планарной геометрии в ПЭМ изображении модуляция интенсивности (состава) наблюдается во взаимно перпендикулярных направлениях [100] и [010], что является указанием на возможность спинодального распада твердого раствора.

Эпитаксиальные слои InGaAsP, выращенные в области абсолютно устойчивых твердых растворов, имеют единственный пик в спектрах ФЛ. В соответствующих ПЭМ изображениях этих образцов не наблюдается периодической дифракционной картины. Эти два факта свидетельствуют о том, что такие эпитаксиальные слои InGaAsP представляют собой однородные твердые растворы.

III. На рис. 1 показаны две экспериментально определенные области спинодального распада изопериодических с GaAs (001) твердых растворов InGaAsP, которые были выращены при температурах (T_{growth}) 1023К

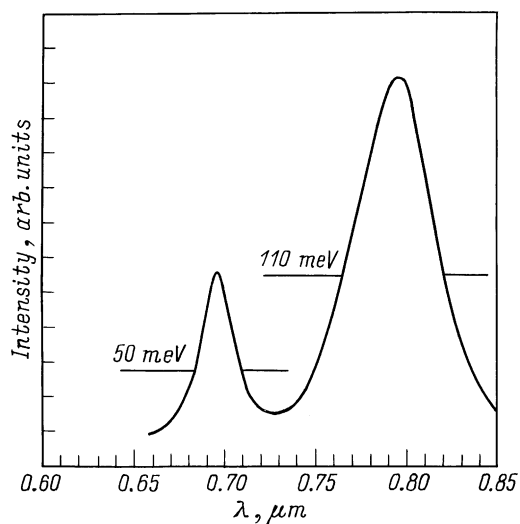


Рис. 3. Спектр фотолуминесценции ($T = 300$ К) эпитаксиального слоя InGaAsP, выращенного в области неустойчивости четверных твердых растворов.

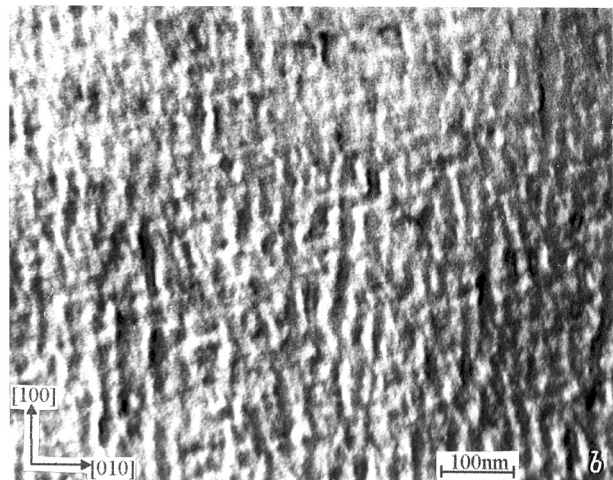
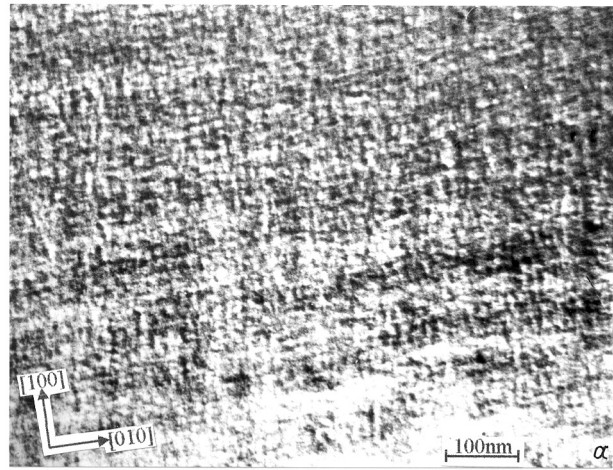


Рис. 4. Фотографии образца InGaAsP в планарном сечении, полученные на просвечивающем электронном микроскопе EM-420 в рефлексах: *a* — (200) (чувствителен к составу твердого раствора); *b* — (220) (чувствителен к напряжениям в образце). Исследуемый эпитаксиальный слой InGaAsP был выращен на подложке InP (001) в области неустойчивости твердых растворов при $T_{\text{growth}} = 867$ К.

(сплошной отрезок) и 1063К [8] (заштрихованный отрезок). Увеличение температуры роста приводит к значительному уменьшению области составов твердых растворов InGaAsP, которые имеют, во-первых, две полосы в спектрах ФЛ (рис. 3) и, во-вторых, периодическую ПЭМ картину модуляции состава (рис. 4, *a*). Это говорит о приближении температуры роста к критической температуре спинодального распада.

IV. Исследования с помощью ПЭМ эпитаксиальных слоев InGaAsP/InP (001), выращенных в области неустойчивости, позволили установить наличие упругих деформаций на границах областей различного состава. В образцах планарной геометрии исследовались ПЭМ картины в рефлексе (200) (рис. 4, *a*), чувствительном к составу, и в рефлексе (220) (рис. 4, *b*), чувствительном к напряжениям. Период повторения чередую-

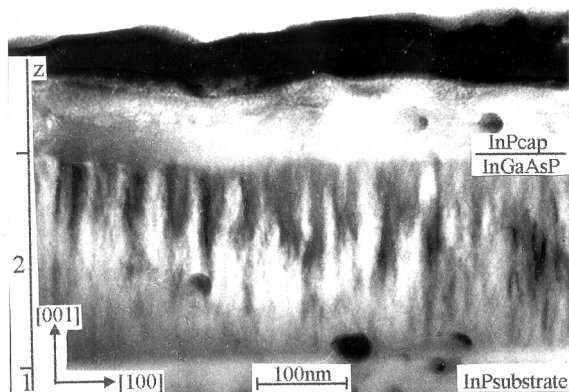


Рис. 5. Фотография образца InGaAsP в поперечном сечении, полученная на просвечивающем электронном микроскопе EM-420. Исследуемый эпитаксиальный слой InGaAsP был выращен на подложке InP (001) в области неустойчивости твердых растворов при $T_{\text{growth}} = 870$ К.

щихся областей в рефлексе (200) в 2 раза меньше, чем в рефлексе (200), чувствительном к составу. Из чего следует, что на границах чередующихся областей различного состава существуют упругие деформации. При этом напряженная периодическая структура имеет квантовую эффективность ФЛ, близкую к 100%, что исключает остаточную деформацию (дислокации, вызванные несоответствием параметров решетки двух твердых растворов).

V. Исследования с помощью ПЭМ поперечного сечения эпитаксиальных слоев InGaAsP/InP (001) выявили наличие периодической структуры преимущественно у поверхности пленки. В глубину слоя периодическая структура размывается и полностью отсутствует на границе раздела с подложкой (рис. 5), что качественно согласуется с расчетной зависимостью, приведенной на рис. 2.

4. Заключение

Таким образом, сопоставление результатов теоретических исследований спинодального распада твердых растворов полупроводников $A^{III}B^V$ с изучением образцов InGaAsP, выращенных жидкостной эпитаксией в области неустойчивости, позволило нам заключить, что в наших экспериментальных образцах мы с большой вероятностью наблюдали спинодальный распад твердых растворов InGaAsP.

Наши результаты позволяют предполагать, что спинодальный распад твердых растворов можно использовать для получения спонтанно образующихся сверхрешеток.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 97-02-18105).

Список литературы

- [1] G.B. Stringfellow. *J. Cryst. Growth*, **65**, 454 (1983).
- [2] I.P. Ipatova, V.A. Shchukin, V.G. Malyshkin, A.Yu. Maslov, E. Anastassakis. *Sol. St. Commun.*, **78**, 19 (1991).
- [3] B. de Cremoux. *J. Physique*, **43**, C5–19 (1982).
- [4] И.П. Ипатова, В.Г. Малышкин, А.Ю. Маслов, В.А. Шукин. *ФТП*, **27** (2), 285 (1993).
- [5] I.P. Ipatova, V.G. Malyshkin, V.A. Shchukin. *J. Appl. Phys.*, **74**, 7198 (1993).
- [6] I.P. Ipatova, V.G. Malyshkin, V.A. Shchukin. *Phil. Mag.*, **70**, 557 (1994).
- [7] Д. Бимберг, И.П. Ипатова, П.С. Копьев, Н.Н. Леденцов, В.Г. Малышкин, В.А. Шукин. *УФН*, **167** (3), 552 (1997).
- [8] Seiji Mukai. *J. Appl. Phys.*, **54**(5), 2635 (1983).

Редактор В.В. Чалдышев

Spontaneously formed periodical InGaAsP-structures with a modulated composition

L.S. Vavilova, V.A. Kapitonov, A.V. Murashova,
N.A. Pikhtin, I.S. Tarasov, I.P. Ipatova, V.A. Shchukin,
N.A. Bert, A.A. Sitnikova

A.F. Ioffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St.Petersburg, Russia