

ЭЛЛИПСОМЕТРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЕВ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ InGaAs И InAlAs, ИЗОПЕРИОДИЧЕСКИХ С InP

© С.В. Дроздов, Г.Д. Купшидзе, В.Б. Лебедев,
С.В. Новиков, Л.В. Шаронова

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия
(Получена 20 ноября 1995 г. Принята к печати 28 ноября 1995 г.)

Слои твердых растворов InGaAs и InAlAs, изопериодических с подложкой InP, выращены методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Проведены эллипсометрические измерения на длине волны 6328 Å. В результате анализа эллипсометрических параметров определены значения показателя преломления и коэффициента экстинкции для ряда твердых растворов.

При работе с полупроводниковыми структурами, представляющими собой чередующиеся гетероэпитаксиальные слои твердых растворов, как при выращивании, так и при стравливании слоев важной задачей является идентификация поверхностного слоя и определение его толщины. В этом плане привлекательным представляется неразрушающий классический метод отражательной эллипсометрии, сравнительно простой идеологически, позволяющий определять оптические характеристики и толщины поверхностных слоев из измерений дополнительной поляризации электромагнитного излучения, возникающей в результате взаимодействия исходно поляризованного излучения с веществом (см., например, [1]). Более того, когда для исследуемого твердого раствора точно известны зависимости показателя преломления n и коэффициента экстинкции k (или, иначе, комплексного показателя преломления $N = n - ik$) от состава, т.е. от x , появляется возможность из эллипсометрических измерений определить x .

Цель данной работы — эллипсометрическое исследование характеристик гетероэпитаксиальных слоев твердых растворов InGaAs и InAlAs, изопериодических с подложкой InP.

Измерения эллипсометрических углов Δ (разность сдвигов фаз, возникающая при отражении света с p - и s -поляризацией) и ψ ($\operatorname{tg} \psi$ дает отношение изменений амплитуд при отражении для света с p - и s -поляризацией) проводились нами по стандартной методике с использованием эллипсометра ЛЭФ-3М и He-Ne-лазера (длина волны излучения $\lambda = 6328 \text{ \AA}$). Исследовались слои InGaAs, выращенные прямо

на подложке InP или поверх эпитаксиального слоя InAlAs на подложке InP, и слои InAlAs, выращенные прямо на подложке InP или поверх эпитаксиального слоя InGaAs на подложке InP. Все слои твердых растворов выращивались методом молекулярно-лучевой эпитаксии и по параметру решетки были близки к InP. Эпитаксиальные слои имели толщину от 0.3 до 1.5 мкм, и с точки зрения оптических измерений их можно было рассматривать как бесконечно толстые из-за заметной величины коэффициента экстинкции. Все измерения проводились при угле падения света $\phi = 75^\circ$.

В литературе имеются лишь отдельные сведения, касающиеся оптических параметров рассматриваемых твердых растворов, подробные зависимости $n(x)$ и $k(x)$ ни для $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, ни для $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ нам не известны. Относительно $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ тем не менее имеется информация, на которую можно опереться. Во-первых, в известной работе [2] приводятся спектры n и k InAs и GaAs. Используя линейную интерполяцию по x , для твердого раствора $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ имеем оценку интересующих нас параметров: $n = 3.90$ и $k = 0.41$. Во-вторых, в [3] приведены результаты прямых эллипсометрических измерений на четверных твердых растворах в системе InGaAsP, откуда следует, что для $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ $n = 3.95$ и $k = 0.41$. Существенно, что эти последние значения были получены из эллипсометрических измерений путем расчета в модели, предполагающей на поверхности наличие окисла толщиной 50 Å. Тонкий окисный слой, всегда существующий на поверхности полупроводников $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ и при этом не поддающийся отчетливой экспериментальной идентификации, вносит неопределенность: учет или неучет его в модели для расчета n и k материала по измеряемым эллипсометрическим параметрам Δ и ψ сильно влияет на результат. Если в расчетную модель заложить окисный слой с показателем преломления $n_{\text{ок}} = 1.8 \div 2.0$ и толщиной $30 \div 50$ Å (характерные значения для окисла на $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$), то оказывается, что в указанных пределах влияние $n_{\text{ок}}$ на результат мало, а влияние $d_{\text{ок}}$ — существенно.

Анализ результатов наших измерений эллипсометрических параметров Δ и ψ на образце с толстым (~ 1.5 мкм) исследуемым слоем InGaAs с учетом всего сказанного приводит к следующему выводу: наилучшим образом точки ложатся на расчет, если $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ имеет $n = 3.95$, $k = 0.41 \div 0.43$ (что согласуется с [3,4]), а толщина окисла составляет 45 Å.

Перейдем к рассмотрению оптических параметров InAlAs, причем первоочередной интерес представляют составы в области согласования по параметру решетки с InP ($x = 0.52$). Прямые экспериментальные данные для этого твердого раствора в литературе не приводятся. Невозможно сделать и реальную интерполяционную оценку (как мы сделали это выше для InGaAs), так как отсутствуют экспериментальные значения n и k для AlAs из-за его химической нестабильности на воздухе.

Результаты наших измерений на трех образцах с верхним слоем InAlAs в виде точек на плоскости Δ – ψ приведены на рис. 1. Нижние точки для образцов 41 и 44 соответствуют поверхности образца, подвергнутой обычной постэпитаксиальной обработке, остальные — после дополнительной обработки в HCl. Для того чтобы определить область значений n и k InAlAs, в которую попадают эксперименталь-

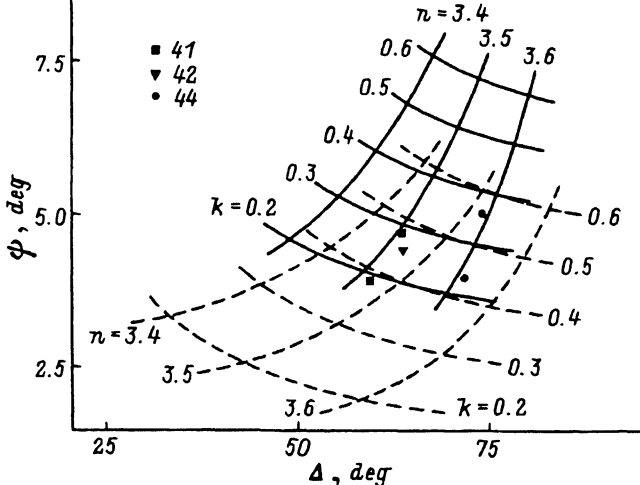


Рис. 1. Точки — эллипсометрические параметры слоев InAlAs толщиной ~ 1 мкм на InP (образцы 41, 44) и на InGaAs/InP (образец 42). Линии — расчет для набора значений n и k полупроводникового материала в модели чистой поверхности (штриховые) и при наличии окисного слоя с $n_{\text{ox}} = 1.9$ толщиной 30 \AA (сплошные).

ные точки, здесь же нанесена расчетная сетка, определенная набором значений n (3.4, 3.5, 3.6) и k (0.2, 0.3, 0.4) в двух вариантах: для абсолютно чистой полупроводниковой поверхности (штриховые линии) и поверхности с окисным слоем толщиной (для примера) 30 \AA (сплошные). Видно, что в зависимости от модели точки попадают в область разных значений n и k , о чем уже говорилось выше. При этом существенно бóльшая неопределенность возникает в k , а n оказывается довольно отчетливым искомым параметром. Сильное расхождение по показателю преломления точек для образцов 41, 42 (с одной стороны) и 44 (с другой) обусловлено небольшим их различием по составу — из измерений методами фотолюминесценции и рентгеноспектрального микроанализа содержание In составляет $x = 0.45$ и 0.54 .

Чтобы определить значения n и k , будем рассматривать эти величины как подгоночные параметры для расчетных кривых типа приведенных на рис. 2, а, которые показывают, как при разных параметрах полупроводникового материала смещается точка на плоскости $\Delta - \psi$ с увеличением толщины окисла. Смещение вверх на рисунке экспериментальных точек для образцов 41 и 44 после обработки в HCl следует этим кривым и, очевидно, обусловлено возрастанием толщины окисла. Здесь необходимо сделать разумное предположение относительно толщины поверхностного окисного слоя. Как нам представляется, на эпитаксиальной поверхности без специальной обработки следует полагать $d_{\text{ox}} = 30 \div 50 \text{ \AA}$, поскольку такая величина характерна для естественного окисла на различных $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$, в том числе (по результатам наших измерений) и на таком твердом растворе, как $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ с содержанием Al $0 \leq x \leq 0.9$ [9]. В рамках сделанного нами допущения наилучшее согласие расчета с экспериментом достигается для образцов 41, 42, т.е. $\text{In}_{0.45}\text{Al}_{0.55}\text{As}$, при $n = 3.52 \div 3.53$, $k \simeq 0.2$, а для образца 44, т.е. $\text{In}_{0.54}\text{Al}_{0.46}\text{As}$, при $n = 3.61 \div 3.62$, $k \simeq 0.2$ (см. рис. 2, б).

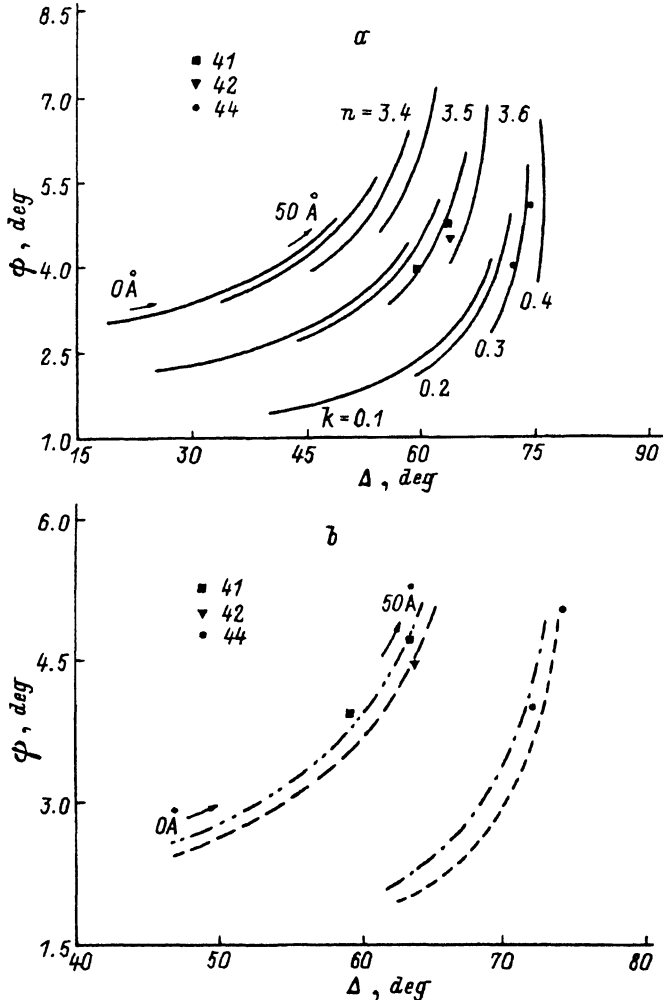


Рис. 2. Сопоставление экспериментальных точек для образцов 41, 42, 44 InAlAs с расчетом при изменении толщины поверхностного окисного слоя от 0 до 50 Å: а — для набора значений n и k полупроводникового материала; б — для параметров, дающих наилучшее соответствие, — $k = 0.2$, $n = 3.52$ (1), 3.53 (2), 3.61 (3), 3.62 (4).

Для того чтобы просто показать возможности эллипсометрического метода применительно к контролю тонких эпитаксиальных слоев в рассматриваемых структурах, на рис. 3 приведена эллипсометрическая номограмма, соответствующая росту слоя $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ на поверхности $\text{In}_{0.45}\text{Al}_{0.55}\text{As}$. Видно, что при выбранном угле падения 75° , большем псевдобрюстеровского угла для InAlAs и меньшем такого же для InGaAs, появление на поверхности InAlAs слоя InGaAs толщиной даже в несколько Å приводит к сильному изменению эллипсометрических параметров, особенно Δ , поэтому слой оказывается идентифицируемым и возможна оценка его толщины. Например, появление слоя InGaAs толщиной в 100 Å приводит в случае отсутствия окисла на поверхности (нижняя спираль) к переходу от точки А с $\Delta = 45^\circ 9'$,

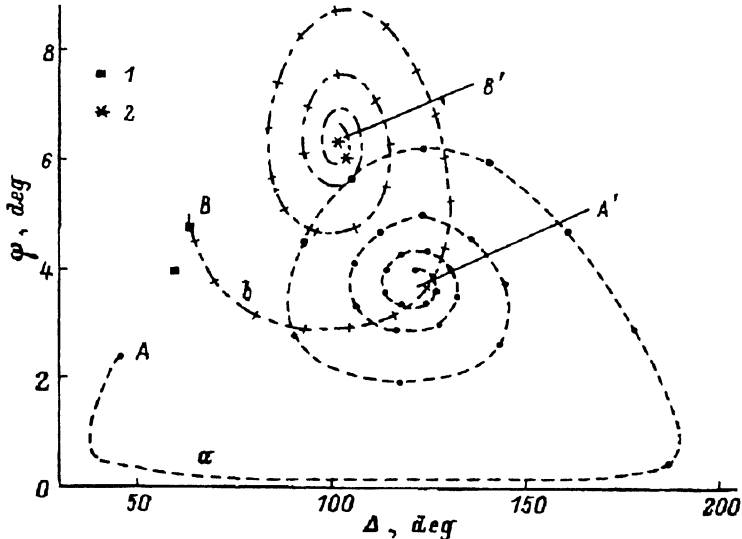


Рис. 3. ψ - Δ -номограмма, соответствующая росту слоя InGaAs ($N = 3.95 - i0.42$) на InAlAs ($N = 3.52 - i0.2$) в отсутствие окисла (a) и при наличии на границе твердый раствор-воздух окисла с $n_{\text{ок}}=1.9$ толщиной 45 Å (b). A — InAlAs, A' — InGaAs. Точки B, B' соответствуют смещению точек A, A' при наличии окисла. 1, 2 — экспериментальные точки для образца 41 InAlAs и образца 40 InGaAs соответственно. Метки на кривых проставлены через каждые 100Å растущего слоя.

$\psi = 2^{\circ}29'$ к точке с $\Delta = 186^{\circ}34'$, $\psi = 0^{\circ}28'$, а при наличии окисла толщиной 45 Å (верхняя спираль) — к переходу от точки B с $\Delta = 63^{\circ}39'$, $\psi = 4^{\circ}50'$ к точке с $\Delta = 95^{\circ}38'$, $\psi = 2^{\circ}52'$.

Таким образом, в данной работе определен комплексный показатель преломления для ряда составов твердых растворов InGaAs и InAlAs, изопериодических с InP. Так, для $\text{In}_{0.54}\text{Al}_{0.46}\text{As}$ $n = 3.61 \div 3.62$, $k \simeq 0.2$, а для $\text{In}_{0.45}\text{Al}_{0.55}\text{As}$ $n = 3.52 \div 3.53$, $k \simeq 0.2$.

Список литературы

- [1] Р. Аззам, Н. Башара. *Эллипсометрия и поляризованный свет* (М., Мир, 1981).
- [2] D.E. Aspnes, A.A. Studna. *Phys. Rev. B*, **27**, 985 (1983).
- [3] Н. Burkhard, Н.В. Dinges, E. Kuphal. *J. Appl. Phys.*, **53**; 655 (1982).
- [4] D.E. Aspnes, S.M. Kelso, R.A. Logan, R. Bhat. *J. Appl. Phys.* **60**, 754 (1986).
- [5] Т.Л. Макарова, Л.В. Шаронова, Ю.В. Шмарцев. *ФТП*, **27**, 1830 (1993).

Редактор Л.В. Шаронова

Ellipsometric investigation of InGaAs and InAlAs solid solutions epitaxial layers isoperiodical to InP

S. V. Drozdov, G. D. Kipshidze, V. B. Lebedev, S. V. Novikov, L. V. Sharonova

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

InGaAs and InAlAs solid solutions layers isoperiodical to InP substrates were grown by the molecular-beam-epitaxy method. Ellipsometric measurements were carried out at a wavelength 6328 Å. As a result of ellipsometric parameters analysis refractive index and extinction coefficient values were determined for a set of solid solution compositions.
