

06.2

**Фотолюминесцентные исследования
гетероструктур с набором сильно
напряженных квантовых ям $\text{Ga}_{0.76}\text{In}_{0.24}\text{As}$,
разделенных компенсирующими
барьерами $\text{GaAs}_y\text{P}_{1-y}$**

© В.В. Шамахов, Д.А. Винокуров, А.Л. Станкевич, В.А. Капитонов,
С.А. Зорина, Д.Н. Николаев, А.В. Мурашова,
А.Д. Бондарев, И.С. Тарасов

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург
E-mail: dmitry.vinokurov@pop.ioffe.rssi.ru

Поступило в Редакцию 22 июня 2005 г.

Согласно расчетной модели, данным фотолюминесцентных исследований и просвечивающей электронной микроскопии определен состав компенсирующих барьеров $\text{GaAs}_{0.85}\text{P}_{0.15}$ для структуры с 4 сильно напряженными квантовыми ямами $\text{Ga}_{0.76}\text{In}_{0.24}\text{As}$, исключая релаксацию упругих напряжений в них. С использованием выбранных компенсирующих барьеров методом МОС-гидридной (металлоорганические соединения) эпитаксии были изготовлены лазерные гетероструктуры. На их основе получены лазерные диоды с коротким резонатором ($\sim 100 \mu\text{m}$), излучающие на длине волны 1060 nm оптическую мощность 100 mW в непрерывном режиме генерации.

Для создания одночастотных полупроводниковых лазеров используют несколько подходов: распределенную обратную связь, составной резонатор, внешнюю дифракционную решетку, а также конструкцию, состоящую из лазера и оптического волокна с брэгговской решеткой [1]. Для достижения стабильного одночастотного режима в таких приборах используются лазеры с малой ($\leq 200 \mu\text{m}$) длиной резонатора. В этом случае, чтобы добиться максимального усиления в качестве активной области лазерного диода, используют набор квантовых ям (КЯ) [2]. Для

лазеров, излучающих в диапазоне длин волн более 1000 nm, в качестве материала активной области обычно используется сильно напряженный твердый раствор $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$. При этом становится важным избежать релаксации упругих напряжений в структуре, поскольку релаксация сопровождается возникновением дислокаций, что приводит к ухудшению оптических характеристик лазерных диодов. Эта проблема может быть решена за счет введения барьеров, компенсирующих напряжения в активной области.

В данной работе нами были исследованы фотолюминесцентные свойства гетероструктур с 4 сильно напряженными КЯ $\text{Ga}_{0.76}\text{In}_{0.24}\text{As}$, разделенными различными по составу компенсирующими барьерами $\text{GaAs}_y\text{P}_{1-y}$ ($1 \leq y \leq 0.8$). На основании полученных данных был выбран состав компенсирующего барьера $\text{GaAs}_y\text{P}_{1-y}$, при котором в структуре не происходит релаксации упругих напряжений.

Структуры для фотолюминесцентных исследований изготавливались на установке МОС-гидридной эпитаксии Emcore GS3100 с вертикальным реактором. Процесс роста осуществлялся при пониженном давлении (77 Torr), скорости вращения подложкодержателя 1000 tur./min и температуре 700°C. На подложках $n\text{-GaAs}(100)$ были выращены нелегированные гетероструктуры, состоящие из эмиттерных слоев $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$, волноводных слоев GaAs и активной области. Активная область состояла из 4 сильно напряженных КЯ $\text{Ga}_{0.76}\text{In}_{0.24}\text{As}$ ($\Delta a/a = 1.7 \cdot 10^{-2}$) толщиной 10 nm, разделенных 3 компенсирующими барьерами $\text{GaAs}_y\text{P}_{1-y}$ ($1 \leq y \leq 0.8$) толщиной 32 nm. Таким образом, общая толщина активной области составляла около $H = 136$ nm. Составы твердых растворов $\text{GaAs}_y\text{P}_{1-y}$ компенсирующих барьеров определялись по данным высокоразрешающей рентгеновской дифрактометрии.

Нами была рассчитана критическая толщина активной области при различных по составу компенсирующих барьерах $\text{GaAs}_y\text{P}_{1-y}$. Критическая толщина определялась из трансцендентного уравнения, полученного Matthews [3,4]:

$$H_C = \frac{b(1 - \nu \cos^2 \varphi)}{2\pi f(1 + \nu) \sin \varphi \cos \theta} \left(\ln \frac{H_C}{b \sin \theta} + 1 \right), \quad (1)$$

где H_C — критическая толщина, ν — коэффициент Пуассона, b — вектор Бюргерса, φ — угол между вектором Бюргерса и линией

дислокации несоответствия ($\varphi = 60^\circ$), θ — угол между плоскостью скольжения и межфазной границей ($\theta = 54.74^\circ$), f — несоответствие периодов решеток между слоем и подложкой.

Поскольку формула (1) выведена для расчета критической толщины одного слоя, а активная область в нашем случае представляет собой многослойную структуру, то для этого мы вводим вместо параметра f параметр эквивалентного несоответствия решеток (f_{eq}), который заменяет многослойную активную область на область, состоящую из одного слоя с усредненным значением несоответствия периодов решеток. Для определения f_{eq} вводится понятие эквивалентной деформации ε_{eq} . Эти величины связаны между собой следующим образом: $f_{eq} = -\varepsilon_{eq}$. Значение ε_{eq} можно определить из следующего выражения:

$$\varepsilon_{eq} = \frac{n\varepsilon_1 h_1 + m\varepsilon_2 h_2}{nh_1 + mh_2}, \quad (2)$$

где n, m — число КЯ и компенсирующих барьеров соответственно, $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ — деформация для КЯ и компенсирующего барьера соответственно, h_1, h_2 — толщина КЯ и компенсирующего барьера соответственно.

Величина деформации для КЯ и компенсирующего барьера определялась из следующего выражения:

$$\varepsilon_i = \frac{a_{sub} - a_i}{a_i}, \quad (3)$$

где a_{sub} — период решетки подложки, a_i — период решетки i -го слоя в недеформированном состоянии, образующего активную область (либо период решетки для КЯ, либо период решетки для компенсирующего барьера).

На рис. 1 приведена расчетная зависимость критической толщины активной области (H_C) при температуре 700°C от величины несоответствия параметров решеток подложки и компенсирующего барьера $\text{GaAs}_y\text{P}_{1-y}$ (f). Из данной зависимости видно, что критическая толщина активной области возрастает с увеличением компенсирующих напряжений, т.е. с увеличением содержания фосфора в компенсирующем барьере, состоящем из твердого раствора $\text{GaAs}_y\text{P}_{1-y}$. При составе компенсирующего барьера $\text{GaAs}_y\text{P}_{1-y}$ $y \approx 0.855$ ($f \approx -5.2 \cdot 10^{-3}$) расчетная критическая толщина становится равной толщине активной области, заданной нами, т.е. 136 nm. Таким образом, при составах

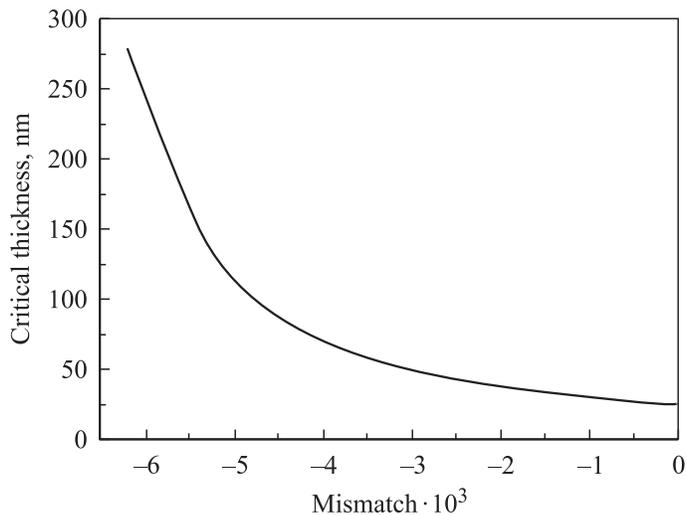


Рис. 1. Расчетная зависимость критической толщины активной области (H_C) при температуре роста 700°C от величины несоответствия параметров решеток подложки и компенсирующего барьера $\text{GaAs}_y\text{P}_{1-y}$ (f).

компенсирующих барьеров $\text{GaAs}_y\text{P}_{1-y}$ $y \leq 0.855$ ($f \leq -5.2 \cdot 10^{-3}$) толщина активной области становится меньше расчетной критической толщины ($H \leq H_C$), т.е. это означает, что при данных составах компенсирующих барьеров $\text{GaAs}_y\text{P}_{1-y}$ не будет происходить релаксации упругих напряжений и, как следствие, возникновения дислокаций несоответствия, которые приводят к существенному ухудшению излучательных характеристик приборов.

Для проверки полученных расчетов нами были проведены фотолюминесцентные исследования эпитаксиальных гетероструктур с различными по составу компенсирующими барьерами $\text{GaAs}_y\text{P}_{1-y}$ (структура 1: $y = 1$, структура 2: $y = 0.92$, структура 3: $y = 0.85$). На рис. 2 приведены спектры фотолюминесценции (ФЛ) для этих структур при температуре 300 К. Из рис. 2 видно, что интенсивность спектров ФЛ возрастает с увеличением компенсирующих напряжений от структуры 1 к структуре 3. Такое поведение спектров ФЛ, по нашему мнению, связано с тем, что с увеличением компенсирующих напряжений

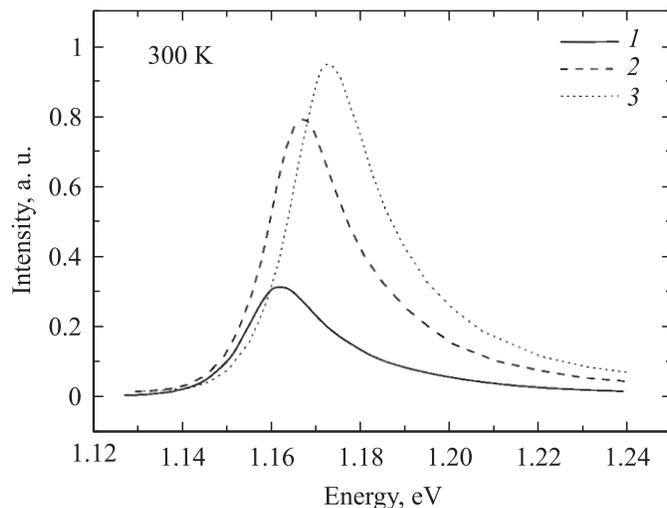


Рис. 2. Спектры фотолюминесценции при температуре 300 К для структур с различными по составу компенсирующими барьерами $\text{GaAs}_y\text{P}_{1-y}$: структура 1: $y = 1$, структура 2: $y = 0.92$, структура 3: $y = 0.85$.

уменьшается степень релаксации упругих напряжений в структуре и, следовательно, уменьшается количество дефектов. Также этот факт был подтвержден тем, что при снятии спектров ФЛ в различных точках образца в структурах 1 и 2 наблюдалась неоднородность в их интенсивностях. При этом степень неоднородности интенсивности спектров ФЛ уменьшалась при переходе к структурам с большими компенсирующими напряжениями, и в структуре 3 неоднородность интенсивности в спектрах ФЛ исчезала. Из всего вышесказанного можно сделать вывод о том, что в структуре 3 с компенсирующими барьерами $\text{GaAs}_y\text{P}_{1-y}$ $y = 0.85$ не произошла релаксация упругих напряжений, что совпадает с теоретическими расчетами критической толщины.

Также результаты фотолюминесцентных исследований были подтверждены данными просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ). На рис. 3 приведены ПЭМ-изображения поперечного сечения активной области для структур с компенсирующими барьерами

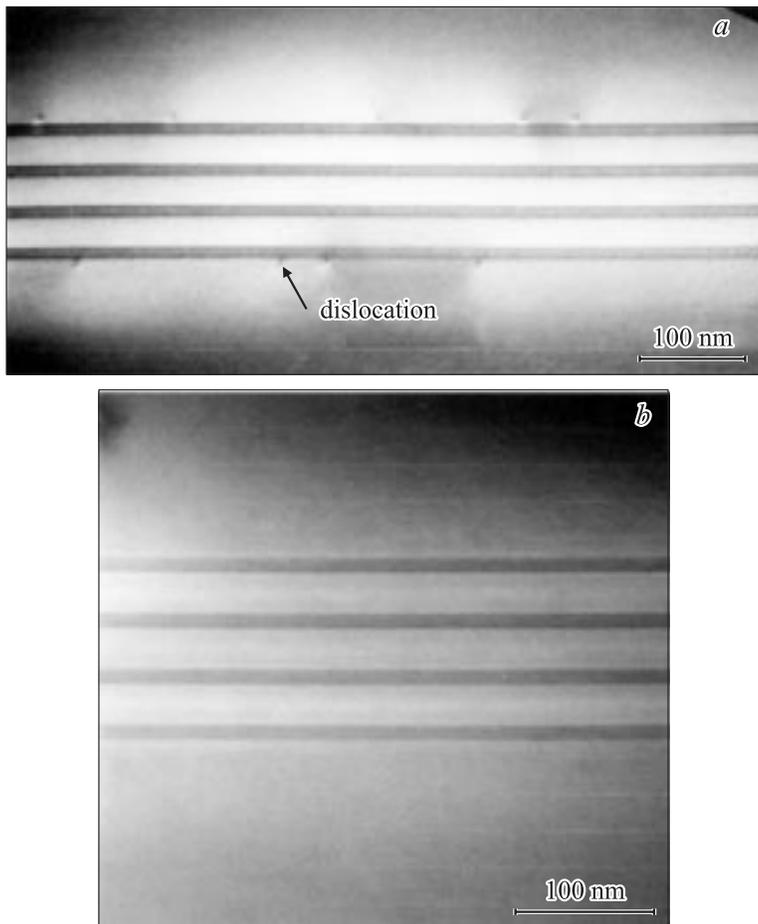


Рис. 3. ПЭМ-изображения поперечного сечения активной области для структур с компенсирующими барьерами GaAs (*a*) и GaAs_{0.85}P_{0.15} (*b*).

GaAs (*a*) и GaAs_{0.85}P_{0.15} (*b*). Из этих данных видно, что в структуре с барьером GaAs (рис. 3, *a*) в районе активной области наблюдаются дислокации (темные пятна), в то время как в структуре с барьером GaAs_{0.85}P_{0.15} (рис. 3, *b*) их нет.

На основании полученных данных были выращены лазерные гетероструктуры, из которых были изготовлены лазерные диоды. На лазерных диодах с длиной резонатора $100\ \mu\text{m}$ была получена в непрерывном режиме генерации мощность $100\ \text{mW}$.

Таким образом, на основании фотолюминесцентных исследований и данных просвечивающей электронной микроскопии для структур с набором сильно напряженных квантовых ям $\text{Ga}_{0.76}\text{In}_{0.24}\text{As}$ подобран состав компенсирующего барьера $\text{GaAs}_y\text{P}_{1-y}$ $y = 0.85$, при котором в структуре не происходит релаксации упругих напряжений. Данные результаты хорошо согласуются с теоретическими расчетами, проведенными на основании модели Matthews с использованием параметра эквивалентного несоответствия решеток (f_{eq}) для многослойной активной области. Выбранная структура позволяет создавать лазерные диоды с малой длиной резонатора, излучающие на длине волны $1060\ \text{nm}$ с высокими выходными оптическими характеристиками.

Авторы выражают благодарность М.А. Яговкиной на проведение рентгеноструктурных исследований и Ю.Г. Мусихину за ПЭМ-измерения.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 04-02-17641, гранта С.-Петербурга в сфере научной и научно-технической деятельности и научной программой СПб НТЦ РАН.

Список литературы

- [1] Ziari M., Verdiell J.-M., Archambault J.-L. et al. // Proc. Conf. Lasers Electro-Opt. (CLEO-97), Baltimore, MD, 1997, CMG1.
- [2] Coldren L.A., Corzine S.W. Diode Lasers and photonic integrated circuits. N. Y.: Wiley, 1995.
- [3] Matthews J.W., Mader S., Light T.B. // J. Appl. Phys. 1970. V. 41. P. 3800.
- [4] Matthews J.W. // J. Vac. Sci. and Technol. 1975. V. 12. P. 126.