

07

Релаксация напряжений в InGaAsP/InP-гетероструктурах для преобразователей лазерного излучения с длиной волны 1064 nm

© А.Е. Маричев, Р.В. Левин, А.Б. Гордеева, Г.С. Гагис,
В.И. Кучинский, Б.В. Пушный, Н.Д. Прасолов, Н.М. Шмидт[¶]

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
[¶] E-mail: Natalia.Shmidt@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 18 августа 2016 г.

Исследованы особенности релаксации механических напряжений в InGaAsP/InP-гетероструктурах, являющихся основой для преобразователей лазерного излучения с длиной волны 1064 nm. Показано, что релаксация механических напряжений путем образования упорядоченного рельефа на поверхности слоев твердого раствора InGaAsP/InP-гетероструктур с составом твердого раствора по индию до 80% позволяет уменьшить вероятность спинодального распада твердого раствора, повысить на порядок интенсивность фотолюминесценции твердого раствора и увеличить эффективность преобразования лазерного излучения.

DOI: 10.21883/PJTF.2017.02.44180.16463

Полупроводниковые InGaAsP/InP-гетероструктуры с твердым раствором InGaAsP, изопериодным с InP и шириной запрещенной зоны 1.0–1.2 eV (300 K), с содержанием индия до 80%, являются хорошим кандидатом для создания преобразователей лазерного излучения с длиной волны 1064 nm, обеспечивающей минимальные потери при

прохождении излучения в земной атмосфере. Одно из применений таких преобразователей лазерного излучения — передача электрической энергии на расстояние. Концепция передачи электрической энергии на расстояние без проводов была предложена более 100 лет назад Николя Тесла. Однако только в XXI веке, благодаря созданию мощных лазеров, она приобрела практическое значение и началось создание систем передачи энергии, в том числе в земной атмосфере и в космическом пространстве [1–3]. Одно из основных требований к преобразователям в системах передачи энергии — максимальная эффективность преобразования излучения. При разработке технологии получения твердых растворов с содержанием индия до 80%, на длину волны 1064 nm выяснилось, что такие составы попадают в область спинодального распада твердого раствора [4]. В этом случае возрастает вероятность образования в активной области фаз с непрерывно меняющимся составом, что неизбежно приводит к снижению эффективности преобразования излучения в электрическую энергию. Известно, что управление степенью рассогласования параметров решетки твердого раствора активной области и характером релаксации механических напряжений в гетероструктуре [4–6] позволяет избежать спинодального распада твердого раствора. Исходя из этого, в работе изучалось влияние толщины слоя InGaAsP твердого раствора, степени рассогласования его параметров решетки относительно InP на характер релаксации механических напряжений в слоях твердого раствора InGaAsP/InP-гетероструктур, а также интенсивность фотолюминесценции на длине волны 1064 nm.

На основе ранее проведенного расчета в рамках модели квазирегулярных растворов [6,7] и моделей, учитывающих дельта-параметры, были определены границы области спинодального распада твердых растворов InGaAsP, изопериодные с InP при температурах роста 600°C [8,9]. При этой температуре были выращены InGaAsP-слои с шириной запрещенной зоны 1.0–1.2 eV и InGaAsP/InP-гетероструктуры методом эпитаксии из металлоорганических соединений на подложках InP *n*-типа проводимости, легированных теллуrom с концентрацией носителей $(1–5) \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ и разоориентированных на 4° относительно плоскости (100). Рост слоев твердого раствора проводился на буферных слоях InP толщиной 1 μm на установке AIXTRON AIX-200, при давлении 100 mbar, в потоке очищенного водорода, с точкой росы не хуже –100°C и при скорости подачи водорода в реактор 5 l/min.

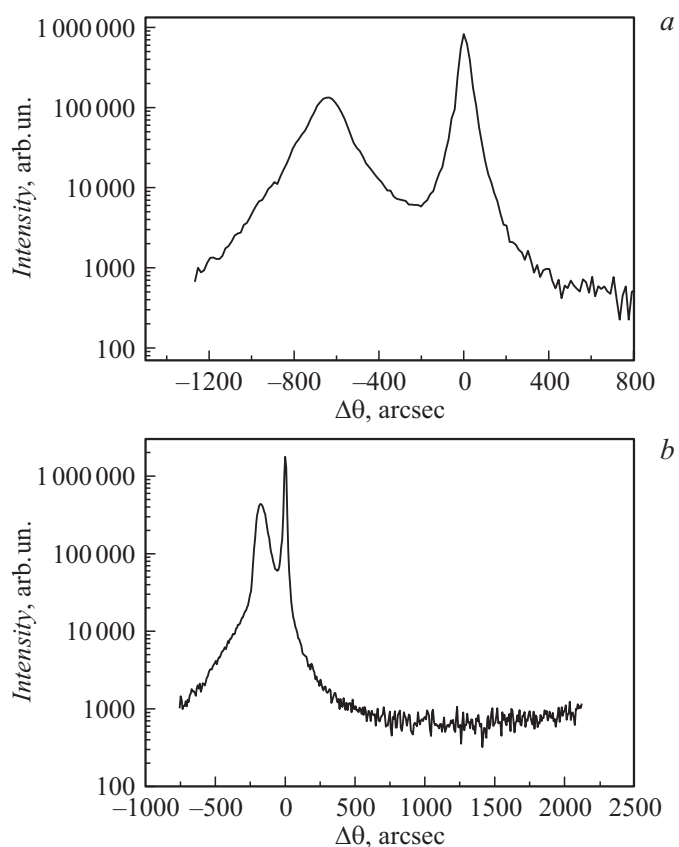


Рис. 1. Кривые качания твердых растворов InGaAsP с разным рассогласованием параметров решетки: a — $1.5 \cdot 10^{-2}$, b — $3.88 \cdot 10^{-3}$.

В качестве источников Ga и In применялись металлоорганические соединения, соответственно TEGa-триэтилгаллий и TMIn-триметилиндий, а в качестве источников AsH₃ и PH₃ использовались гидриды AsH₃-арсин и PH₃-фосфин. Толщина слоев твердого раствора в гетероструктурах варьировалась от 50 до 1000 nm. Кроме того, в небольших пределах в слоях толщиной 1000 nm варьировался состав твердого

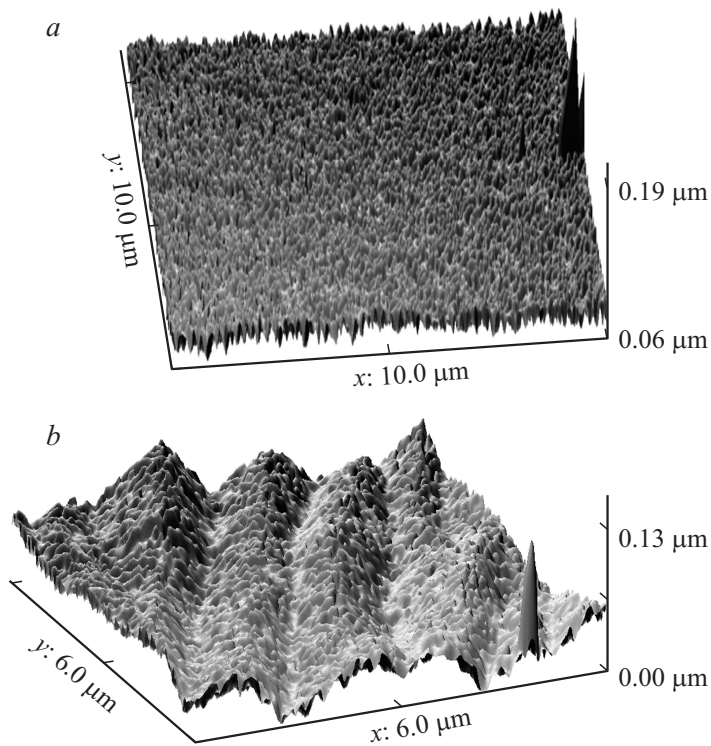


Рис. 2. Изображение в атомно-силовом микроскопе морфологии поверхностей твердого раствора $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}_{0.46}\text{P}_{0.54}$ /InP-гетероструктур с разной толщиной слоя и рельефом: *a* — 50 nm, без крупного упорядоченного рельефа; *b* — 1000 nm, упорядоченный рельеф; *c* — профиль рельефа с участками нарушения упорядоченности.

раствора от $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}_{0.46}\text{P}_{0.54}$ до $\text{In}_{0.879}\text{Ga}_{0.121}\text{As}_{0.28}\text{P}_{0.72}$. При этом контролировалось рассогласование параметров кристаллической решетки методами рентгеновской дифрактометрии. Контроль морфологии поверхности гетероструктур осуществлялся методами атомно-силовой микроскопии. Оптические свойства выращенных слоев твердого раствора InGaAsP/InP-гетероструктур исследовались методами фотолюминесценции и спектроскопии анизотропного отражения.

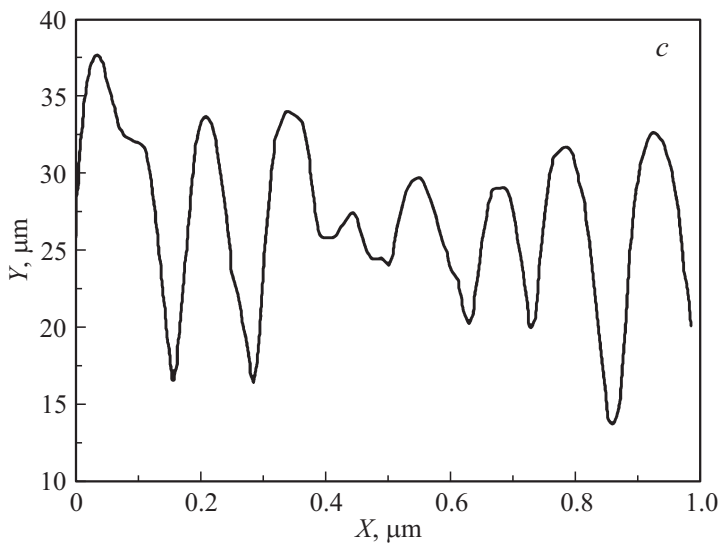


Рис. 2 (продолжение).

Выяснено, что в слоях твердого раствора толщиной 1000 nm с содержанием индия до 83 и 88% наблюдается рассогласование параметров кристаллической решетки слоев InGaAsP относительно подложки InP (отношение $\Delta a/a$, где a — постоянная кристаллической решетки) от $2 \cdot 10^{-3}$ до $1.5 \cdot 10^{-2}$. При этом наблюдается фазовый распад твердого раствора, что хорошо видно на представленных на рис. 1 кривых качания этих твердых растворов. По данным спектроскопии анизотропного отражения в этих слоях присутствуют области, обогащенные GaAs и InAs. Присутствие таких областей и фазовый распад не наблюдаются в слоях $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}_{0.46}\text{P}_{0.54}$ с рассогласованием параметра решетки относительно InP меньше $2 \cdot 10^{-3}$. Влияние толщины твердого раствора с таким составом и рассогласованием на характер релаксации механических напряжений исследовалось в диапазоне толщин 50–1000 nm. Исходя из того, что в тонких слоях напряжения могут частично релаксировать путем образования рельефа на поверхности [10], проводился контроль морфологии поверхности слоев в атомно-силовом микроскопе. При толщине 50 nm упорядочен-

Толщина, nm	h , nm	L_0 , μm	L_d , μm	σ , $\text{dyn} \cdot \text{cm}^{-2}$	ФЛ, р. у.
1000	63	1.3	1.3	$1.4 \cdot 10^9$	$1.2 \cdot 10^5$
500	31	1.2	1.3	$3.4 \cdot 10^8$	$1.589 \cdot 10^4$
200	Неупорядоченная			меньше 10^8	2722
50	То же				601.9
1000	"				694.3
1000	"				1875

ного рельефа поверхности не наблюдается (рис. 2, *a*). Выяснено, что начиная с толщины 200 nm происходит эволюция рельефа от слабо упорядоченного к ярко выраженному упорядоченному рельефу при толщине твердого раствора 1000 nm (рис. 2, *b*). Профиль рельефа слоя, содержащего области с нарушенной упорядоченностью, полученный атомно-силовой микроскопией, представлен на рис. 2, *c*. Известное соотношение [11] позволяет определить величину механических напряжений, сброшенных путем образования рельефа:

$$\sigma = 2Gh^2/L_dL_0,$$

где σ — напряжения, G — модуль сдвига, h — высота гребня, L_d — расстояние между гребнями, L_0 — ширина у основания гребня. Значения h , L_d и L_0 определены из профиля рельефа и приведены в таблице.

Среднее значение модуля сдвига определялось из справочных данных сайта ФТИ, $G_{mean} \sim 2.8 \cdot 10^{11} \text{ dyn} \cdot \text{cm}^{-2}$ из следующих значений модулей сдвига: $G_{\text{GaAs}} = 3.28 \cdot 10^{11} \text{ dyn} \cdot \text{cm}^{-2}$, $G_{\text{GaP}} = 3.92 \cdot 10^{11} \text{ dyn} \cdot \text{cm}^{-2}$, $G_{\text{InP}} = 2.25 \cdot 10^{11} \text{ dyn} \cdot \text{cm}^{-2}$, $G_{\text{InAs}} = 1.9 \cdot 10^{11} \text{ dyn} \cdot \text{cm}^{-2}$. Оценки напряжений, сброшенных за счет образования рельефа, приведены в таблице. Максимальные напряжения $1.4 \cdot 10^9 \text{ dyn} \cdot \text{cm}^{-2}$ сброшены в слоях толщиной 1000 nm за счет образования хорошо развитого упорядоченного рельефа рис. 2, *b*. Этот результат подтверждается также данными спектроскопии анизотропного отражения. Значения напряжений, сброшенных за счет образования рельефа, уменьшаются по мере выполаживания гребней рельефа и нарушения его упорядоченности. При толщине 200 nm из-за неупорядоченного рельефа очень приближенные оценки дают величину напряжений меньше $10^8 \text{ dyn} \cdot \text{cm}^{-2}$. Фотолюминесценция (ФЛ) наблюдалась на всех исследованных слоях твердых растворов с максимумом на длине волны 1000 nm. Минимальные значения

интенсивности ФЛ на этой длине волны — 600–700 в относительных единицах наблюдались на твердых растворах толщиной 50 и 1000 nm с максимальным рассогласованием параметра решетки относительно InP — $1.5 \cdot 10^{-2}$. Из данных таблицы видно, что для слоев с рассогласованием параметра решетки относительно InP меньше $2 \cdot 10^{-3}$, по мере увеличения значений напряжений, сброшенных за счет формирования поверхностного рельефа, существенно, на порядки растёт интенсивность ФЛ. Таким образом, хорошее согласование постоянных решетки твердого раствора и подложки в сочетании с дополнительной релаксацией напряжений путем образования поверхностного рельефа позволяют избежать спинодального распада твердого раствора заданного состава и значительно, на порядки, увеличить интенсивность фотолюминесценции твердых растворов. Разработанная технология была использована при получении лабораторных образцов преобразователей лазерного излучения на основе $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}_{0.46}\text{P}_{0.54}/\text{InP}$ -гетероструктур.

Список литературы

- [1] Крохин О.Н. // УФН. 2006. Т. 176. № 4. С. 441–444.
- [2] Hecht J. // New Scientist. 2010. V. 207. P. 25.
- [3] [3.http://www.lasermotive.com](http://www.lasermotive.com)
- [4] Вавилова Л.С., Капитонов В.А., Мурашова А.В., Тарасов И.С. // ФТП. 2000. Т. 34. С. 1307.
- [5] Asomoza R., Elyukhin V.A. // J. Cryst. Growth. 2001. V. 222. P. 58–63.
- [6] Schlenker D., Miyamoto T. // Jpn. J. Appl. Phys. 2000. V. 39. P. 5751–5757.
- [7] Onabe K. // Jpn. J. Appl. Phys. 1982. V. 21. N 5. P. 797–798.
- [8] Marichev A.E., Pushnyi B.V., Levin R.V. // J. Phys.: Conf. Ser. 2016. V. 690. P. 012 010.
- [9] Левин Р.В., Маричев А.Е., Шварц М.З. и др. // ФТП. 2015. Т. 49. В. 5. С. 715–719.
- [10] Hull R., Gray J., Wu C.C. et al. // J. Phys.: Cond. Matter. 2002. V. 14. P. 12 829–12 841.
- [11] Гегузин Я.Е. Диффузионная зона. М.: Наука, 1979. 343 с.