

Эпитаксиальные гетероструктуры активной области светодиодов ближнего инфракрасного диапазона

© Р.А. Салий, С.А. Минтаиров, А.М. Надточий, Н.А. Калюжный

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

E-mail: r.saliy@mail.ioffe.ru

Поступила в Редакцию 17 мая 2023 г.

В окончательной редакции 3 июля 2023 г.

Принята к публикации 30 октября 2023 г.

Исследовано влияние компенсирующих слоев AlGaAsP, GaAsP и AlGaAs/GaAsP на оптическое качество активной области на основе InGaAs/GaAs-квантовых ям для светодиодов, излучающих на длине волны 940 нм. Методом металлоорганической газофазной эпитаксии выращены гетероструктуры с множественными квантовыми ямами с применением различных подходов к компенсации структурных напряжений. Продемонстрировано увеличение интенсивности фотолюминесценции более чем на 32% при использовании AlGaAs/GaAsP-компенсирующих слоев.

Ключевые слова: квантовые ямы, светодиоды, InGaAs, эпитаксия, гетероструктуры.

DOI: 10.61011/FTP.2023.07.56785.5169C

Светоизлучающие диоды (СИД), работающие в ближнем инфракрасном диапазоне (700–2500 нм), играют важную роль для ряда применений. Среди них: оптическая диагностика, биомедицинская визуализация, оптическая связь, системы ночного видения, охранные системы и хранение данных [1]. Недавно их применение было распространено на оптические датчики в беспроводных устройствах, датчики времени полета и воздушные дроны [2]. Использование множественных квантовых ям (МКЯ) в качестве активной области СИД дает ряд преимуществ относительно и двойных гетероструктур (ГС), в частности улучшает их внутреннюю квантовую эффективность [3]. Однако слои МКЯ, в частности $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, в активной области СИД имеют рассогласование по параметру кристаллической решетки с GaAs-подложкой, что ведет к ограничениям по улучшению выходной мощности ИК-светодиода [4]. В ряде работ было продемонстрировано, что использование в активной области МКЯ слоев, компенсирующих напряжения, вызванные рассогласованием, позволяет значительно улучшить характеристики приборов [5–7].

В данной работе проведено сравнительное исследование влияния компенсирующих слоев (КС) различного типа, в частности AlGaAsP, GaAsP и комбинации AlGaAs/GaAsP, на фотолюминесцентные свойства $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ МКЯ, излучающих на длине волны 940 нм.

Исследованные ГС были выращены методом металлоорганической газофазной эпитаксии (МОГФЭ). В качестве реперных образцов созданы две ГС на основе МКЯ без КС, излучающие на длинах волн 850 и 940 нм. Обе структуры включали в себя широкозонные барьеры AlGaAs толщиной 200 и 50 нм, между которыми находилась активная область из нескольких КЯ. В случае ГС на 850 нм, она состояла из шести $\text{In}_{0.11}\text{Ga}_{0.89}\text{As}/\text{Al}_{0.20}\text{Ga}_{0.80}\text{As}$ КЯ (образец А). В случае

МКЯ на 940 нм — из $\text{In}_{0.14}\text{Ga}_{0.86}\text{As}/\text{GaAs}$ КЯ (образец В). Толщины КЯ составляли 3 и 7 нм для образцов А и В соответственно. Толщина AlGaAs-промежуточных слоев варьировалась от 15 до 30 нм. Полученные ГС исследовались путем анализа спектров фотолюминесценции (ФЛ), которые записывались при двух плотностях оптического возбуждения Nd:YAG-лазером с длиной волны излучения 532 нм.

Значение максимальной интенсивности ФЛ (IPL) для СИД, излучающего на 840 нм, почти в 3 раза превышает результат от образца В (см. рис. 1). Если провести оценку величины суммарного напряжения в обеих ГС путем произведения величины рассогласования параметра решетки (da/a) и значения толщины (h) слоев активной области (КЯ и промежуточных слоев), то для образца В это значение будет в 2 раза больше: +135000 ppm·нм против +63000 ppm·нм для образца А, соответственно. Существенно увеличившаяся напряженность ГС может объяснять низкий максимум IPL образца В.

Для повышения интенсивности ФЛ от МКЯ на 940 нм и улучшения структурного качества ГС необходимо минимизировать суммарное напряжение. Одним из путей является уменьшение концентрации In в КЯ. Однако, согласно расчетам на основе твердотельной модели КЯ [8], в этом случае для сохранения целевой длины волны 940 нм потребуется увеличение толщины КЯ до 10 нм и более. Это значение уже близко к значениям критической толщины псевдоморфного слоя InGaAs [9], при которой напряженный слой будет релаксировать с образованием дислокаций несоответствия на границе слоев. Это приведет к ухудшению электрофизических свойств материала и появлению прорастающих дислокаций в ГС, что скажется на параметрах прибора, как это показано, например, в работе [10]. Таким образом, наиболее перспективным подходом, как обсуждалось

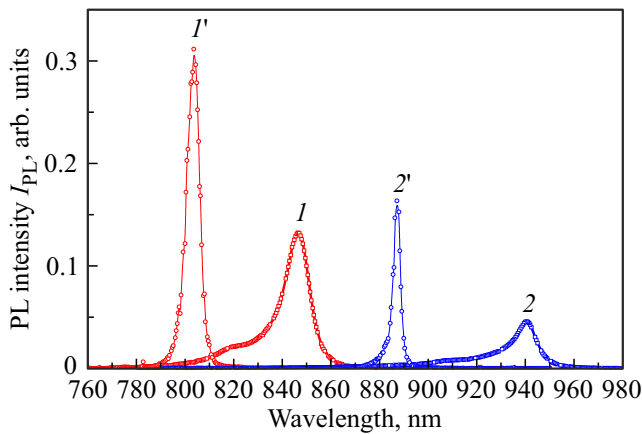


Рис. 1. Спектры ФЛ для образцов А и В при комнатной температуре (1, 2) и при температуре жидкого азота (1', 2').

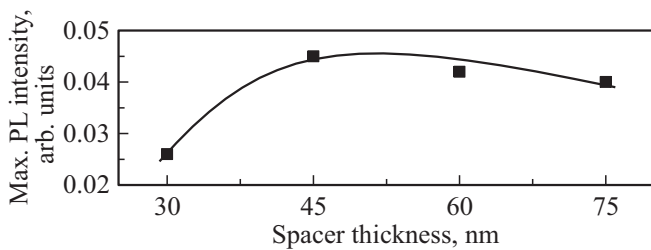


Рис. 2. Зависимость максимума IPL от толщины КС в серии образцов $In_{0.17}Ga_{0.83}As/Al_{0.25}Ga_{0.75}As_{0.96}P_{0.04}$ МКЯ (серия образцов С).

ранее, является использование слоев, компенсирующих напряжения. Достаточно толстые компенсирующие слои будут также выполнять роль промежуточных слоев (спейсеров), разделяющих КЯ в массиве.

Для компенсации напряжения сжатия в КЯ $InGaAs$ выбраны $Al_{0.25}Ga_{0.75}As_{0.96}P_{0.04}$ и $GaAs_{0.94}P_{0.06}$, слои, заменившие $AlGaAs$ -промежуточные слои в ГС и привносящие компенсирующую деформацию растяжения.

Расогласование параметра решетки (da/a) между $Al_{0.25}Ga_{0.75}As_{0.96}P_{0.04}$ и $GaAs$ подложкой составляет приблизительно -2000 ppm. Для использования такого слоя в качестве компенсирующего (с заменой $AlGaAs$ -промежуточного слоя), при сохранении длины волны излучения в 940 нм, согласно расчету по твердотельной модели [8], требуется увеличение концентрации In в КЯ $InGaAs$ до 17% . Расчетная толщина КЯ при этом составила 4.6 нм. Для более точного расчета оптимальной толщины КС использовано следующее выражение из теории упругости сплошных сред [11,12]:

$$t_b = t_{sl} \left[\frac{A_{sl} a_b^2 (a_0 - a_{sl})}{A_b a_{sl}^2 (a_b - a_0)} \right], \quad (1)$$

где t_b и t_{sl} — толщины КС и напряженного слоя КЯ, a_b и a_{sl} — их постоянные решеток, a_0 — постоянная решетки подложки, A_b и A_{sl} — константы жесткости,

зависящие от коэффициентов жесткости C_{11} и C_{12} по формуле:

$$A_i = C_{11,i} + C_{12,i} - \frac{2C_{12,i}^2}{C_{11,i}}. \quad (2)$$

Следуя данному расчету, оптимальная толщина КС $Al_{0.25}Ga_{0.75}As_{0.96}P_{0.04}$ должна составлять 48 нм. Был выращен ряд ГС с МКЯ $In_{0.17}Ga_{0.83}As/Al_{0.25}Ga_{0.75}As_{0.96}P_{0.04}$, в которых толщина КС варьировалась от 30 до 75 нм (серия образцов С), и измерена их ФЛ. Из зависимости, представленной на рис. 2, видно, что диапазон оптимальных толщин $Al_{0.25}Ga_{0.75}As_{0.96}P_{0.04}$ КС составляет $45-50$ нм, что полностью согласуется с результатами, полученными с применением теории упругости сплошных сред.

Описанный выше подход использования КС $Al_{0.25}Ga_{0.75}As_{0.96}P_{0.04}$ имеет следующий недостаток. Во-первых, толщина промежуточного слоя ($45-50$ нм) достаточно большая для создания эффективной активной области СИД (уменьшается электронно-дырочное перекрытие и скорость излучательной рекомбинации). Во-вторых, большая концентрация In (17%) в КЯ ведет к условиям, близким к критической толщине, что также может отрицательно повлиять на оптическое качество ГС.

Однако при использовании $GaAs_{0.94}P_{0.06}$ расогласование da/a между КС и $GaAs$ -подложкой меньше, и составляет приблизительно -4000 ppm, что и позволяет существенно уменьшить толщину КС по сравнению с ГС $In_{0.17}Ga_{0.83}As/Al_{0.25}Ga_{0.75}As_{0.96}P_{0.04}$, описанной выше. Согласно расчету по твердотельной модели, при замене $AlGaAs$ -промежуточных слоев $GaAs_{0.94}P_{0.06}$ КС толщина КЯ составит 7 нм при концентрации $In \sim 14\%$. Расчет по формуле (1) предсказывает толщину КС $GaAs_{0.94}P_{0.06}$ в 14 нм.

Основываясь на этих расчетах, была выращена ГС на основе МКЯ $In_{0.14}Ga_{0.86}As/GaAs_{0.94}P_{0.06}$ (образец D). Кроме того, учтен подход, предложенный в работе [13], где в качестве КС был предложен комбинированный барьер, состоящий из слоев $AlGaAs/GaAs_{0.94}P_{0.06}$. Авторы работы [13] отмечают, что тонкий слой $AlGaAs$ можно использовать, чтобы уменьшить резкую несбалансированность деформации от двух смежных слоев $InGaAs$ и $GaAsP$. Используя подобный подход, нами были выращены ГС с МКЯ $In_{0.17}Ga_{0.83}As/Al_{0.20}Ga_{0.80}As/GaAs_{0.94}P_{0.06}$ (образцы серии E). На рис. 3 представлены спектры ФЛ от ГС, излучающих на 940 нм, параметры сведены в таблицу.

Наблюдается рост максимума I_{PL} от образцов с компенсирующими слоями E1 и E2 по сравнению с образцом В (рис. 3, кривые 4, 5 и 1 соответственно). Образец E2 с КС $GaAs_{0.94}P_{0.06}$ толщиной 18 нм, продемонстрировал прирост максимума IPL на 32% . Оценка величины суммарного напряжения (как произведения da/a на толщины слоев активной области) образца E2 практически совпадает с аналогичным оценочным значением da/a для образца А ($+64000$ ppm). Зависимость

Ростовые и оптические параметры экспериментальных гетероструктур

ГС	КЯ	t_{QW} , нм	КС	t_{QS} , нм	$da/a \cdot h$, ppm · нм	max I_{PL} , arb.units
A	In _{0.10} GaAs	3	Al _{0.2} GaAs	30	+63000	0.132
B	In _{0.14} GaAs	7	GaAs	14	+135000	0.045
C	In _{0.17} GaAs	4.6	Al _{0.25} GaAsP _{0.04}	45	+17500	0.048
D	In _{0.14} GaAs	7	GaAsP _{0.06}	14	+78000	0.064
E1	In _{0.14} GaAs	7	Al _{0.2} GaAs/GaAsP _{0.06}	4/10	+96500	0.056
E2	In _{0.14} GaAs	7	Al _{0.2} GaAs/GaAsP _{0.06}	4/18	+64000	0.066

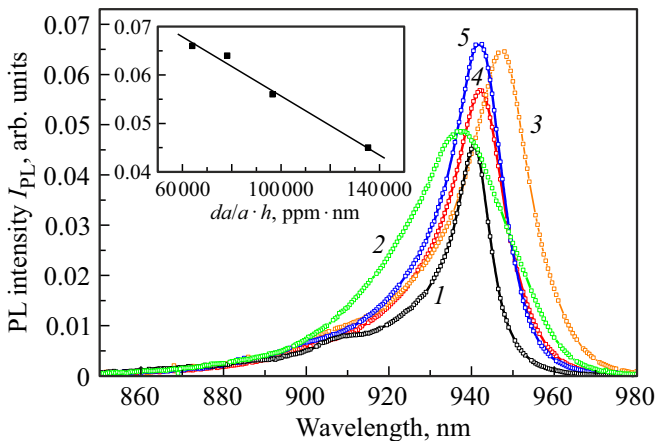


Рис. 3. Спектры ФЛ при комнатной температуре для образцов 1 — В, 2 — С, 3 — D, 4 — E1 и 5 — E2; на вставке — зависимость максимума I_{PL} при комнатной температуре от произведения da/a на толщину слоев. (Цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи).

I_{PL} от приведенной оценочной величины ($da/a \cdot h$) для всех исследованных ГС явным образом демонстрирует влияние напряжений в ГС на ее оптическое качество (см. вставку на рис. 3). Однако нужно отметить, что несмотря на относительно низкое значение данной величины для лучшего образца серии С, его I_{PL} лишь немногим превышает уровень реперного образца В. Таким образом, толщина ямы, близкая к критической (при высокой концентрации индия в InGaAs твердом растворе), сказывается на оптическом качестве ГС даже в большей степени, чем фактор механического напряжения.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] M. Vasilopoulou, A. Fakharuddin, F. Pelayo García de Arquer, D.G. Georgiadou, H. Kim, A.R. M. Yusoff, F. Gao, M.K. Nazeruddin, H.J. Bolink, E.H. Sargent. *Nature Photonics*, **15**, 656 (2021). DOI: 10.1038/s41566-021-00855-2
- [2] H.-J. Lee, G.-H. Park, J.-S. So, C.-H. Lee, J.-H. Kim, L.-K. Kwac. *Infr. Phys. Technol.*, **118**, (2021). DOI: 10.1016/j.infrared.2021.103879
- [3] А.В. Малевская, Н.А. Калужный, Д.А. Малевский, С.А. Минтаиров, А.М. Надточий, М.В. Нахимович, Ф.Ю. Солдатенков, М.З. Шварц, В.М. Андреев. *ФТП*, **55** (8), 686 (2021). [A.V. Malevskaya, N.A. Kalyuzhnyy, D.A. Malevskii, S.A. Mintairov, A.M. Nadtochiy, M.V. Nakhimovich, F.Y. Soldatenkov, M.Z. Shvarts, V.M. Andreev, *Semiconductors*, **55** (8), 686 (2021)]. DOI: 10.61011/FTP.2023.07.56785.5169C
- [4] S.-D. Kim, H. Lee, J.S. Harris. *J. Electrochem. Soc.*, **142** (5), 1667 (1995). DOI: 10.1149/1.2048636
- [5] Y. Yu, X. Qin, B. Huang, J. Weia, H. Zhou, J. Pan, W. Chen, Yun Qi, X. Zhang, *Z. Ren. Vacuum*, **69**, 489 (2003). DOI: 10.1016/S0042-207X(02)00560-2
- [6] D.-K. Kim, H.-J. Lee. *J. Nanosci. Nanotechnol.*, **18** (3), 2014 (2018). DOI: 10.1166/jnn.2018.14952
- [7] D.P. Xu, M. D'Souza, J.C. Shin, L.J. Mawst, D. Botez. *J. Cryst. Growth*, **310**, 2370 (2008). DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2007.11.218
- [8] C.G. Van de Walle. *Phys. Rev.*, **39** (3), 1871 (1989). DOI: 10.1103/PhysRevB.39.1871
- [9] M.E. Rudinsky, S.Yu. Karpov, H. Lipsanen, A.E. Romanov. *Mat. Phys. & Mechanics*, **24** (3), 278 (2015). DOI: 10.1134/S1063782613090054
- [10] L. Redaelli, A. Mukhtarova, S. Valdueza-Felip, A. Ajay, C. Bongerol, C. Himwas, J. Faure-Vincent, C. Durand, J. Eymery, E. Monroy. *Appl. Phys. Lett.*, **105** (13), 131105 (2014). DOI: 10.1063/1.4896679
- [11] N.J. Ekins-Daukes, K. Kawaguchi, J. Zhang. *Cryst. Growth Des.*, **2** (4), 287 (2002). DOI: 10.1021/cg025502y
- [12] C.G. Bailey, S.M. Hubbard, D.V. Forbes, R.P. Raffaele. *Appl. Phys. Lett.*, **95** (20), 203110 (2009). DOI: 10.1063/1.3264967
- [13] W.-C. An, H.-G. Kim, L.-K. Kwac, J.-S. So, H.-J. Lee. *J. Nanosci. Nanotechnol.*, **19**, 2224 (2019). DOI: 10.1166/jnn.2019.15974

Редактор А.Н. Смирнов

Epitaxial heterostructures of the active region for near-infrared LEDs

*R.A. Sali, S.A. Mintairov, A.M. Nadtochiy,
N.A. Kalyuzhnyy*

Ioffe Institute,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract The influence of AlGaAsP, GaAsP and AlGaAs/GaAsP compensating layers on the optical quality of the active region based on InGaAs/GaAs quantum wells for LEDs emitting at a wavelength of 940 nm has been studied. Heterostructures with multiple quantum wells have been grown by the method of organometallic gas-phase epitaxy MOVPE technique using various approaches to compensating structural stresses. An increase in photoluminescence intensity by more than 32% was demonstrated when using AlGaAs/GaAsP compensating layers.