

Влияние параметров $\text{AlGaAs}-(\text{AlGa})_x\text{O}_y$ пьедестала на характеристики микродискового лазера с активной областью на основе $\text{InAs}/\text{InGaAs}$ -квантовых точек

© Н.В. Крыжановская^{*,†,¶}, С.А. Блохин^{*,†}, М.В. Максимов^{*,†}, А.М. Надточий^{*,†}, А.Е. Жуков^{*,†}, К.В. Федорова^{*}, Н.Н. Леденцов^{+,•}, В.М. Устинов⁺, Н.Д. Ильинская⁺, Д. Бимберг[•]

^{*} Санкт-Петербургский академический университет — научно-образовательный центр нанотехнологий Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

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

[•] Institut für Festkörperphysik, Technische Universität,
D-10623, Berlin, Germany

(Получена 22 декабря 2010 г. Принята к печати 28 декабря 2010 г.)

Исследовано влияние параметров слоя $\text{AlGaAs}-(\text{AlGa})_x\text{O}_y$, образующего пьедестал микродискового лазера с активной областью на основе $\text{InAs}/\text{InGaAs}$ квантовых точек, на особенности спектра излучения при температуре 15 К и оптической накачке. Уменьшение глубины окисления слоя $\text{Al}_{0.97}\text{Ga}_{0.03}\text{As}$ приводит к падению интенсивности линий мод „шепчущей галереи“, увеличению порога лазерной генерации и уменьшению добротности вследствие увеличения утечек в область подложки.

1. Введение

Значительный интерес к исследованию полупроводниковых микродисковых резонаторов обусловлен возможностью создания низкопороговых лазеров с высокой добротностью, излучающих в латеральном направлении. Моды излучения микродискового (МД) лазера принято называть модами „шепчущей галереи“ [1]. К настоящему времени получена лазерная генерация в МД-лазерах с активной областью на основе $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ квантовых точек при оптической [2,3] и при электрической [4] накачках. Недавно в работе [5] была показана возможность вывода света из МД-лазера в близко расположенный волновод с помощью затухающей электромагнитной волны, что открывает широкие перспективы использования МД-лазеров для создания квантовых фотонных логических устройств (photonic quantum information devices). Несмотря на успехи, достигнутые в области МД-лазеров с оптической накачкой, реализация инжекционных лазеров затруднена из-за необходимости обеспечения одновременно как эффективной инжекции носителей в активную область МД лазера, так и оптического ограничения. Кроме того, для достижения устойчивой работы МД-лазеров при комнатной температуре требуется обеспечить эффективный отвод тепла от микродиска. Как было показано нами ранее [6], перегрев активной области приводит к ухудшению лазерных характеристик МД, в том числе из-за спектрального рассогласования положения моды МД и спектра усиления активной области. Конструкция МД-резонатора с асимметричным оксидным волноводом (т.е. на $(\text{AlGa})_x\text{O}_y$ пьедестале) имеет преимущество по сравнению с традиционным МД-резонатором

с симметричным волноводом (т.е. на пьедестале существенно меньшего диаметра) благодаря улучшенной механической прочности и более высокому коэффициенту теплопроводности $(\text{AlGa})_x\text{O}_y$, чем у воздуха. Для формирования слоя $(\text{AlGa})_x\text{O}_y$ нами использован метод селективного окисления слоя $\text{Al}_{0.97}\text{Ga}_{0.03}\text{As}$. Для обеспечения токовой инжекции со стороны подложки в таких МД-лазерах требуется проведение неполного окисления слоя $\text{Al}_{0.97}\text{Ga}_{0.03}\text{As}$ с формированием проводящего канала. Кроме того, так как слой $\text{Al}_{0.97}\text{Ga}_{0.03}\text{As}$ обладает более высоким коэффициентом теплопроводности, чем оксид, неполное окисление слоя $\text{Al}_{0.97}\text{Ga}_{0.03}\text{As}$ должно привести к улучшению теплоотвода в МД-лазере. В данной работе мы провели серию экспериментов по исследованию влияния глубины окисления пьедестала микродиска с асимметричным волноводом на характер лазерной генерации при оптической накачке.

2. Эксперимент

Исследуемые образцы были выращены методом молекулярно-пучковой эпитаксии в установке Riber 32 с твердотельным источником As на полуизолирующих подложках GaAs(100). После осаждения буферного слоя GaAs выращивался слой $\text{Al}_{0.97}\text{Ga}_{0.03}\text{As}$ толщиной 500 нм, предназначенный для формирования основания диска. Активная область помещалась в волновод GaAs (180 нм) и представляла собой 5 слоев массивов самоорганизующихся $\text{InAs}/\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.95}\text{As}$ -квантовых точек, разделенных слоем GaAs толщиной 30 нм. Для предотвращения утечки неравновесных носителей при проведении оптических исследований в приповерхностную область и в область интерфейса $(\text{AlGa})_x\text{O}_y/\text{GaAs}$ волновод ограничивался с обеих сторон барьерами $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ (20 нм).

[¶] E-mail: kryj@mail.ioffe.ru

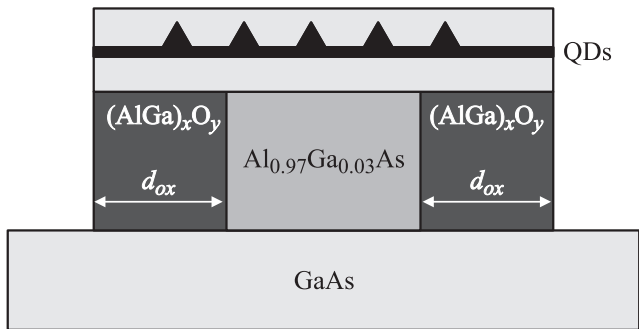


Рис. 1. Схематическое изображение микродиска.

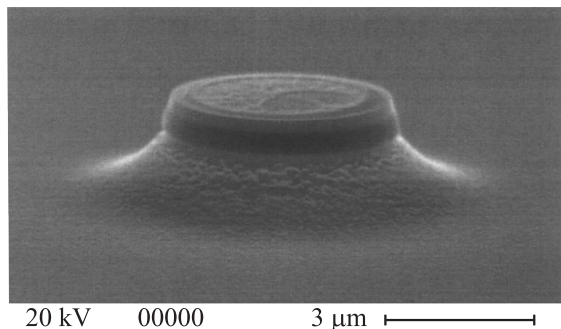


Рис. 2. Изображение одиночного микродиска диаметром 3 мкм, полученное с помощью СЭМ.

С помощью оптической литографии и сухого травления в пучке ионов Ag^+ были изготовлены микродиски диаметром 5 мкм с глубиной травления 0.7 мкм. Для преобразования слоя $\text{Al}_{0.97}\text{Ga}_{0.03}\text{As}$ в слой $(\text{AlGa})_x\text{O}_y$ был использован метод селективного окисления [7]. Схематическое изображение микродиска представлено на рис. 1. Глубина окисления слоя $\text{Al}_{0.97}\text{Ga}_{0.03}\text{As}$ определялась путем анализа контраста сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) скола тестовых структур после окисления. На рис. 2 представлено изображение одиночного МД-лазера, полученное методом СЭМ. Параметры исследованных структур приведены в таблице.

Глубина окисления структур	
Структура	d_{ox} , мкм
MD1	2.5
MD2	1.8
MD3	1.3
MD4	0.7

Оптическая накачка микродисков осуществлялась с помощью YAG:Nd-лазера, работающего на второй гармонике в непрерывном режиме ($\lambda = 532$ нм, $P = 3.3\text{--}470$ мВт). Лазерный луч фокусировался на одиночный микродиск с помощью объектива Olympus Plan View IR 100 с числовой апертурой 0.85. Этот

же объектив использовался и для сбора излучения от микродиска. Для исследований при температуре 15 К образцы помещались в гелиевый криостат проточного типа Oxford Microstat. Детектирование сигнала производилось с помощью охлаждаемого InGaAs-детектора Roper Scientific (1024 пикселей) со спектральным разрешением 0.03 нм.

На рис. 3 представлены спектры излучения структур MD1–MD4, полученные при температуре 15 К и плотности оптической накачки 2.2 кВт/см². На спектре структуры MD1 со сплошным окисленным слоем $(\text{AlGa})_x\text{O}_y$ наблюдаются узкие линии, соответствующие высокодобротным модам шепчущей галереи (МШГ). Уменьшение глубины окисления (структуры MD2–MD3) приводит к уширению узких линий МШГ и значительному уменьшению их интенсивности. На спектре структуры MD4 доминирующей становится полоса люминесценции массива $\text{InAs/In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ квантовых точек.

На рис. 4 представлены зависимости интегральной интенсивности линии МШГ от мощности оптической накачки структур MD1–MD4 при температуре 15 К. Ход

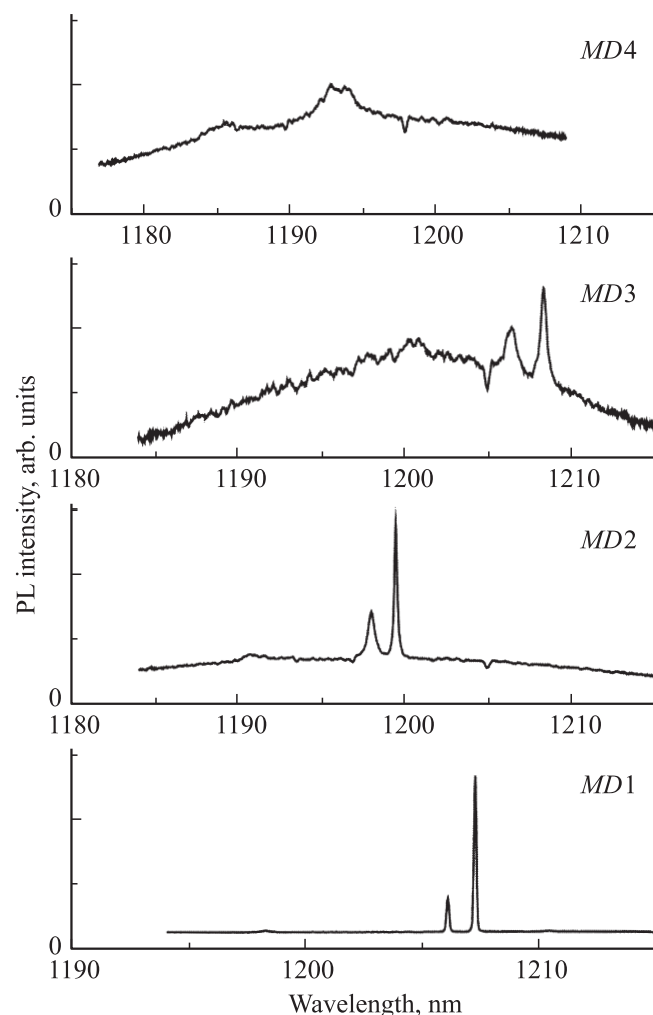


Рис. 3. Спектры излучения структур MD1–MD4, полученные при температуре 15 К.

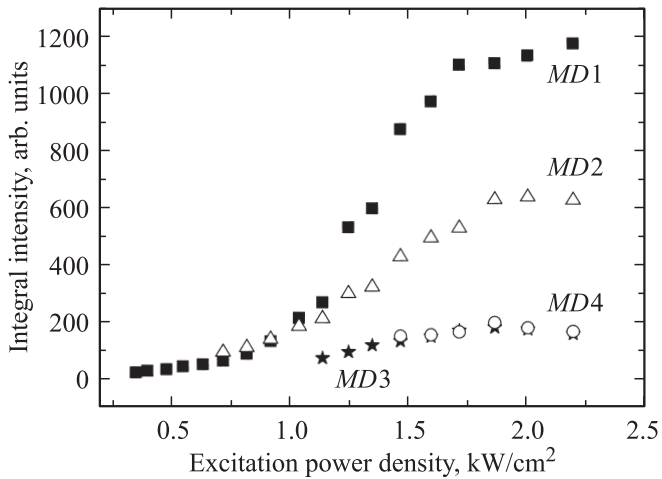


Рис. 4. Зависимости интегральной интенсивности линии МШГ от мощности оптической накачки структур MD1–MD4 при температуре 15 К.

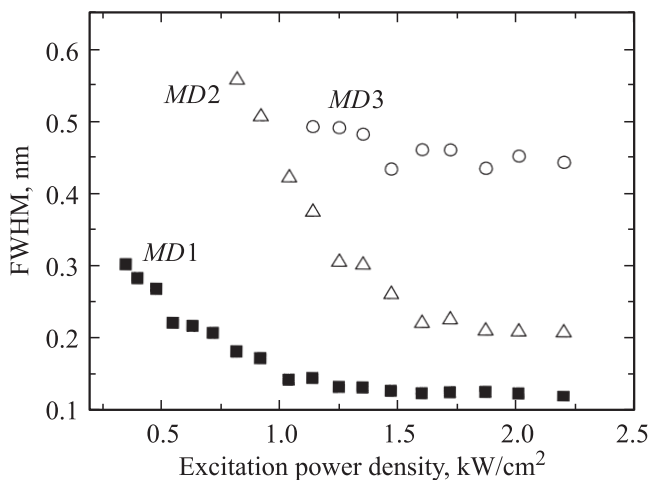


Рис. 5. Зависимость полуширины линии МШГ структур MD1–MD3 при температуре 15 К от мощности возбуждающего излучения.

зависимостей, полученных для структур MD3 и MD4, одинаков и обусловлен в большей степени зависимостью интенсивности спонтанного излучения массива квантовых точек от накачки, чем интенсивностью линии МШГ. Для структур MD1 и MD2 по мере увеличения мощности накачки наблюдается сначала скачкообразный рост интенсивности линии излучения, а затем ее насыщение. Участок насыщения может быть обусловлен несколькими факторами: перегревом активной области, насыщением основного состояния квантовых точек, поглощением на свободных носителях [6]. Участок сверхлинейного роста интенсивности линии МШГ мы связываем с появлением лазерной генерации. Величина пороговой мощности для структур MD1, MD2 составляет ~ 1 и ~ 1.2 кВт/см².

На рис. 5 представлена зависимость полуширины линии МШГ структур MD1–MD3 при температуре 15 К от мощности возбуждающего излучения. Для структур MD1, MD2 наблюдается уменьшение полуширины линии излучения МД-лазера по мере увеличения мощности накачки. В то же время для структуры MD3 значение полуширины линии излучения практически не изменяется, что свидетельствует об отсутствии лазерной генерации. Минимальное значение полуширины линии МШГ (при максимальной мощности накачки) увеличивается по мере уменьшения глубины окисления.

На рис. 6 представлена зависимость добротности линии излучения МД-лазера от мощности накачки для структур MD1–MD3. Видно, что уменьшение глубины окисления приводит к деградации характеристик МД-лазеров. Показатель преломления слоя $(\text{AlGa})_x\text{O}_y$, получающегося при окислении $\text{Al}_{0.97}\text{Ga}_{0.03}\text{As}$, существенно меньше (~ 1.55), чем показатель преломления GaAs (~ 3.5), поэтому в направлении роста структуры формируется асимметричный волновод $(\text{AlGa})_x\text{O}_y/\text{GaAs}/\text{воздух}$. Оптическое ограничение с торцов диска обеспечивается за счет скачка показателя преломления воздух/GaAs. В идеальном МД-резонаторе радиальная мода первого порядка (распространяющаяся вдоль периферии МД-резонатора — основная мода шепчущей галереи) обладает наибольшим значением добротности. Однако, как было показано в работе [8], близость подложки и конечные размеры пьедестала в МД-резонаторе с симметричным волноводом могут существенно повлиять на величину добротности мод МШГ и длину волны генерации. По всей видимости, в случае МД-резонатора с асимметричным волноводом с уменьшением глубины окисления происходит увеличение внутренних оптических потерь за счет утечки мод в подложку и, в пределе, подавление генерации высокодобротных мод МШГ. Тем не менее в случае глубины окисления пьедестала 1.8 мкм (структура MD2), что составляет

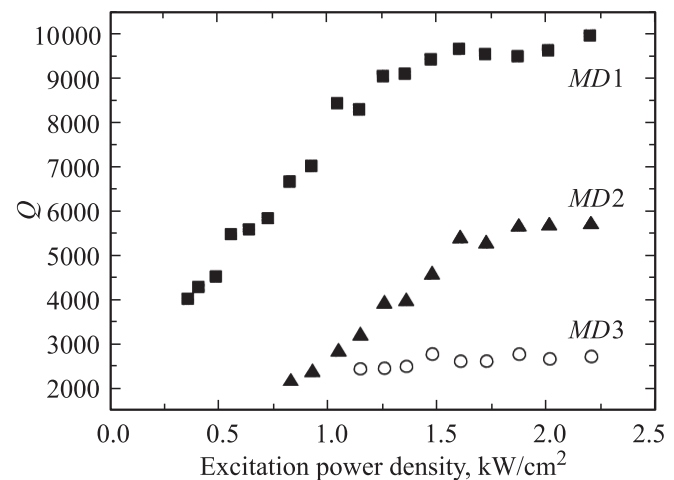


Рис. 6. Зависимость добротности МД-резонатора от мощности возбуждения структур MD1–MD3.

70% от диаметра микродиска, реализуется эффективное оптическое ограничение в направлении роста структуры, достаточное для возникновения лазерной генерации.

В работе проведено исследование влияния глубины окисления слоя $\text{Al}_{0.97}\text{Ga}_{0.03}\text{As}$, образующего пьедестал микродискового лазера с активной областью на основе $\text{InAs}/\text{InGaAs}$ квантовых точек, на характер его излучения при оптической накачке. Показано, что уменьшение глубины окисления приводит к деградации характеристик МД-лазеров из-за усиления утечки мод в подложку. Полученные результаты требуются принимать во внимание в дальнейшем при конструировании и изготовлении инжекционного МД-лазера с асимметричным волноводом.

Работа проведена при поддержке РФФИ, ФЦП „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России 2009–2013“.

Список литературы

- [1] S.L. McCall, A.F. Levi, R.E. Slusher, S.J. Pearton, R.A. Logan. *Appl. Phys. Lett.*, **60**, 289 (1992).
- [2] Н.В. Крыжановская, С.А. Блохин, А.Г. Гладышев, Н.А. Малеев, А.Г. Кузьменков, Е.М. Аракчеева, Е.М. Танклевская, А.Е. Жуков, А.П. Васильев, Е.С. Семенова, М.В. Максимов, Н.Н. Леденцов, В.М. Устинов, Э. Шток, Д. Бимберг. *ФТП*, **40**, 1128 (2006).
- [3] E. Peter, I. Sagnes, G. Guirlo, S. Varoutsis, J. Bloch, A. Lemaître, P. Senellart. *Appl. Phys. Lett.*, **86**, 021 103 (2005).
- [4] M. Fujita, K. Inoshita, T. Baba. *Electron. Lett.*, **34**, 278 (1998).
- [5] Shinichi Koseki, Bingyang Zhang, Kristiaan De Greve, Yoshihisa Yamamoto. *Appl. Phys. Lett.*, **94**, 051 110 (2009).
- [6] А.М. Надточий, С.А. Блохин, А.В. Сахаров, М.М. Кулагина, Ю.М. Задиранов, Н.Ю. Гордеев, М.В. Максимов, В.М. Устинов, Н.Н. Леденцов, Е. Шток, Т. Варминг, Д. Бимберг. *ФТП*, **42**, 1247 (2008).
- [7] С.А. Блохин, А.Н. Смирнов, А.В. Сахаров, А.Г. Гладышев, Н.В. Крыжановская, Н.А. Малеев, А.Е. Жуков, Е.С. Семенова, Д.А. Бедарев, Е.В. Никитина, М.М. Кулагина, М.В. Максимов, Н.Н. Леденцов, В.М. Устинов. *ФТП*, **39**, 782 (2005).
- [8] Shouyuan Shi, Dennis W. Prather, Liuqing Yang, James Kolodzey. *Opt. Eng.*, **42**, 383 (2003).

Редактор Л.В. Беляков

Influence of $\text{AlGaAs}-(\text{AlGa})_x\text{O}_y$ pedestal parameters on characteristics of the microdisk laser with active region based on $\text{InAs}/\text{InGaAs}$ quantum dots

N.V. Kryzhanovskaya+, S.A. Blokhin*+, M.V. Maximov*+, A.M. Nadtochy*+, A.E. Zhukov*+, K.V. Fedorova*, N.N. Ledentsov+•, V.M. Ustinov+, N.D. Il'inskaya+, D. Bimberg•*

* St. Petersburg Academic University — Nanotechnology Research and Education Center, Russian Academy of Sciences, 194021 St. Petersburg, Russia
 + Ioffe Physicotechnical Institute, Russian Academy of Sciences, 194021 St. Petersburg, Russia
 • Institut für Festkörperphysik, Technische Universität, D-10623 Berlin, Germany

Abstract We investigated the influence of parameters of $\text{AlGaAs}-(\text{AlGa})_x\text{O}_y$ layer used to form pedestal of microdisk laser with active region based on $\text{InAs}/\text{InGaAs}$ quantum dots on peculiarities of emission spectra under optical excitation at temperature 15 K. Decrease of the oxidation depth results in quenching of intensity of „whispering gallery modes“ lines, increase of lasing threshold and decrease of quality factor due to the leakages to the substrate.