

**Крыжановская Н.В.¹, Полубавкина Ю.С.¹, Моисеев Э.И.¹, Зубов Ф.И.¹,
Максимов М.В.¹, Липовский А.А.¹, Жуков А.Е.¹, Кулагина М.М.²,
Трошков С.И.², Задиранов Ю.М.², Байдусь Н.В.³, Рыков А.В.³,
Юрасов Д.В.³, Новиков А.В.³, Дубинов А.А.³, Красильник З.Ф.³**

¹Санкт-Петербургский национальный исследовательский

Академический университет РАН

²Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН

³Институт физики микроструктур РАН

Микролазеры на основе дисковых резонаторов и квантоворазмерных гетероструктур для перспективных устройств нанофотоники

Представлены результаты экспериментальных исследований полупроводниковых лазеров с микродисковыми резонаторами с активной областью на основе квантовых точек. Рассмотрен вопрос влияния конструкции полупроводникового резонатора на основные характеристики микролазера: пороговая мощность, добротность, модовый состав спектра излучения, ширина линии лазерной генерации, межмодовое расстояние, температурная стабильность характеристик и спектрального положения линии излучения. Получено предельное снижение размеров микроизлучателей работающих при оптической накачке при одновременном сохранении высокой добротности и низкороговой лазерной генерации при комнатной температуре. В работающих без принудительного охлаждения инжекционных микродисковых лазерах диаметром около 30 мкм продемонстрирована лазерная генерация на основном оптическом переходе квантовых точек вплоть до температуры 100°C. Впервые продемонстрирована лазерная генерация в работающих при комнатной температуре инжекционных микролазерах, изготовленных из эпитаксиальных структур, синтезированных на кремниевой подложке.

Ключевые слова: Микродисковый лазер, микрокольцевой лазер, полупроводник, квантовые точки

Разработка миниатюрных оптических излучателей привлекает огромное внимание исследователей во всем мире в связи с задачей создания новых фотонных устройств, способных заменить электронные средства передачи данных между электронными платами или в пределах одной платы. Весьма привлекательными кандидатами для использования в будущих системах оптической связи на плате являются лазеры с микрорезонатором дисковой/кольцевой геометрии, обладающим осевой симметрией. Размеры таких оптических элементов могут составлять всего лишь единицы микрометров ввиду того, что вследствие полного внутреннего отражения света от боковых стенок резонатора достигается высокая добротность [1]. Помимо малой занимаемой площади, к достоинствам таких микролазеров относят низкую потребляемую мощность, стабильность длины волны лазерной генерации, сверхузкие линии излучения, что важно для оптической передачи данных. При уменьшении диаметра микродискового резонатора происходит экспоненциальный рост радиационных потерь и, связанное с этим, падение добротности резонатора [2]. Кроме того, значительно возрастает рекомбинация на поверхности

резонатора, ухудшается теплоотвод и возрастают требования к точности технологии изготовления резонаторов [3].

Благодаря подавлению латерального растекания носителей заряда в структурах с квантовыми точками (КТ) [4, 5], они активно используются в качестве активной области микродисковых лазеров [6]. Важным достоинством самоорганизующихся КТ InAs/InGaAs, формируемых на подложках GaAs, является возможность генерации на длине волны, близкой к 1.3 мкм, что соответствует прозрачности стандартного оптического волокна, кремния и кремний-германиевых планарных волноводов, а также проводящих тонких пленок пиролитического углерода или графена, перспективных для создания гибких прозрачных контактов.

Оптимизация конструкции оптического микродискового резонатора с асимметричным оксидным волноводом (т.е. на (AlGa)хOу пьедестале) позволила нам получить InAs/InGaAs КТ микролазер спектрального диапазона 1.3 мкм, обладающий рекордно-малыми размерами: при оптической накачке лазерная генерация в них достигалась при 100°C вплоть до диаметра 2 мкм, а при комнатной температуре – до 1 мкм, включительно. Инжекционные микродисковые КТ лазеры уступают по своим характеристикам КТ микролазерам, работающим при оптической накачке. Наименьший размер инжекционного микродискового лазера, в котором генерация достигалась при комнатной температуре, составил 15 мкм. Пороговая плотность тока лазеров не зависит от их диаметра и составила около 0.9 кА/см². Полученный уровень оптической мощности излучения мод микролазера, составляющий в свободном пространстве несколько мкВт, достаточен для реализации функциональных устройств с использованием таких КТ микродисковых лазеров. В микролазерах диаметром 30 мкм лазерная генерация наблюдалась вплоть до рекордной температуры 100°C в пределах полосы основного перехода КТ.

Демонстрируется лазерная генерация в КТ микродисковых резонаторах, отделенных от подложки GaAs селективным травлением и смонтированных на подложку кремния. Дискковый резонатор диаметром 6 мкм продемонстрировал квазиодночастотную лазерную генерацию при комнатной температуре 78К с пороговой мощностью 320 мкВт и добротностью $Q \sim 27000$.

Впервые получена лазерная генерация при комнатной температуре в микродисковых лазерах (In,Ga,Al)As синтезированных на подложках Si с использованием Ge буферного слоя. Активная область представляет собой набор квантовых ям InGaAs/GaAs. Пороговая плотность тока составила около 10 кА/см² в микродисковых лазерах диаметром 24-31 мкм.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (15-02-03624, 16-29-03037).

Библиографический список

1. S. L. McCall, A. F. J. Levi, R. E. Slusher, S. J. Pearton, and R. A. Logan, Whispering-gallery mode microdisk lasers, *Appl. Phys. Lett.* 60, 289 – 291 (1992)
2. Z. Liu, J. M. Shainline, G.E. Fernandes, J.Xu, J. Chen, C. F. Gmach, *Opt. Express*, 18, 19242 (2010).
3. K. J. Vahala, *Nature* 424, 839 (2003)
4. M. V. Maximov, B. V. Volovik, C. M. Sotomayor Torres, E. M. Ramushina, V. I. Skopina, E. M. Tanklevskaya, S. A. Gurevich, V. M. Ustinov, Zh. I. Alferov, N. N. Ledentsov, D. Bimberg, Impact of carrier lateral transport and surface recombination on the PL efficiency of mesas with self-organized quantum dots, *Phys. Stat. Sol. A*, 188, 955–959 (2001).
5. D. Ouyang, N. N. Ledentsov, D. Bimberg, A. R. Kovsh, A. E. Zhukov, S. S. Mikhlin, V. M. Ustinov, High performance narrow stripe quantum-dot lasers with etched waveguide, *Semicond. Sci. Technol.* 18, L53- L54 (2003).
6. H. Cao, J. Y. Xu, W. H. Xiang, Y. Ma, S.-H. Chang, S. T. Ho, G. S. Solomon, Optically pumped InAs quantum dot microdisk lasers, *Appl. Phys. Lett.* 76, 3519-3521 (2000).