

Геометрическая фаза в вертикально-излучающих лазерах на хиральной высококонтрастной решетке

И.В. Тимофеев*

*Институт физики им. Л.В. Киренского, ФИЦ КНЦ СО РАН
Сибирский федеральный университет*

**E-mail: tiv@iph.krasn.ru*

DOI:10.31868/RFL.2024.59-60

Нанолазеры с экстремально малыми размерами, порядка длины волны излучаемого света, заслуживают особого внимания. Экспериментально реализованы нанолазеры на различных материалах и структурах, цепочки и массивы нанолазеров, имеющие ряд перспективных приложений [1]. С другой стороны, в современной фотонике используются микролазеры, размеры которых превышают длину волны света на порядок. Увеличение в размере позволяет обходиться без металлических материалов, эффективно решать проблемы потерь и теплоотвода.

Вертикально-излучающий лазер (ВИЛ) — микролазер с вертикальным резонатором, излучающий свет с поверхности в перпендикулярном направлении, в отличие от классических лазерных диодов. К преимуществам ВИЛ относятся простота изготовления больших массивов и осуществления оптической связи мод. В настоящее время они являются доминирующими источниками света для распознавания лиц и 3D-зондирования, а также передатчиками для оптоволоконной связи центров обработки данных с использованием многомодовых оптических волокон. ВИЛ внесли революционные изменения во многие приложения, включая трехмерное сканирование пространства, оптическую связь, печать и оптическую когерентную томографию. Как правило, ВИЛ состоит из активной области, зажатой между верхним и нижним распределенными брэгговскими отражателями, которые представляют собой несколько десятков пар слоев толщиной в четверть длины волны с чередующимися высоким и низким показателями преломления. Активная область может состоять из нескольких квантовых ям в центре слоя резонатора толщиной, кратной половине длины волны. Большинство коммерческих ВИЛ легко подходят для тестирования, изготовления и оптической связи мод. Для усиления оптической и электрической локализации может быть использован высокопреломляющий слой вблизи активной области. Для высокоскоростных ВИЛ также используется этап ионной имплантации, чтобы ограничить ток в плоскости активного слоя и уменьшить паразитную емкость.

Высококонтрастная решетка представляет собой ряд стержней из материала с высоким показателем преломления, погруженных в материал с низким показателем преломления. Высококонтрастная решетка с высокой отражательной способностью для света, падающего нормально к ее поверхности, используется в качестве верхнего зеркала ВИЛ, заменяя десятки слоев брэгговского отражателя [2]. При этом ориентация стержней высококонтрастной решетки однозначно определяет поляризацию света ВИЛ. Кроме того, использование вертикальной решетки практически вдвое уменьшает вертикальные размеры и позволяет снизить себестоимость производства ВИЛ. Высококонтрастная решетка сама по себе является оптическим микрорезонатором, так как в результате деструктивной интерференции вблизи нее появляются высокодобротные эванесцентные моды [3]. На основе таких мод нами было экспериментально показано низкопороговое

лазирования. Незначительное отклонение от условия полной деструктивной интерференции приводит к лазерной генерации с порогом до 1,25 нДж при длительности импульса накачки 1,24 нс [4]. Это объясняется тем, что при сближении размеров четных и нечетных нано-параллелограммов высококонтрастной решетки резонанс Фано в спектре отражения сужается, а затем – схлопывается, приводя к полностью темному гибричному решеточному резонансу. При этом высокая добротность и сильная локализация поля компенсируют недостаток объема моды микрорезонатора, что описывается скоростными уравнениями, аналогичными уравнениям для диодных микролазеров [5,6]. Массив ВИЛ, расположенных на близком расстоянии друг от друга, позволяет осуществить синхронизацию мод на основе топологически устойчивых мод [7,8].

Оптическое таммовское состояние – это поверхностное состояние, которое можно наблюдать при падении света по нормали к поверхности [9,10]. Замена верхнего брэгговского отражателя высококонтрастной решеткой позволяет рассматривать моду ВИЛ как оптическое таммовское состояние [11]. Локализация света в таких структурах позволяет при помощи малых воздействий существенно изменять фазу на резонансной частоте и отклонять излучаемый пучок [12]. Управление фазой затруднительно ввиду того, что оптическая длина пути высококонтрастной решетки оказывается меньше длины волны. С другой стороны, двулучепреломление приводит к существенному вкладу геометрической фазы [13], что может проявиться при замене высококонтрастной решетки хиральной метаповерхностью [14]. Результаты исследования могут быть применены для разработки новых беззеркальных лидаров, интегрально-оптических схем, микролазеров с низким порогом и высокой добротностью, а также миниатюрных оптических сенсоров.

Работа выполняется при поддержке Российского научного фонда № 24-12-00236, <https://rscf.ru/project/24-12-00236/>

Литература

- [1] S.I. Azzam, et al. *Light Sci. Appl.* **9**, 1. 90 (2020)
- [2] C. Chang-Hasnain, et al, in *2022 28th International Semiconductor Laser Conference (ISLC), IEEE*, pp. 1–2 (2022)
- [3] A. Kodigala, et al. *Nature*, **541**, 7636. 196–199 (2017)
- [4] J.-H. Yang, et al. *Laser & Photonics Reviews*, **15**. 10. 2100118. (2021)
- [5] C. Z. Ning, *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **19**, 1503604–1503604 (2013).
- [6] L.A. Coldren, S. W. Corzine, and M. L. Mashanovitch, *Diode Lasers and Photonic Integrated Circuits*, Wiley Series in Microwave and Optical Engineering. Wiley, 752 p (2012).
- [7] A. Dikopoltsev, et al, *Science* **373**, 1514–1517 (2021).
- [8] P. N. Kim, et al, *Appl. Sci.* **13**, 4004 (2023).
- [9] А. П. Виноградов, et al *Успехи физических наук.*, **180**, 249–263 (2010)
- [10] N. N. Ledentsov, et al, *Opt. Express* **26**, 445 (2018).
- [11] M.-Y. Lin, et al, *Materials* **14**, 2788 (2021).
- [12] R. G. Bikbaev, et al, *Photonics* **10**, 1151 (2023).
- [13] I. V. Timofeev, et al, *Phys. Rev. E* **92**, 052504 (2015).
- [14] S. V. Golod, et al, *Nanotechnology* **31**, 435302 (2020).