

**Исследование пространственной структуры излучения
полупроводниковых ИК-лазеров в ближней и дальней зонах
с субволновым разрешением**

**Д.О.Филатов*, А.В.Круглов, Б.Н.Звонков, Н.Б.Звонков, С.М.Некоркин,
С.А.Ахлестина**

*Научно-образовательный центр сканирующей зондовой микроскопии
Нижегородского государственного университета им. Н.И.Лобачевского,
проспект Гагарина 23, Нижний Новгород 603950, Россия*

Исследована поверхность излучения скола полупроводникового лазера InGaP/GaAs/InGaAs на длине волны 0,98 мкм в переходной области от ближнего поля к дальнему с использованием сканирующего ближнепольного оптического микроскопа.

Введение

В последние годы интенсивно развивается одно из наиболее перспективных направлений сканирующей зондовой микроскопии – ближнепольная сканирующая оптическая микроскопия (БСОМ) [1]. При этом наряду с получением оптического изображения с разрешением, превышающем дифракционный предел, привлекают внимание и приложения ближнепольной микроскопии, прежде всего, спектроскопия с высоким пространственным разрешением [2] и локальная модификация поверхности для целей сверхплотной записи информации и нанолитографии [3]. В частности, исследована спектроскопия тонких органических пленок [4], низкоразмерных полупроводниковых структур [2,5], получены карты поверхности излучения полупроводниковых лазеров [6].

Диаграмма направленности излучения полупроводникового лазера в плоскости, перпендикулярной р–п переходу, является важным параметром приборов, т.к. определяет эффективность ввода лазерного излучения в различные оптические схемы. Общий вид диаграммы направленности в дальнем поле хорошо изучен, однако представляет интерес изучение вида волнового фронта лазера в ближнем поле (на расстоянии порядка нескольких десятков нм от источника излучения), а так же влияние на вид волнового фронта рельефа поверхности.

В данной работе приведены результаты исследований пространственной структуры излучения полупроводниковых лазеров в переходной области от ближнего поля к дальнему с субволновым разрешением.

Результаты эксперимента и их обсуждение

В работе была исследована карта поверхности излучения полупроводникового лазера на длине волны 0,98 мкм. Лазеры с гребенчатым волноводом шириной 5 мкм на основе гетероструктур InGaP/GaAs/InGaAs, выращенных методом МОС–гидридной эпитаксии, были изготовлены в Лаборатории эпитаксиальной технологии Научно-исследовательского физико-технического института (НИФТИ) ННГУ.

* Тел.: +7-8312-658709; Fax: +7-8312-658709; E-mail: filatov@phys.unn.ru

Технология изготовления и свойства лазеров детально описаны в [7]. Профиль показателя преломления исследованной лазерной структуры показан на рис.1. На одну из граней резонатора наносилось несколько слоев SiO-Si, этим достигался коэффициент отражения $\approx 0,95$. Для исследования влияния дефектов на поверхности зеркала лазера были изготовлены структуры без просветляющего покрытия на противоположной грани, а так же структуры, на которые наносился просветляющий слой Al_2O_3 , с коэффициентом отражения $\approx 0,1$.

Исследования проводились на сканирующем ближнепольном оптическом микроскопе Augora фирмы ToroMetrix с системой удержания зонда в обратной связи shear-force non-contact. Измерения в переходной области и в дальнем поле проводились с помощью методики послойного изображения, заключающейся в получении изображения в каждой точке поверхности на различных расстояниях от нее. Для исследования люминесценции лазерных структур применялась схема синхронного детектирования на переменном сигнале.

Использовались специальные БСОН зонды для ближнего ИК-диапазона, изготовленные методом химического травления, обеспечивающего высокий коэффициент прохождения ($\sim 10^{-3}$) и разрешение ($< 80 \text{ nm}$) [8].

На рис.1 приведены энергетическая зонная диаграмма лазерной структуры, а также профили моды излучения лазера без нанесенного на переднюю грань просветляющего покрытия. Кривая, обозначенная буквой b, получена при сканировании зонда, удерживаемого обратной связью на расстоянии несколько нм от поверхности, поперек излучающей области лазера. Кривые c и d показывают профили моды излучения лазера, полученные без обратной связи на постоянной высоте $\sim 700 \text{ nm}$ (в переходной области) и $\sim 7 \text{ мкм}$ (в дальнем поле), соответственно.

Характерной особенностью исследованных лазеров является малая толщина верхнего ограничивающего слоя InGaP ($0,1 \text{ мкм}$), что обеспечивает возможность создания на поверхности структур распределенных резонаторов. Это приводит к

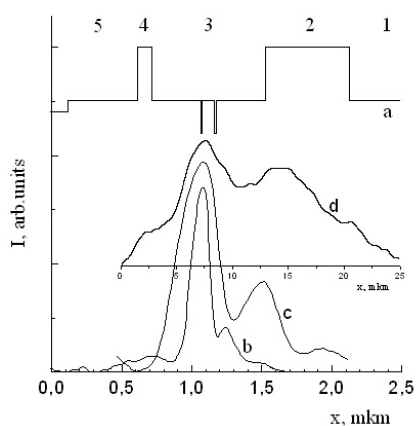


Рис. 1.

Энергетическая зонная диаграмма исследованной лазерной структуры (a) и профили моды излучения, полученные в ближнем поле (b), в переходной области (на высоте $\sim 700 \text{ nm}$) (c) и в дальнем поле (на высоте $\sim 7 \text{ мкм}$) (d). 1 – подложка n^+ -GaAs, 2 – нижний ограничивающий слой n -InGaP, 3 – волноводный слой i -GaAs с двумя квантовыми ямами InGaAs, 4 – верхний ограничивающий слой p -InGaP, 5 – контактный слой p -GaAs.

утечке основной моды в контактный слой и, как следствие, к появлению дополнительного плеча на профиле моды, хорошо заметного слева от основного максимума на кривых b и d.

Полуширина основного максимума интенсивности, измеренная в ближнем поле, составляет ~ 70 нм при ширине волновода равной $0,6\text{--}0,8$ мкм. Полуширина максимума на кривых c и d составляет соответственно 120 нм и 5 мкм. Наличие дополнительного максимума интенсивности справа от основного, хорошо видимого на всех кривых, может объясняться тем, что лазер работал не в одномодовом режиме вследствие несоответствия реальных толщин слоев заданным.

Ближнепольное изображение излучающей области стандартной симметричной структуры лазера с просветляющим покрытием показано на рис.2а, а профили интенсивности излучения на рис.2б. Теоретически рассчитанный (методом эффективного показателя преломления) профиль моды излучения в волноводе показан линией 2. Видно, что в ближнем поле (на расстоянии около 1 нм от поверхности), ширина пика излучения составляет примерно 2,5 мкм и в 4 раза больше, чем рассчитанная ширина моды в волноводе. Очевидно, что такое уширение можно объяснить рассеянием света на неровностях поверхности зеркала. В результате взаимодействия с неровностями просветляющего покрытия волновой фронт может значительно уширяться. Исследования топографии поверхности излучения лазера с помощью атомно-силового микроскопа подтвердило это предположение.

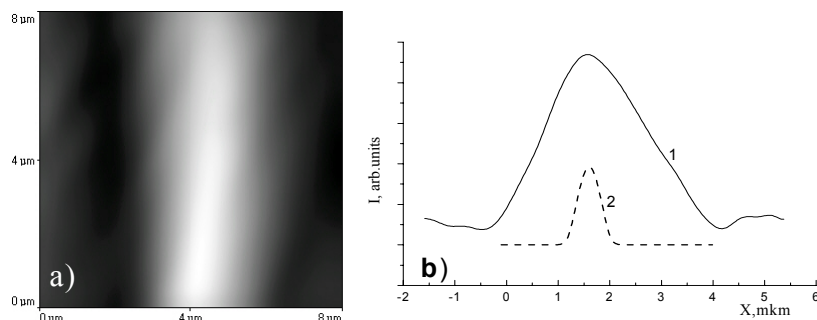


Рис. 2.

(а) Ближнепольное изображение излучающей апертуры лазера с просветляющим покрытием. (б) Экспериментальный (1) и теоретический (2) профили моды излучения.

Заключение

В работе впервые изучена карта излучения со скола полупроводникового лазера в переходной области от ближнего поля к дальнему. Показано влияние зеркала лазера, а также дефектов на его поверхности, на процесс формирования диаграммы направленности, т.е. переход от моды генерируемой в волноводе лазера к собственной диаграмме направленности.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (00-02-16487), МНТП “Университеты России – фундаментальные исследования” (015.06.01.38), НАТО (Проект SfP-973799 Semiconductors) и Российско-американской программы “Фундаментальные исследования и высшее образование в России” (REC-001).

Литература

- [1] Paesler M.A., Moyer P.J. Near-Field Optics: Theory, Instrumentation and Applications. -Wiley, 1996, 355 p.
- [2] Harris T.D., Gershoni D., Pfeifer L., Nirmal M., Trautman J.K., Macklin J.J. “High spatial resolution spectroscopy of single semiconductor nanostructures” //Semicond. Sci. Technol. 1996. V.11. P.1569–1574.
- [3] Hosaka S., Kikukawa A., Koganagi H., Shintani T., Miyamoto M., Nakamura K., Etoh K. “SPM-based data storage for ultrahigh density recording” //Nanotechnology. 1997. V.8. P.A58-A62.
- [4] Naguhara L.A., Yanagi H., Tokumoto H. “Spectroscopic measurements of thin organic films using near-field scanning optical microscopy” //Nanotechnology. 1997. V.8. P.A50–A53.
- [5] Toda Y., Shinomori S., Suzuki K., Arikawa Y. “Near-field magneto-optical spectroscopy of single self-assembled InAs quantum dots” //Appl. Phys. Lett. 1998. V.73. P.517–519.
- [6] Kim J., Pride D.E., Boyd J.T., Jackson H.E. “Spectrally-resolved near-field investigation of proton implanted vertical cavity surface emitting lasers” //Appl. Phys. Lett. 1998. V.72. P.3112–3114.
- [7] Авруцкий И.А., Батукова Л.М., Дианов Е.М., Звонков Б.Н., Звонков Н.Б., Максимов Г.А., Малкина И.Г., Медведева Л.В., Янькова Т.Н. “Лазеры с длиной волны излучения 0,98 мкм на основе гетероструктур InGaP/GaAs/InGaAs, выращенных методом МОС–гидридной эпитаксии” //Квантовая электроника. 1994. Т.21. С.921–924.
- [8] Дряхлушин В.Ф., Климов А.Ю., Рогов В.В., Филатов Д.О., Круглов А.В. “Исследование пространственной структуры излучения полупроводниковых ИК–лазеров в ближней и дальней зонах с субволновым разрешением” //Поверхность. 2000. №11. С.64–67.

Investigation of the spatial structure of emission of the semiconductor lasers in the near-field to far-field transition region with subwavelength resolution ^{*)}

**D.O.Filatov*, A.V.Kruglov, B.N.Zvonkov,
N.B.Zvonkov, S.M.Nekorkin, S.A.Ahlestina**

*Research and Educational Center for Scanning Probe Microscopy at University
of Nizhni Novgorod, 23 Gagarin Ave., Nizhni Novgorod 603950 Russia*

The distribution of the light intensity at the emitting aperture of a InGaP/GaAs/InGaAs single QW semiconductor laser diode emitting at $0.98\mu\text{m}$ in the near-field to far-field transition region ("middle field") with subwavelength resolution has been studied using Scanning Near-field Optical Microscope (SNOM).

Radiation directivity diagram of the semiconductor laser diode in the plane perpendicular to the p-n junction is an important parameter of the device, which determine the coupling efficiency with different optical schemes. Generally, the directivity diagrams in the far field are well studied, however studies of the light distribution at the laser diode emission aperture in the near and middle field and also of the effect of the surface topography on this one are important for laser diode physics and development.

Measurements in the middle and in the far field were performed using the Layered Image Mode, which means measuring the light intensity through the SNOM probe at each point of the surface at different distances from it. Effect of the laser diode mirror, as well as of defects on its surface on the directivity diagram formation process, i.e. transition from the laser waveguide mode to the far field directivity diagram were studied.

This work was supported by NATO's Scientific Affairs Division in the framework of the Science for Peace Programme (Project SfP-973799 Semiconductors).

^{*)} Proc. NATO Project SfP-973799 Semiconductors 1st Workshop. Nizhni Novgorod, 2001

* Phone: +7-8312-658709; Fax: +7-8312-658709; E-mail: filatov@phys.unn.ru