

Investigation of the structure of a semiconductor laser diode and the spatial structure of its radiation by Scanning Near-field Optical Microscopy (SNOM) and Atomic Force Microscopy (AFM)

D.O.Filatov^a, G.A.Maximov^b, V.P.Mishkin^c, V.V.Levichev^d

*Research and Educational Center for Physics of the Solid State Nanostructures,
University of Nizhni Novgorod, 23 Gagarin Ave., Nizhni Novgorod 603950, Russia
(spm.unn.ru)*

The correlation between the structure of the InGaAs/GaAs semiconductor laser diodes (LDs) with InGaAs quantum wells (QWs) and the spatial structure of the LD radiation was investigated by Scanning Near-field Optical Microscopy (SNOM) and cross-sectional Atomic Force Microscopy (AFM). To reveal the LD structure selective chemical etching (enchant with higher etching rate for GaAs and lower one for InGaP and InGaAs) was applied. The AFM scans revealed the geometry of the LD structure including InGaP confinement waveguide layers and InGaAs QWs with the spacer layers between them. The spatial structure of radiation was recorded by SNOM in the collection mode. On the topographic image acquired simultaneously the waveguide layers was revealed. Comparing the topographic images obtained by SNOM and AFM allowed associating the spatial structure of radiation with the LD structure, in particular, the position of the QWs relative to the emitting mode profile was identified.

1. Introduction

Investigation of the semiconductor laser diodes (LDs) is an important application of Scanning Near-field Optical Microscopy (SNOM) [1,2]. SNOM allows recording a map of LD emission intensity $I(x,y)$ with spatial resolution essentially beyond the diffraction limit (down to 50 nm) [3].

Recently the problem of the two-frequency LDs [4] set up a new challenge to SNOM technique. Along with the cascade lasers, such devices are considered as source of middle and far infrared (IR) radiation at the differential frequency of two modes with close frequencies in near IR band. The basic problem of such devices is phase matching between the two modes. It was shown that phase matching is unfeasible when both modes are the ground ones. To solve this problem a LD with two quantum wells (QWs), one of which generates in the ground mode and the other one – in the second order mode was proposed [5]. It was shown, that phase matching is possible in this case.

For implementation of this design, one needs to align the spatial positions of the QWs relative to the waveguide layers and to the knots and maxima of the corresponding modes. Therefore, a technique, which allows to measure the mode profile, the LD structure and to associate them with each other, is necessary. It was shown that cross-sectional Atomic Force Microscopy (X-AFM) allows resolving the QWs and the waveguide layers on the cleaved LD structure [6]. On the other hand, though SNOM is able to resolve the

^a Tel./Fax: +7-8312-658709; E-mail: Filatov@phys.unn.ru

^b Tel./Fax: +7-8312-659035; E-mail: Maksimov@phys.unn.ru

^c Tel.: +7-8312-658709; E-mail: Mishkin@phys.unn.ru

^d Tel.: +7-8312-658709; E-mail: LevichevV.V@phys.unn.ru

mode profile, it still remains a problem to associate the measured mode profile with the LD structure, since the topographic resolution of SNOM is too poor to resolve the QWs.

2. Experiment

In this work, we employed selective chemical etching to convert the difference in the chemical composition of the waveguide layers and QWs in a InGaP/GaAs/InGaAs LD structure into the surface relief detectable by SNOM.

The GaAs based LD structure with $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{P}$ confining waveguide layers and two 8 nm $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ QWs was growth by Atmospheric Pressure Metal Organic Vapor Phase Epitaxy (AP-MOVPE) in Laboratory of Epitaxial Technology, Physical-Technical Research Institute (PTRI) of NNSU by Dr. B.N.Zvonkov. The schematic of the LD structure is shown in Fig.1c.

The multimode LDs with strip width 100 μm made from them had the emission wavelength 1.03 μm (300K). No antireflection coating was deposited on the front facet in order to allow etching of this one. The selective wet etchant (0.8M $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ in 0.3M KOH): H_2O mixed with glycerin 1:1) has higher etching rate for GaAs (~ 1 nm/min, calibrated by etching a sep on bulk GaAs epitaxial layer, the step height was measured by AFM) and lower one for InGaP and InGaAs. The LDs were submerged in the etchant for 1 min and then flashed in distilled water. It should be stressed here that the LDs still generate after etching. Then the etched facets were investigated by TopoMetrix Accurex AFM in the contact mode.

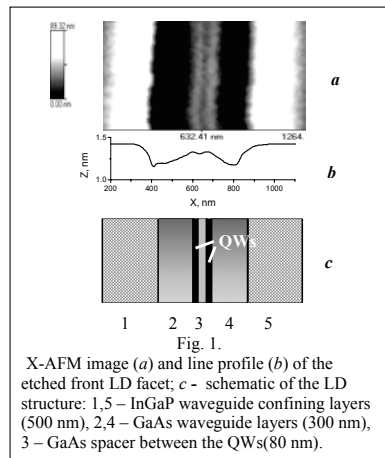
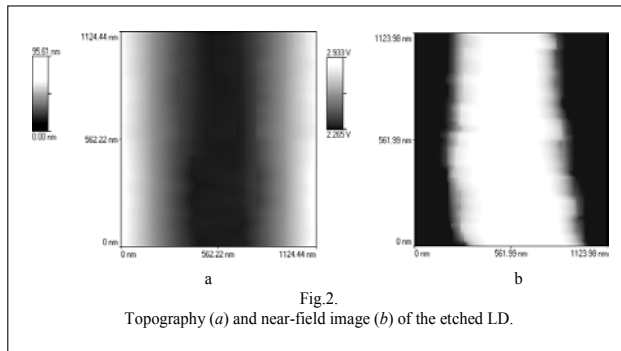


Fig.1 presents an AFM image and line profile of an etched front LD facet. All layers of the structure are resolved clearly, including the QWs and the spacer between them. The smoothing of the profile can be explained by the etching edge effects as well as by the convolution artifacts (the V-shaped Si_3N_4 cantilevers with the pyramidal probes with the tip radius $R=50$ nm and aspect ratio 1:1 were used). The SNOM experiments in the collection mode were carried out using TopoMetrix Aurora SNOM with homemade tuning fork sensor [7].

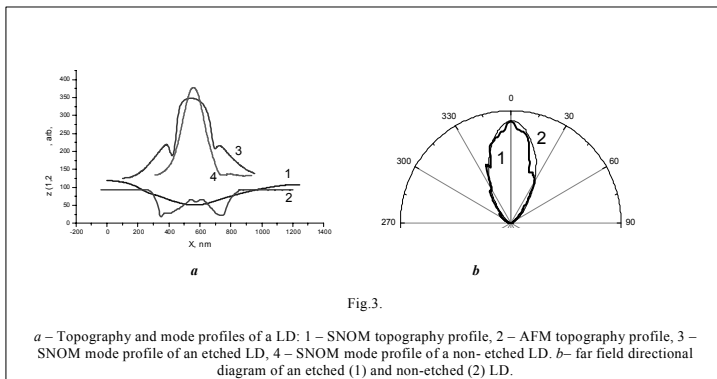
Special probes for 1 μm band were designed and made in Institute for Physics of Microstructures, Russian Academy of Sciences (IPM RAS) in the group by Dr. V.F.Dryakhlushin using the wet etching technique [8]. The SNOM signal was collected by lock-on technique with modulated LD power supply using a Si photodiode.

3. Results and discussions

Fig.2 presents the topographic (*a*) and near-field (*b*) images of the etched LD. The inhomogeneity of the SNOM picture edges were attributed time instability of the LD operation. Because of bold SNOM tip (we estimated the probe tip radius to be $\sim 1 \mu\text{m}$ using a test sample made in the group by Dr. V.F.Dryakhlushin, IPM RAS) we were not able to resolve the QWs. However, the topographic resolution of SNOM was enough to resolve a groove remaining in the place of etched away GaAs waveguide layers. Having aligned the SNOM topography profile (Fig.3a, curve 1) with the one obtained by AFM (curve 2), we associated the LD emission mode profile (curve 3) with the LD structure, in particular, with the position of the QWs inside the waveguide.



Notable features of the mode profile measured on the etched LD facet are the side peaks. No such peaks were observed in the mode profile measured on the non-etched LD (curve 4). Similar features are present in the directional diagrams of the etched and non-etched LDs (Fig.3b, curves 1 and 2, respectively). This allowed us to conclude that these side peaks are not related to the artifacts of the SNOM measurement and should be attributed to diffraction on the edges of the etched InGaP waveguide layers.



This work was partly supported by NATO's Scientific Affairs Division in the framework of Science for Peace Program (Project SFP-973799 Semiconductor) and by Basic Research and Higher Education (BRHE) Program sponsored jointly by US Civilian Research and Development Foundation (CRDF) and Russian Ministry of Education, Project № REC-NN-001. The authors are grateful to V.F.Dryakhlushin, V.V.Rogov, and A.Yu.Klimov (IPM RAS) for the SNOM probes and test samples, to Prof. V.A.Perevoshikov and A.V.Zdoroveishev, Dept. of Physics, NNSU, for assistance in setting up the selective etching technique, and especially to Prof. V.Ya.Aleshkin (IPM RAS) whose ideas have inspired this work.

References

- [1] Paesler M.A., Moyer P.J. Near-Field optics: theory, instrumentation, and applications. – Wiley, 1996, p.355.
- [2] Ünlü M.S., Goldberg B.B., Herzog W.D. Sun D., Towe E. “Near-field optical beam induced current measurements on heterostructures” //Applied Physics Letters. 1995. V.67, Issue 13. P.1862–1864.
- [3] Herzog W.D., Ünlü M.S., Goldberg B.B., Rhodes G.H., Harder C. “Beam divergence and waist measurements of laser diodes by near-field scanning optical microscopy” //Applied Physics Letters. 1997. V.70, Issue 6. P.688 – 690.
- [4] Belyanin A.A., Capasso F., Kocharovsky V.V., Kocharovsky V.I., Scully M.O. “Infrared generation in low-dimensional semiconductor heterostructures via quantum coherence” //Physics Review A. 2001. V.63, №5. P.53803.
- [5] Aleshkin V.Ya., Afonenko A.A., Zvonkov N.B. “Difference Mode Generation in Injection Lasers” //Semiconductors. 2001. V.35, Issue 10. P.1203–1207.
- [6] Ankudinov A.V., Evtikhiev V.P., Tokranov V.E., Ulin V.P., Titkov A.N. “Nanorelief of an oxidized cleaved surface of a grid of alternating $\text{Ga}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As}$ and GaAs heterolayers” //Semiconductors. 1999. V.33, Issue 5. P.555–558.
- [7] Karrai Khaled, Grober Robert D. “Piezoelectric tip-sample distance control for near field optical microscopes” //Applied Physics Letters. 1995. V.66, Issue 14. P.1842–1844.
- [8] Dryakhlushin V.F., Klimov A.Yu., Rogov V.V., Kruglov A.V. “Probs for scanning near-field optical microscope” //Poverkhnost' (Surface) 2000. №7. P.40 (in Russian).

Исследование структуры полупроводникового лазера и пространственной структуры его излучения методами ближнепольной сканирующей оптической микроскопии и (БСОМ) и атомно-силовой микроскопии (АСМ)

Д.О.Филатов^е, Г.А.Максимов^ф, В.П.Мишкин^г, В.В.Левичев^h

Научно-Образовательный центр «Физика твёрдых наноструктур» (НОЦ ФТНС) ННГУ. 603950, Россия, Н.Новгород, проспект Гагарина 23, корпус 2 (spm.unn.ru)

Методами ближнепольной сканирующей оптической микроскопии (БСОМ) и атомно-силовой микроскопии (АСМ) на поперечных срезах исследовалась связь структуры полупроводниковых лазеров на основе InGaP/GaAs с квантовыми ямами (КЯ) InGaAs и пространственной структуры лазерного излучения. Для выявления структуры лазера применялся метод селективного по In химического травления (травитель с высокой скоростью травления – GaAs и низкой – InGaP и InGaAs). На АСМ сканах проявляется геометрия структуры лазера, включая ограничивающие волноводные слои InGaP и КЯ InGaAs со спейсерными слоями между ними. Методом БСОМ была получена пространственная структура излучения изучаемого лазера и структура лазера, где прослеживаются только волноводные слои, что объясняется большим радиусом закругления зонда по сравнению с АСМ зондом. На основе полученных данных осуществили привязку профиля геометрии полупроводниковой структуры к профилю структуры излучения, в частности, пространственного положения КЯ относительно максимума профиля моды.

1. Введение

Исследование полупроводниковых лазерных диодов (ЛД) является важным приложением БСОМ [1,2]. БСОМ позволяет записывать карту интенсивности $I(x,y)$ излучения ЛД с пространственным разрешением до 50 нм и ниже, т.е. существенно превосходящим дифракционный предел [3]. В последнее время проблема двухчастотных ЛД [4] поставила новую задачу для БСОМ. Наряду с каскадными лазерами такие приборы считаются перспективными источниками среднего и дальнего инфракрасного (ИК) излучения, генерируемого на разностной частоте двух мод с близкими частотами, лежащими в диапазоне ближнего ИК. Основной проблемой таких приборов является согласование фаз между модами. Было показано, что согласование невозможно, когда обе моды являются основными. Для решения этой проблемы был предложен ЛД с двумя квантовыми ямами (КЯ), одна из которых генерирует в основной моде другая – в моде второго порядка [5]. Было показано, что в этом случае согласование фазы возможно.

Для осуществления данной конструкции необходимо точное совмещение положения КЯ в волноводе и узлов и максимумов соответствующих мод. Поэтому не-

^е Тел./Факс: +7-8312-658709; E-mail: Filatov@phys.unn.ru

^ф Тел./Факс: +7-8312-659035; E-mail: Maksimov@phys.unn.ru

^г Тел.: +7-8312-658709; E-mail: Mishkin@phys.unn.ru

^h Тел.: +7-8312-658709; E-mail: LevichevV.V@phys.unn.ru

обходима методика, которая позволила бы измерять обе указанные величины и связывать их друг с другом. Было показано, что метод атомно-силовой микроскопии на сколе ЛД структур позволяет разрешать КЯ и волноводные слои [6]. С другой стороны, не смотря на то, что метод БСОМ позволяет регистрировать профиль моды излучения, нерешенной остаётся проблема установления пространственной привязки измеренного профиля к структуре ЛД, поскольку топографическое разрешение БСОМ недостаточно для идентификации КЯ.

В данной работе мы применили селективное химическое травление для преобразования различий в химическом составе волноводных слоёв и КЯ в InGaAs/GaAs/InGaAs структуре ЛД в поверхностный рельеф, достаточно развитый для разрешения методом БСОМ.

2. Эксперимент

ЛД структура на основе GaAs с ограничивающими волноводными слоями $\text{In}_{0.49}\text{Ga}_{0.52}\text{P}$ и двумя $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ КЯ толщиной 8 нм была выращена методом газофазной МОС-гидридной эпитаксии при атмосферном давлении в Лаборатории эпитаксиальной технологии, Научно-исследовательского физико-технического института (НИФТИ) ННГУ Б.Н.Звонковым. Схема структуры ЛД показана на рисунке 1с. Многомодовые ЛД с шириной полоска 100 мкм, изготовленные из них, имели длину волны излучения 1,03 мкм (300 К). Просветляющее покрытие на переднюю грань ЛД не наносилось. Использовался селективный по In травитель (0,8М раствор $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ в 0,3М KOH): H_2O в смеси с глицерином в пропорции 1:1, он имел высокую скорость травления GaAs (~1 нм/мин) и низкую – InGaP и InGaAs. ЛД погружались в травитель на 1 мин и затем ополаскивались в дистиллированной воде. Следует отметить, что и после травления ЛД продолжали генерировать. Топография поверхности травлёных зеркал ЛД измерялась на АСМ ТороMetrix Accurex в контактном режиме. На рис.1 представлены АСМ изображение и профиль травлёной передней грани ЛД. Все слои структуры разрешены, включая КЯ и спейсерный слой между ними. Сглаживание профиля можно объяснить краевыми эффектами травления, а также эффектом конволюции (использовались V – образные Si_3N_4 кантилевы с пирамидальными зондами с радиусом закругления $R = 50$ нм и отношением аспекта 1:1). БСОМ эксперименты в режиме собирания излучения зондом были выполнены на установке ТороMetrix Augo, оснащенной пьезокварцевым сенсором (Tuning Fork [7]) собственной конструкции. Специальные зонды для ближнего ИК диапазона (~1 μm) были разработаны и изготовлены в Институте физики микроструктур Российской академии наук (ИФМ РАН) группой В.Ф.Дряхлушина методом химического травления [8]. БСОМ сигнал регистрировался Si фотодиодом по селективной методике с синхронным детектированием (с использованием модулированного источника питания ЛД).

3. Результаты и обсуждение

На рис.2 представлены топография (а) и ближнепольное (б) изображение травлёной передней грани ЛД. Неоднородность краёв БСОМ излучающей апертуры объясняется временной нестабильностью мощности излучения ЛД. Вследствие большого радиуса R закругления кончика БСОМ-зонда (по оценке, произведенной по результатам сканирования тестового образца, изготовленного группой В.Ф.Дряхлушина, ИФМ РАН, радиус закругления составлял $\sim 1 \text{ }\mu\text{m}$) КЯ на топографическом изображении не разрешаются. Тем не менее, топографическое разрешение БСОМ оказалось достаточным для разрешения углубления, остающегося в месте вытравленных волноводных слоёв GaAs. Совмещением профиля топографии, полученного методом БСОМ (рис.3а, кривая 1), с профилем, полученным методом АСМ (кривая 2), была осуществлена привязка профиля моды излучения ЛД (кривая 3) к структуре ЛД, в частности, из полученных данных можно определить положение квантовых ям относительно максимума моды волновода.

Следует отметить появление боковых пиков профиля моды излучения, измеренного на травлёной поверхности ЛД (рис.3а, кривая 3). Таких пиков не наблюдалось на профиле моды излучения на нетравленном ЛД (кривая 4). Подобные особенности наблюдаются и на диаграмме направленности травленного и нетравленного ЛД в дальнем поле (рис.3б, кривые 1 и 2, соответственно). Это позволяет заключить, что боковые пики не связаны с артефактами БСОМ-измерений, а связаны с дифракцией на краях травленных InGaP волноводных слоёв.

Данная работа была частично поддержана программой НАТО “Наука для Мира” (SfP-973799) и программой “Фундаментальные исследования и Высшее образование”, финансируемой совместно Министерством образования РФ и Фондом гражданских исследований и развития США (CRDF), Проект № REC-NN-001. Авторы благодарят сотрудников факультета и персонал Лаборатории эпитаксиальной технологии (НИФТИ ННГУ), особенно Б.Н.Звонкова и С.М.Некоркина, за предоставленные для исследования лазерные диоды и за методические указания; В.Ф.Дряхлушина, В.В.Рогова, и А.Ю.Климова (ИФМ РАН) за предоставленные БСОМ-зонды и тестовые образцы; проф. В.А.Перевощикова и А.В.Здоровейцева, Физический факультет ННГУ, за помощь при выборе селективного травителя. Особо благодарим проф. В.Ю.Алёшкину (ИФМ РАН), чьи идеи стимулировали написание этой работы.