

## ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

PACS 42.55.Px; 42.60.Da; 42.60.Jf

## Модовая структура в дальнем поле излучения многоямного лазера с выходом излучения через подложку

С.М.Некоркин, Б.Н.Звонков, М.В.Карзанова, Н.В.Дикарёва, В.Я.Алешкин, А.А.Дубинов

*Исследованы диаграммы направленности излучения лазера на основе структуры InGaAs/GaAs/InGaP с выходом излучения через подложку. В допороговом режиме обнаружено несколько пиков, соответствующих излучению основной и возбужденных мод. Исследованы и объяснены зависимости амплитуды, положения и ширины пиков от тока накачки.*

**Ключевые слова:** лазер с выходом излучения через подложку, диаграмма направленности, модовый состав.

Полупроводниковые лазеры с вытекающей модой [1] обладают рядом интересных особенностей, которые могут быть использованы для практических применений. Во-первых, диаграмма направленности излучения лазеров, в которых основная мощность сосредоточена в вытекающей моде [2], в плоскости, перпендикулярной р–п-переходу, в десять и более раз уже, чем у обычных полупроводниковых лазеров. Во-вторых, плотность мощности на зеркалах таких лазеров много меньше таковой для лазеров традиционных конструкций. Эти два обстоятельства создают предпосылки для создания мощных импульсных диодных лазеров с узкой диаграммой направленности [2] при использовании нескольких квантовых ям (КЯ) в качестве активных областей.

В отличие от лазеров без выхода излучения через подложку, в лазерах с вытеканием излучения наблюдается модовая структура в дальнем поле в допороговом режиме, выраженная узкими лепестками на диаграмме направленности [3, 4]. В работе [4] было установлено, что в таких лазерах экспериментальное измерение диаграмм направленности (в том числе и в допороговом режиме) и соответствующие расчеты позволяют количественно определить эффективный показатель преломления моды, фактор оптического ограничения, а также коэффициент, характеризующий изменение показателя преломления активного слоя с ростом концентрации инжектированных носителей. Однако рассчитанная в [4] ширина диаграммы направленности для пиков, соответствующих волноводным модам, оказалась существенно меньше наблюдаемой. Это отличие авторы работы [4] объясняют «малоугловым рассеянием», которое не было учтено ими при построении расчетной диаграммы направленности в дальней зоне. Кроме того, смещение положения пиков в диаграмме направленности с увеличением тока накачки было

объяснено изменением эффективного показателя преломления из-за заполнения КЯ неравновесными носителями и разогревом полупроводника, что, как показано нами, не всегда верно.

В настоящей работе проведено исследование диаграммы направленности электролюминесценции полупроводникового лазера с вытекающей модой, содержащего шесть КЯ. Показано, что ширина пиков электролюминесценции, соответствующих модам волновода, определяется в основном шириной спектра электролюминесценции. Обнаружено резкое сужение диаграммы направленности с началом стимулированного излучения. Показано, что изменение положения волноводных пиков на диаграмме направленности обусловлено изменением не только эффективного показателя преломления моды из-за разогрева центрального слоя и увеличения концентрации носителей в нем, но и спектра излучения при вариации тока накачки.

Лазерная GaAs/InGaP/InGaAs-гетероструктура была выращена методом МОС-гидридной эпитаксии при атмосферном давлении. Параметры слоев приведены в табл. 1. На основе выращенной гетероструктуры были изготовлены лазерные диоды с шириной активной области 360 мкм и длиной резонатора 1 мм. Напыления просвет-

Табл. 1. Параметры слоев лазерной гетероструктуры.

| Номер слоя | Название слоя                | Легирование и состав слоя | Толщина слоя (нм) |
|------------|------------------------------|---------------------------|-------------------|
| 1          | Подложка                     | n <sup>+</sup> -GaAs      | –                 |
| 2          | Буферный                     | n-GaAs                    | 540               |
| 3          | Ограничительный              | n-InGaP                   | 80                |
| 4          | Волноводный                  | n-GaAs                    | 504               |
| 5          | Волноводный                  | i-GaAs                    | 108               |
| 6          | КЯ 1                         | InGaAs                    | 9                 |
| 7          | Волноводный                  | i-GaAs                    | 36                |
| 8          | Компенсированный             | i-GaAsP                   | 36                |
| 9          | Волноводный                  | i-GaAs                    | 36                |
| 10–25      | Повтор слоев 6–9 четыре раза |                           |                   |
| 26         | КЯ 6                         | InGaAs                    | 9                 |
| 27         | Волноводный                  | i-GaAs                    | 36                |
| 28         | Компенсированный             | i-GaAsP                   | 36                |
| 29         | Волноводный                  | i-GaAs                    | 108               |
| 30         | Волноводный                  | p-GaAs                    | 504               |
| 31         | Ограничительный              | p-InGaP                   | 432               |
| 32         | Контактный                   | p <sup>+</sup> -GaAs      | 216               |

С.М.Некоркин, Б.Н.Звонков, М.В.Карзанова, Н.В.Дикарёва. Научно-исследовательский физико-технический институт Нижегородского государственного университета им. Н.И.Лобачевского, Россия, 603950 Н.Новгород, просп. Гагарина, 23;

В.Я.Алешкин, А.А.Дубинов. Институт физики микроструктур РАН, Россия, 603950 Н.Новгород, ГСП-105; e-mail: sanya@ipm.sci-nnov.ru

Поступила в редакцию 14 июня 2012, после доработки – 13 августа 2012 г.

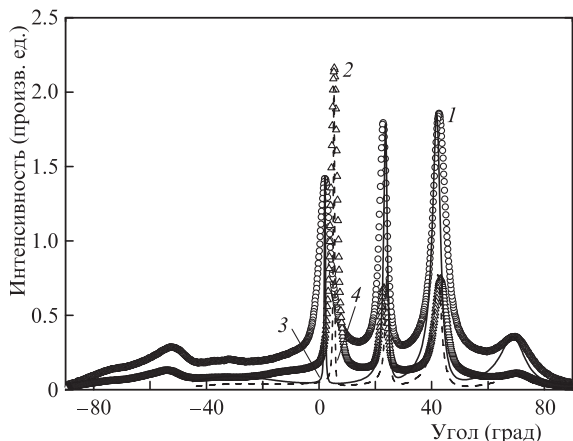


Рис.1. Диаграммы направленности излучения лазера при постоянных токах накачки 0.15 (1) и 1.8 А (2), а также рассчитанные диаграммы направленности для фиксированных длин волн 0.964 и 0.983 мкм и показателей преломления волноводного слоя 3.518 и 3.517 (3 и 4 соответственно).

ляющих и отражающих покрытий на грани лазерных чипов не проводились. Активная область структуры состояла из шести КЯ.

Измерения спектральных зависимостей и диаграмм направленности излучения проводились при постоянной и импульсной накачке (длительность импульса 220 нс, частота повторения 1.43 кГц). Все измерения выполнялись при комнатной температуре. Лазерная генерация возникла при токе 7 А, длина волны излучения была ~1 мкм.

На рис.1 представлены диаграммы направленности в плоскости, перпендикулярной р–n-переходу лазера, при постоянном токе инжекции 0.15 и 1.8 А. При токе 0.15 А наблюдается ярко выраженная четырехлепестковая диаграмма (кривая 1), максимумы которой приходятся на углы 2°, 23°, 43° и 69°. При увеличении тока накачки центральный пик (2°) сдвигается в сторону больших углов и при токе 1.8 А соответствует углу 5° (кривая 2). При этом угловое положение других пиков практически не изменяется. Отметим также наличие пика вблизи угла -55°, который объясняется отражением излучения моды, соответствующей углу 69°, от границы подложки, противоположной эпитаксиальной стороне.

Проведенные расчеты исследованной лазерной структуры (рис.2) подтверждают, что возможен выход излучения на четырех модах. Вычисленный фактор оптического ограничения  $\Gamma$  этих мод составляет 0.023 для 0-й, 0.007 для 1-й, 0.013 для 2-й и 0.014 для 3-й моды. Однако если

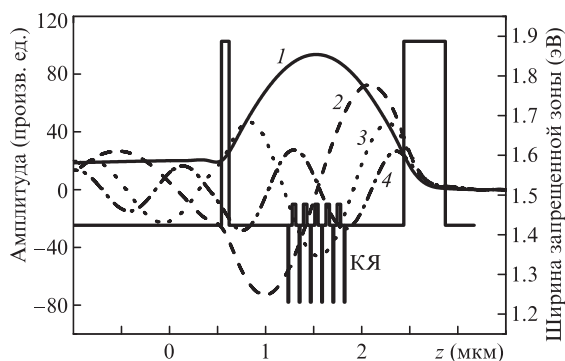


Рис.2. Зонная диаграмма и рассчитанное продольное распределение электрического поля 0-й (1), 1-й (2), 2-й (3) и 3-й моды (4).

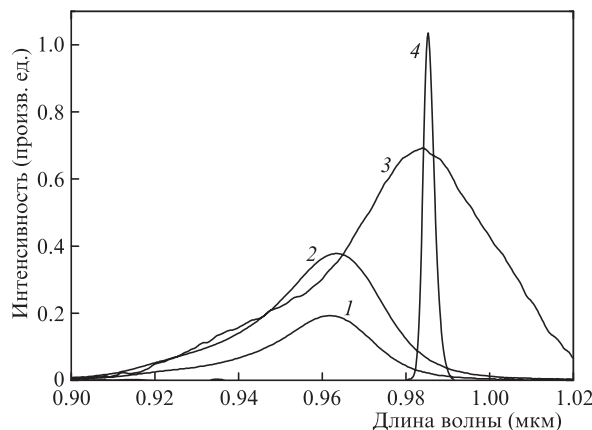


Рис.3. Спектры люминесценции лазера для токов 0.15 (1), 0.4 (2), 1.8 (3) и 10 А (4).

учесть неоднородность заполнения носителями тока квантовых ям, наблюдаемую ранее в лазерах с большим количеством КЯ [5], то можно предположить, что при малых токах, когда наблюдается спонтанная люминесценция, носителями тока в основном заполнены крайние КЯ. В этом случае фактор  $\Gamma$  равен 0.007 для 0-й, 0.003 для 1-й, 0.003 для 2-й и 0.006 для 3-й моды, что удовлетворительно согласуется с экспериментом (рис.1). На рис.1 приведена также диаграмма направленности, рассчитанная для моды, описанной в работе [6], для двух значений показателя преломления GaAs в центральном волноводном слое: 3.518 (кривая 3) и 3.517 (кривая 4) на двух фиксированных длинах волн (0.964 и 0.983 мкм соответственно), отвечающих максимумам спектров люминесценции (рис.3). Отметим, что в отличие от работы [7], в которой наблюдались особенности в спектре генерации излучения в лазере с выходом излучения через подложку, в нашем случае никаких особенностей в спектре генерации не наблюдалось, что можно объяснить различием в конструкциях лазеров. На рис.1 видно хорошее совпадение положений максимумов вычисленных (кривые 3 и 4) и измеренных (кривые 1 и 2) диаграмм направленности. По мере увеличения тока инжекции происходит заполнение центрального волноводного слоя носителями тока, приводящее к уменьшению показателя преломления этого слоя, что отмечалось и в более ранних работах (см., напр., [4]). Кроме того, показатель преломления уменьшается с ростом длины волны излучения.

На рис.4 приведены диаграммы направленности в плоскости, перпендикулярной р–n-переходу лазера при импульсном токе накачки 5 и 10 А. С ростом тока от 5 до 10 А (кривые 1 и 2 соответственно) структура переходит в режим лазерной генерации, в котором диаграмма направленности становится однолепестковой с углом 6° и шириной пика 2°. Из сравнения диаграмм на рис. 4 и 1 видно, что в режиме лазерной генерации структура излучает только на наиболее добротной 0-й моде. Отметим, что при указанных токах накачки преимущественного влияния на диаграмму направленности разогрева центрального слоя над увеличением концентрации носителей в этом слое не наблюдается, в противном случае это привело бы к увеличению показателя преломления волноводного слоя и, соответственно, к уменьшению угла излучения 0-й моды, что было замечено и объяснено в работе [4].

Из рис.1 видно, что ширины экспериментальных и теоретических пиков сильно различаются (это отмечалось и

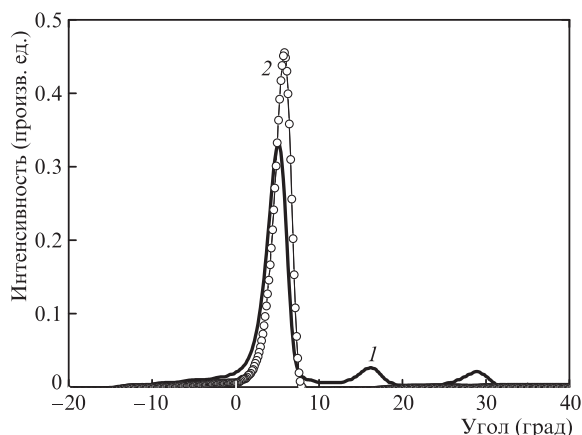


Рис.4. Диаграммы направленности излучения лазера при импульсных токах накачки 5 А (до порога) (1) и 10 А (выше порога генерации) (2).

в работе [4]). Указанное различие можно объяснить двумя механизмами уширения экспериментальных кривых. Согласно формуле (2) в работе [4], угол выхода излучения из подложки определяется эффективным волновым вектором распространения соответствующей моды. В первом случае (механизм уширения не зависит от тока накачки) неопределенность эффективного волнового вектора распространения может вызываться широким резонатором лазера (в нашем случае 360 мкм), а также параметрами экспериментальной установки по измерению диаграммы направленности. По оценке разброс угла выхода для первого механизма уширения в нашем случае составляет около  $2^\circ$ . Второй механизм связан со спектральной шириной линии люминесценции, поскольку эффективный волновой вектор распространения зависит как от частоты излучения, так и от тока накачки. На рис.5 приведено сравнение экспериментальной диаграммы направленности (кривая 1) с диаграммами, вычисленными без учета (кривая 2) и с учетом (кривая 3) спектральной ширины линии люминесценции для тока 0.15 А (~30 нм, рис.3). В последнем случае наблюдается хорошее согласие с экспериментом. При токе 10 А ширина линии излучения на полувысоте пика составляет около 2 нм, поэтому характерная ширина диаграммы направленности должна быть около  $0.1^\circ$ , однако в эксперименте она равна примерно  $2^\circ$  и не уменьшается с ростом тока. Следовательно, можно сделать вывод, что при допороговых накачках основной механизм уширения связан с широкой линией спонтанной люминесценции, а при токах, превышающих порог лазерной генерации, основным механизмом уширения является неопределенность эффективного волнового вектора распространения.

Таким образом, при исследовании диаграмм направленности излучения в допороговом режиме (спонтанное

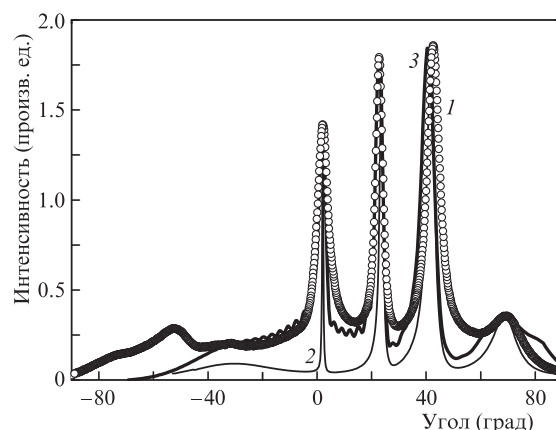


Рис.5. Экспериментальная диаграмма направленности (1) и расчетные диаграммы направленности без учета (2) и с учетом (3) спектральной ширины линии люминесценции для тока 0.15 А.

излучение) наблюдается несколько пиков, соответствующих основной и возбужденным модам. Увеличение тока накачки вызывает смещение пика основной моды, что обусловлено уменьшением показателя преломления активной области из-за заполнения ее носителями и смещением максимума люминесценции в длинноволновую область. Исследована зависимость амплитуды пиков от тока накачки. Экспериментально показано неоднородное заполнение КЯ носителями в допороговом режиме, что проявляется в изменении интенсивностей узких лепестков диаграмм направленности.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 11-02-97049-р поволжье\_a, 12-02-90024-Бел\_a), программ РАН «Современные проблемы радиофизики» и «Фундаментальные аспекты физики и технологии полупроводниковых лазеров как основных элементов фотоники и квантовой электроники», а также федеральной программы «Кадры».

- Scifres D.R., Streifer W., Burnham R.D. *Appl. Phys. Lett.*, **29** (1), 23 (1976).
- Алешкин В.Я., Бабушкина Т.С., Бирюков А.А., Дубинов А.А., Звонков Б.Н., Колесников М.Н., Некоркин С.М. *Квантовая электроника*, **40** (10), 855 (2010).
- Богатов А.П., Дракин А.Е., Стратонников А.А., Алавердян Ю.С., Устинов А.В., Швейкин В.И. *Квантовая электроника*, **27** (2), 131 (1999).
- Богатов А.П., Дракин А.Е., Лях А.А., Стратонников А.А. *Квантовая электроника*, **31** (10), 847 (2001).
- Бирюков А.А., Некоркин С.М., Колесников М.Н., Бабушкина Т.С., Алешкин В.Я., Дубинов А.А. *ЖТФ*, **81** (7), 149 (2011).
- Кейси Х., Паниш М. *Лазеры на гетероструктурах* (М.: Мир, 1981).
- Аржанов Е.В., Богатов А.П., Коняев В.П., Никитина О.М., Швейкин В.И. *Квантовая электроника*, **21** (7), 633 (1994).