

# Полупроводниковый лазер с выводом излучения через подложку с улучшенными энергетическими характеристиками и сверхузкой диаграммой направленности

В.Я.Алешкин, Т.С.Бабушкина, А.А.Бирюков, А.А.Дубинов,  
Б.Н.Звонков, М.Н.Колесников, С.М.Некоркин

*На основе гетероструктуры InGaAs/GaAs/InGaP создан полупроводниковый лазерный диод с выводом излучения через подложку, что позволило получить в лазере с длиной резонатора 0.8 мм и шириной полоскового контакта 360 мкм значительный выход излучения в узком угловом интервале (около  $1-2^\circ$ ) с энергией излучения 170 мкДж в режиме накачки одиночным импульсом тока с амплитудой 88 А и длительностью 5 мкс.*

**Ключевые слова:** диодный лазер, узкая диаграмма направленности, вывод излучения через подложку.

Технические параметры (в первую очередь, энергетические) используемых в настоящее время полупроводниковых лазеров практически достигли предельных значений [1, 2]. Дальнейшему развитию, расширению и освоению новых областей применения диодных лазеров препятствует высокая плотность лазерного излучения на выходном зеркале, обусловленная малой толщиной волноводного слоя, что существенно ограничивает получение столь желаемой выходной мощности. Кроме того, у обычных лазеров диаграмма направленности выходного излучения в плоскости, перпендикулярной  $p-n$ -переходу, очень широкая, что снижает качество излучения. Отметим, что одной из основных причин, ограничивающих выходную мощность, является наличие предельно возможного поля световой волны в резонаторе, которое фактически определяется вероятностью испускания оптических фононов [2]. Второй причиной является деградация зеркал лазера в сильных полях. Все это говорит о существовании предельной плотности мощности в резонаторе лазера. Для того чтобы создать мощные лазеры, используются либо сверхширокие резонаторы [1, 2], либо два [3, 4] или три [5] последовательно расположенных лазера, соединенные туннельным  $p-n$ -переходом.

Однако возможен и другой путь увеличения предельной мощности лазера. Если основную часть лазерного излучения выводить не через зеркала, а через подложку, которая на несколько порядков толще волноведущего слоя, то можно значительно увеличить суммарную мощность. Вывод излучения в подложку может быть осуществлен за счет уменьшения толщины ограничивающего слоя, отделяющего волноведущий слой от подложки. Очевидно, что такие лазеры будут обладать большим

пороговым током из-за больших потерь на вытекание в подложку, поэтому для увеличения коэффициента усиления в активную область лазера необходимо встраивать большое количество квантовых ям. Существенным достоинством таких лазеров будет значительное сужение диаграммы направленности в плоскости, перпендикулярной  $p-n$ -переходу.

Реализация предложенной нами конструкции лазера с вытекающим в подложку излучением устраняет указанные выше технические пределы параметров и позволяет создать новое поколение полупроводниковых лазеров со значительно более высокими энергетическими и пространственно-спектральными характеристиками.

В настоящей работе описан созданный и исследованный полупроводниковый лазер с широким волноводом и увеличенным объемом активной среды, содержащей шесть квантовых ям (КЯ). Оптимизация такой структуры с целью вытекания значительной части излучения в подложку позволила получить сверхузкую диаграмму направленности в плоскости, перпендикулярной  $p-n$ -переходу. Выход излучения у лазерных диодов новой конструкции с вытеканием излучения в подложку составил около 84 % в узком угловом интервале (около  $1-2^\circ$ ), что существенно больше, чем у лазерных диодов с вытеканием излучения в подложку обычной конструкции [6] (50 % в узком пучке). Экспериментальные исследования энергетических параметров полупроводниковых лазеров с выходной апертурой 360 мкм показали возможность получения импульсной энергии излучения 170 мкДж в режиме накачки одиночным импульсом тока с амплитудой 88 А и длительностью 5 мкс.

Лазерная структура была выращена методом МОС-гидридной эпитаксии при атмосферном давлении в НИФТИ ННГУ им. Н.И.Лобачевского. Параметры слоев приведены в табл.1. Из выращенной GaAs/InGaP/InGaAs гетероструктуры изготовлены полупроводниковые лазеры с шириной активной области 360 мкм и длиной резонатора 0.5, 0.8, 1, 1.3 и 2 мм.

Температурные зависимости плотности порогового тока для лазерных диодов представлены на рис.1. Для всех образцов наблюдалось снижение порогового тока с уменьшением температуры. Температурные зависимо-

В.Я.Алешкин, А.А.Дубинов. Институт физики микроструктур РАН, Россия, 603950 Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46  
e-mail: aleshkin@ipm.sci-nnov.ru, sanya@ipm.sci-nnov.ru  
Т.С.Бабушкина, А.А.Бирюков, Б.Н.Звонков, М.Н.Колесников, С.М.Некоркин. Научно-исследовательский физико-технический институт Нижегородского государственного университета им. Н.И.Лобачевского, Россия, 603950 Нижний Новгород, просп. Гагарина, 23;  
e-mail: nekorkin@nifti.unn.ru, biryukov@nifti.unn.ru

Табл.1. Параметры слоев лазера.

Номер слоя	Название слоя	Легирование и состав слоя	Толщина слоя (нм)
1	подложка	n-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	108
8	КЯ 2	InGaAs	9
9	волноводный	i-GaAs	108
10	КЯ 3	InGaAs	9
11	волноводный	i-GaAs	108
12	КЯ 4	InGaAs	9
13	волноводный	i-GaAs	108
14	КЯ 5	InGaAs	9
15	волноводный	i-GaAs	108
16	КЯ 6	InGaAs	9
17	волноводный	i-GaAs	108
18	волноводный	p-GaAs	504
19	ограничительный	p-InGaP	432
20	контактный	p <sup>+</sup> -GaAs	216

сти внешней дифференциальной эффективности  $\eta$  для лазерных диодов показаны на рис.2. Отмечено увеличение квантовой эффективности при понижении температуры.

На рис.3 приведены спектры излучения лазерного диода с длиной резонатора 1 мм, снятые при температуре 300 К и различных токах накачки. Спектральные измерения показали, что генерация при температуре жидкого азота начинается при накачке постоянным током 0.9 А (плотность тока 250 А/см<sup>2</sup>), что соответствует тенденции уменьшения плотности порогового тока при понижении температуры (рис.1, кривая 3).

Были проведены измерения диаграмм направленности в плоскости p–n-перехода и в плоскости, перпендикулярной ему. На рис.4 и 5 представлены диаграммы направленности излучения для лазерных диодов с длиной резонатора 1 и 2 мм. Диаграммы направленности лазерных диодов с длиной резонатора 0.5, 0.8 и 1.3 мм в плоскости, перпендикулярной p–n-переходу, имели (как и у лазера с длиной резонатора 1 мм) однолепестковый

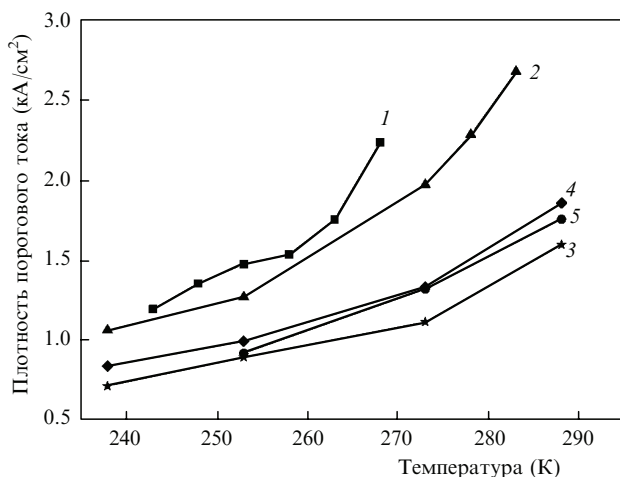


Рис.1. Температурные зависимости плотности порогового тока лазерных диодов с длиной резонатора 0.5 (1), 0.8 (2), 1 (3), 1.3 (4) и 2 мм (5).

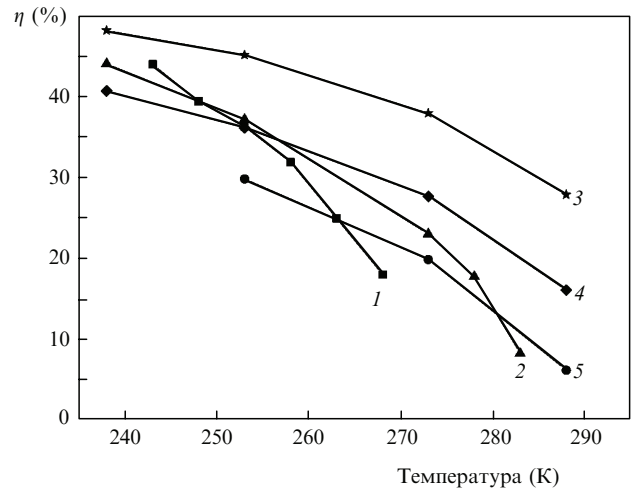


Рис.2. Температурные зависимости внешней дифференциальной эффективности  $\eta$  для лазерных диодов с длиной резонатора 0.5 (1), 0.8 (2), 1 (3), 1.3 (4) и 2 мм (5).

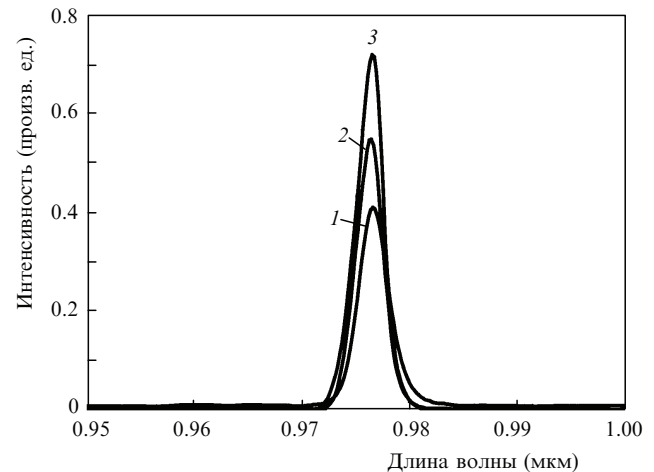


Рис.3. Спектры излучения лазерного диода с длиной резонатора 1 мм при токах накачки 10 (1), 20 (2) и 30 А (3). Температура теплоотвода 300 К.

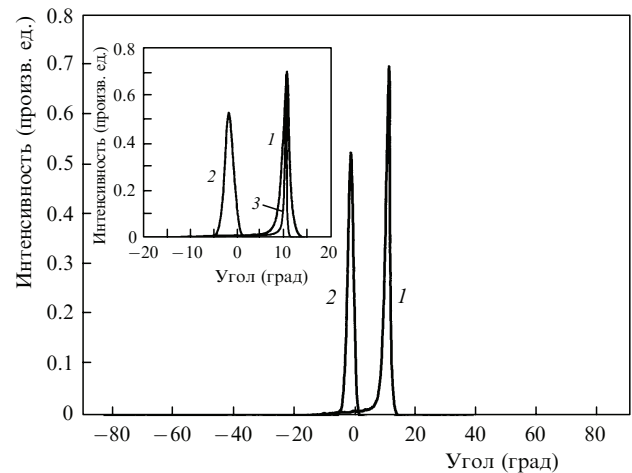


Рис.4. Диаграммы направленности излучения лазерного диода в плоскости, перпендикулярной плоскости p–n-перехода (1), и в плоскости p–n-перехода (2). Длина резонатора 1 мм, температура теплоотвода 25 °С, ток накачки 7 А. На вставке – те же кривые при большем угловом масштабе (3 – расчетная диаграмма направленности излучения в плоскости, перпендикулярной плоскости p–n-перехода).

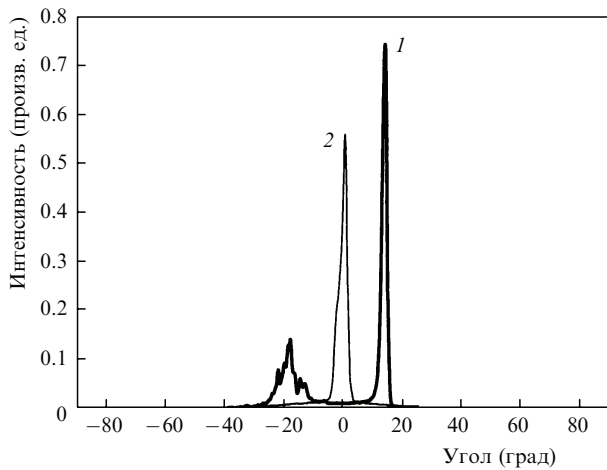


Рис.5. Диаграммы направленности излучения лазерного диода в плоскости, перпендикулярной плоскости p-n-перехода (1), и в плоскости p-n-перехода (2). Длина резонатора 2 мм, температура тепловода 25 °С. Ток накачки 26 А.

вид с отклонением от нормали в сторону подложки на 10°. Ширина диаграммы направленности на полувысоте составила 1–2°. Сравнение мощности излучения с большой расходимостью, выходящего из волноводного слоя, и излучения с узкой диаграммой направленности, выходящего через подложку, показало, что доля мощности излучения в узком угловом интервале составляет 84%. При увеличении длины лазерного диода до 2 мм в угловой диаграмме появляется дополнительный пик, обусловленный отражением излучения от верхней шероховатой границы подложки (рис.5), что отрицательно сказывается на качестве выходящего излучения. Следует отметить, что появление дополнительного пика регламентируется также толщиной подложки, которая в нашем случае составила 160 мкм.

На рис.6 (кривая 1) приведена зависимость энергии импульса излучения лазерного диода с выходом излучения через подложку и длиной резонатора 0.8 мм от тока при длительности импульса тока накачки 5 мкс. Для сравнения здесь же (кривая 2) показана та же зависимость для лазерного диода с длиной резонатора 1 мм без выхода излучения через подложку (активная область лазера содержала шесть КЯ, его структура аналогична структуре исследованных лазеров и отличалась лишь наличием широкого ограничивающего слоя InGaP, отделяющего волновод от подложки). Нанесение отражающих и просветляющих покрытий на грани лазера с выходом излучения через подложку позволило получить энергию излучения 170 мкДж (кривая 3, рис.6) при накачке одиночным импульсом тока с амплитудой 88 А и длительностью 5 мкс. Как видно из рис.4 и 6, использование в

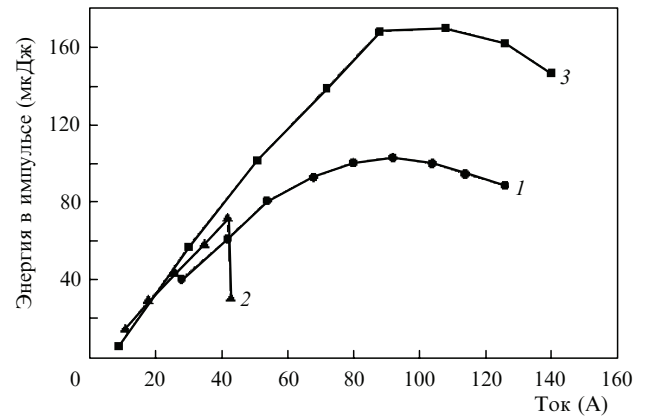


Рис.6. Зависимости энергии импульса излучения от тока накачки при длительности импульса тока 5 мкс для лазерного диода с выходом излучения через подложку без нанесенных отражающих и просветляющих покрытий (1) и с нанесенными покрытиями (3), а также для лазерного диода без вывода излучения через подложку (2) с длинами резонаторов 0.8 и 1 мм соответственно.

лазере вывода излучения через подложку существенно снижает плотность электромагнитного поля на зеркалах, что позволяет при большем токе получить существенно большую энергию излучения по сравнению с традиционными диодными лазерами. Кроме того, благодаря свертнутой диаграмме направленности существенно улучшается качество выходящего излучения.

Работа была выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 10-02-00371, 09-02-97025 р\_поволжье\_a, 09-02-90479-Укр\_ф\_a, 10-02-00501), программ РАН «Современные проблемы радиофизики» и «Физические и технологические исследования полупроводниковых лазеров, направленные на достижение предельных параметров», а также федеральной программы «Кадры».

1. Геловани В.А., Скороходов А.П., Швейкин В.И. *Высокомощные диодные лазеры нового типа* (М.: Эдиториал УРСС, 2005).
2. Слипченко С.О., Соколова З.Н., Пихтин Н.А., Борщев К.С., Винокуров Д.А., Тарасов И.С. *ФТП*, **40** (8), 1017 (2006).
3. Зверков М.В., Коняев В.П., Кричевский В.В., Ладугин М.А., Мармалюк А.А., Падалица А.А., Симаков В.А., Сухарев А.В. *Квантовая электроника*, **38** (11), 989 (2008).
4. Винокуров Д.А., Коняев В.П., Ладугин М.А., Лютецкий А.В., Мармалюк А.А., Падалица А.А., Петрунов А.Н., Пихтин Н.А., Симаков В.А., Слипченко С.О., Сухарев А.В., Фетисова Н.В., Шамахов В.В., Тарасов И.С. *ФТП*, **44** (2), 251 (2010).
5. Давыдова Е.И., Зверков М.В., Коняев В.П., Кричевский В.В., Ладугин М.А., Мармалюк А.А., Падалица А.А., Симаков В.А., Сухарев А.В., Успенский М.Б. *Квантовая электроника*, **39** (8), 723 (2009).
6. Звонков Н.Б., Звонков Б.Н., Ершов А.В., Ускова Е.А., Максимов Г.А. *Квантовая электроника*, **25** (7), 622 (1998).