

# ЛАЗЕРНЫЕ ДИОДЫ ДЛЯ ФОТОДИНАМИЧЕСКОЙ ТЕРАПИИ

Л. Воробьев, А. Софронов, Д. Фирсов,  
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет;  
Д. Демидов, Р. Леус, М. Свердлов, А. Тер-Мартirosян,  
ЗАО "Полупроводниковые приборы"

**Разработаны новые высокоэффективные полупроводниковые лазеры с выходной оптической мощностью более 1 Вт для лечения онкологических заболеваний методом фотодинамической терапии. Источники работают на длине волны 665 нм, соответствующей пику поглощения фотосенсибилизатора.**

**М**ощные полупроводниковые лазерные диоды широко используются в разных областях науки, техники, медицины. В последние годы лазерные диоды находят новые применения в современных медицинских технологиях. ЗАО "Полупроводниковые приборы" разработало новые высокоэффективные полупроводниковые лазеры с выходной оптической мощностью более 1 Вт для лечения онкологических заболеваний методом фотодинамической терапии (рис.1). При использовании этого метода опухолевая ткань подвергается одновременному воздействию фотосенсибилизатора и излучения мощного полупроводникового лазера с длиной волны генерации, совпадающей с пиком спектра поглощения фотосенсибилизатора. Один из наиболее эффективных фотосенсибилизаторов – это фотосенсибилизатор на основе водорастворимой формы хлорина  $E_6$  с пиком поглощения в области длины волны 665 нм. Облучение опухолевых тканей, в которых избирательно накапливается фотосенсибилизатор, лазерным излучением в этой спектральной области приводит с вероятностью 89% к регрессу злокачественных образований.

Настоящая работа посвящена результатам разработки полупроводникового лазера для лечения онкологических заболеваний методом

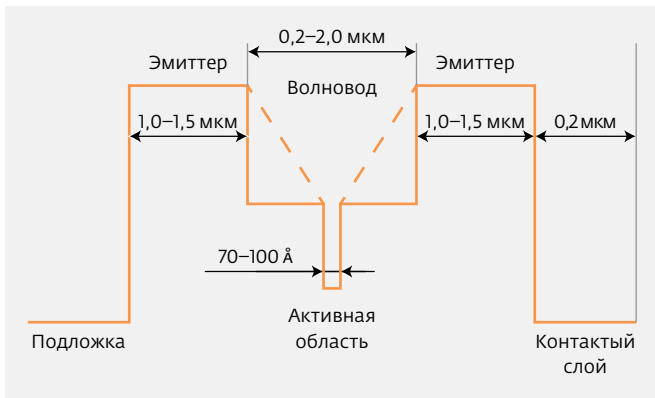
фотодинамической терапии. Прибор обладает следующими характеристиками: длина волны излучения в максимуме спектра  $665 \pm 5$  нм, ширина линии менее 3 нм, мощность излучения более 1 Вт, непрерывный режим работы при комнатной температуре, узкая диаграмма направленности для эффективного ввода излучения в световод или фокусировки излучения, срок службы более 5000 часов, высокий КПД и слабая зависимость параметров от температуры. Лазерные диоды изготавливаются на основе фосфорсодержащих двойных наногетероструктур с отдельным электронным и оптическим ограничением и со встроенной в центре структуры квантовой ямой GaInP шириной 70–100 Å (рис.2).

Предлагаемая схема позволяет варьировать длину волны излучения как благодаря изменению состава  $x$  твердого раствора  $In_{1-x}Ga_xP$ , так и благодаря изменению ширины квантовой ямы  $L_{QW}$ . Известно, что это приводит к изменению энергетических уровней размерного квантования электронов  $E_{el}$  и дырок  $E_{hh1}$ . Напомним, что энергия кванта излучения  $h\nu_{(x, L_{QW})} = E_g(x) + E_{el}(L_{QW}) + E_{hh1}(L_{QW})$ .

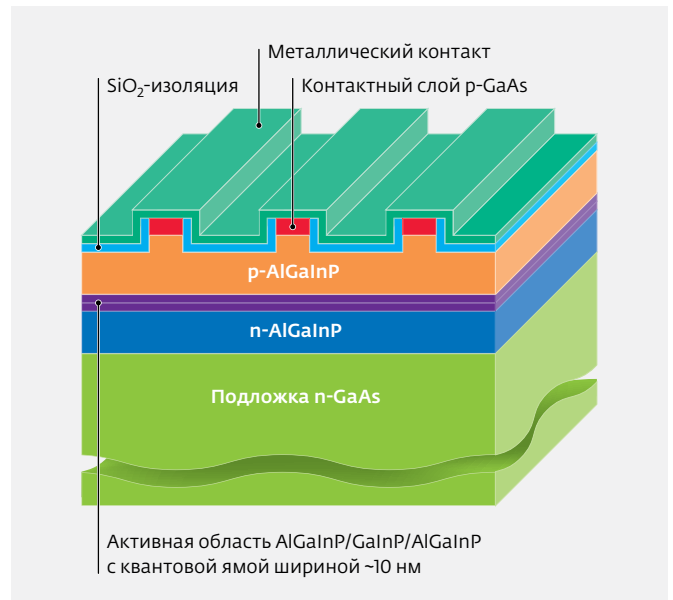
Структура выращивалась методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подложке GaAs. Более детальное описание аналогичных по дизайну



**Рис.1.** Новые высокоэффективные полупроводниковые лазеры для лечения онкологических заболеваний методом фотодинамической терапии



**Рис.2.** Зонная диаграмма двойных наногетероструктур с квантовой ямой для лазерных диодов на длину волны генерации 665 нм



**Рис.3.** Конструкция лазерного диода со связанными полосковыми излучателями типа "мелкая меза с дополнительной изоляцией"

структур и условий их выращивания дано в работе [1]. Такая конструкция обладает рядом преимуществ по сравнению с конструкцией, имеющей широкий полосковый контакт. В лазерных диодах с широким полосковым контактом могут образовываться так называемые "филаменты" [2], связанные с различного типа неоднородностями. В результате в процессе стимулированного излучения может случиться резкое изменение условий генерации и переключение областей генерации, что приведет к низкочастотным осцилляциям интенсивности излучения, профиля излучения в ближнем и дальнем поле. Описанное явление ухудшает пространственно-временную стабильность излучения. Предлагаемая конструкция лазерного диода (рис.3) улучшает характеристики лазера. Вместо обычного широкого полоскового контакта предложена конструкция типа "мелкая меза с дополнительной изоляцией" с более узким полосковым контактом. Контактную область со стороны p-слоя можно рассматривать как систему связанных полосковых излучателей с коэффициентом связи, который может регулироваться изменением глубины травления мезы. Травление структуры до нужной глубины осуществлялось с помощью ионного травления пучком ионов аргона с энергией до 1000 эВ через маску фоторезиста. Многослойное покрытие задней грани обеспечивало коэффициент отражения более 95%, передняя грань лазерного

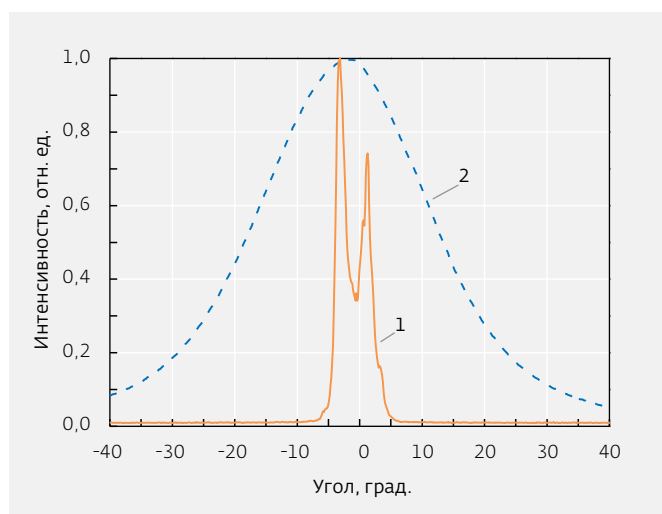
диода просветлялась так, что коэффициент отражения был равен 10%. В предложенной конструкции формируются стабильные во времени каналы протекания тока, что позволяет получить пространственно-временную стабильность характеристик излучения лазерного диода.

Распределение интенсивности в дальнем поле в плоскости, перпендикулярной плоскости p-n-перехода, представляет собой гладкую кривую с угловой полушириной примерно 32°,



ЗАО "Полупроводниковые приборы" было основано в декабре 1991 года. Основными направлениями деятельности фирмы являются разработка новых полупроводниковых технологий, модернизация технологического оборудования, а также производство мощных полупроводниковых лазерных диодов и приборов на их основе. Большинство сотрудников – высококвалифицированные специалисты в области физики твердого тела, физики полупроводников и полупроводниковых технологий, имеющие многолетний опыт научной работы в учреждениях РАН.

в то время как в плоскости р-п-перехода полуширина диаграммы направленности составляет примерно  $6^\circ$  (рис.4). Типичный спектр стимулированного излучения лазерного диода показан на



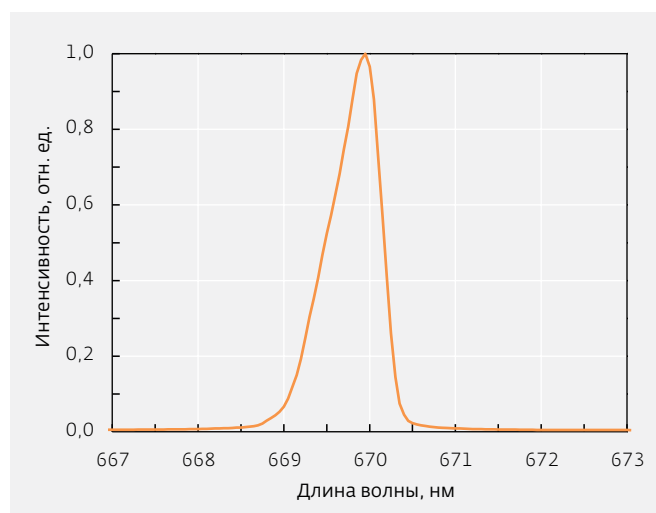
**Рис.4.** Распределение интенсивности излучения лазера в дальнем поле в плоскостях, параллельных (линия 1) и перпендикулярных (линия 2) плоскости р-п-перехода (температура  $T=20^\circ\text{C}$ )

рис.5. Как видно, полуширина линии излучения не превышает значения 1 нм. Пороговый ток для лазерного диода составляет 1,3 А и 2 А при  $20^\circ\text{C}$  и  $50^\circ\text{C}$  соответственно, а плотность порогового тока 244 и 375 А/см<sup>2</sup> для двух указанных температур. Характеристическая температура, определяющая рост порогового тока с ростом температуры, равна  $T_0=70^\circ\text{C}$ . Мощность излучения в 1 Вт достигается при токе 2,5 А (рис.6).

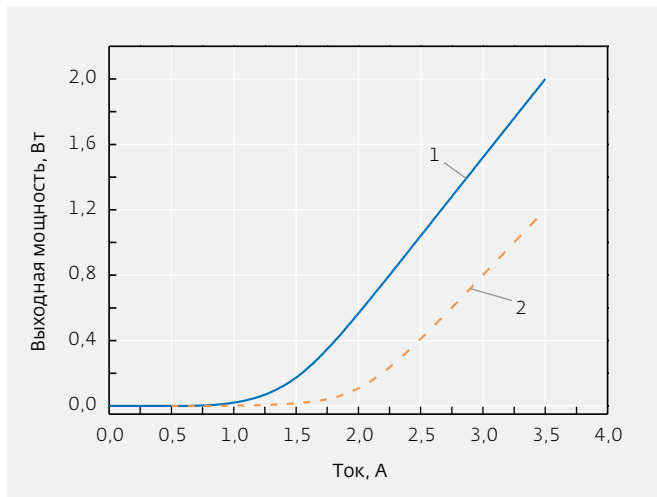
Изучение шумовых характеристик лазерных диодов с системой полосковых излучателей позволило найти, что в диапазоне частот 30 Гц – 30 МГц оптические шумы, связанные с указанными выше осцилляциями, не превышают 0,5%. В то же время шумы для лазеров с широким полосковым контактом значительно больше и достигают значений 5-10%.

Благодаря фиксации каналов протекания тока и отсутствию флуктуаций распределение оптической мощности по зеркалу является более однородным, чем в случае лазера с широким полосковым контактом, что увеличивает срок службы лазерных диодов. Было изучено изменение оптической мощности лазерного диода от времени в интервале до 1000 часов при плотности оптической мощности 10 мВт на 1 мкм ширины излучающей площадки при рабочей температуре  $20^\circ\text{C}$  (рис.7). Анализ данных показал, что ожидаемый срок службы лазерных диодов составляет более 10000 часов.

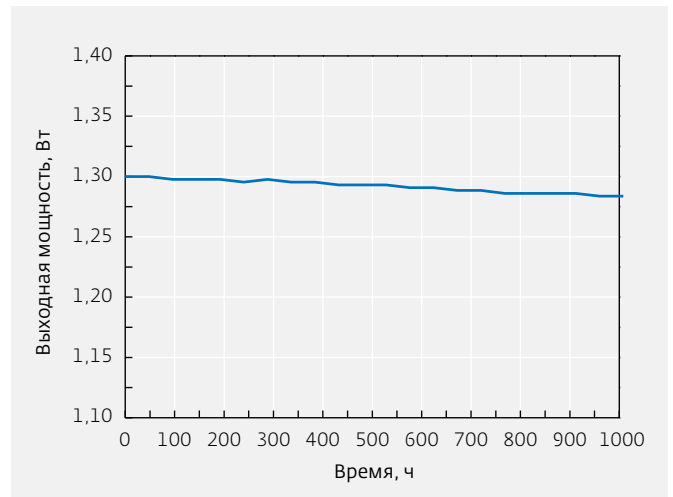
На основе лазерных диодов с системой связанных полосковых излучателей были также разработаны лазерные системы, включающие лазерный диод с микролинзой, фотодиод обратной связи, радиатор воздушного охлаждения, набор фокусирующей оптики, программируемый драйвер на основе микропроцессора.



**Рис.5.** Спектр излучения лазерного диода ( $T=20^\circ\text{C}$ )



**Рис.6.** Зависимость мощности излучения лазерного диода от тока при температурах 20 °С (линия 1) и 50 °С (линия 2)



**Рис.7.** Зависимость выходной оптической мощности от времени наработки лазерного диода; ток лазера 2,77 А, время деградации 1000 ч, падение мощности 1,3 %

Таким образом, лазерные диоды с системой полосковых излучателей, разработанные авторами, по своим характеристикам выгодно отличаются от лазерных диодов с широким полосковым контактом. Они имеют высокую температурную и пространственно-временную стабильность излучения в ближнем и дальнем полях, большой срок службы, меньший уровень шумов. Эти лазерные диоды удовлетворяют требованиям, предъявляемым к источникам излучения для фотодинамической терапии с использованием фотосенсибилизатора второго поколения.

Данная работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации в рамках реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства (договор №13. G25.31.0055 с Министерством образования и науки Российской Федерации) [3].

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Карпов, С.Ю.** Линейки мощных полупроводниковых лазеров, изготовленных методом молекулярно-пучковой эпитаксии/ Карпов С.Ю., де ла Круз Г., Мячин В.Е. и др. - Письма в ЖТФ, 1991,

т.17, № 7, с. 31.

2. **Chow W.W.** Filamentation in conventional double heterostructure and quantum well semiconductor lasers / W.W. Chow, D. Depatie. - IEEE J. Quantum Electron., 1988, v.24, iss.7, p.1297 .
3. **Воробьев Л., Софронов А., Фирсов Д. и др.** Лазерные диоды для фотодинамической терапии. - Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки, 2011, №2, с. 80.