

УДК 539.23, 537.311.322, 535.343.2, 615.47-114:616-07-08

*Л.Е. Воробьев, А.Н. Софронов, Д.А. Фирсов,
Д.М. Демидов, Р.В. Леус, М.А. Свердлов,
А.Л. Тер-Мартirosян*

ЛАЗЕРНЫЕ ДИОДЫ ДЛЯ ФОТОДИНАМИЧЕСКОЙ ТЕРАПИИ

Мощные полупроводниковые лазерные диоды все более широко используются в разных областях науки, техники, медицины. В последние годы они находят применение в медицинских технологиях, в частности для лечения онкологических заболеваний методом фотодинамической терапии. В этом случае используется фотосенсибилизатор и мощный (более 1 Вт) лазерный диод, настроенный по длине волны излучения на пик спектра поглощения фотосенсибилизатора. Одним из наиболее эффективных является фотосенсибилизатор на основе водорастворимой формы хлорина E_6 с пиком поглощения в области длины волны 665 нм. Облучение фотосенсибилизатора лазером в этой спектральной области приводит с вероятностью 89 % к регрессу злокачественных новообразований. При этом лазерный диод должен обладать следующими характеристиками:

длина волны излучения в максимуме спектра — примерно 665 ± 5 нм;

ширина линии — менее 3 нм;

мощность излучения — более 1 Вт;

непрерывный режим работы при комнатной температуре;

приемлемая диаграмма направленности в случае ввода излучения в световод или фокусировки излучения;

срок службы — более 1000 часов;

желательны также высокий КПД и слабая зависимость параметров от температуры.

В настоящей работе сообщается о разработке такого лазерного диода. Такое устройство изготавливается 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. 1). Предлагаемая схема позволяет варьировать длину волны излучения как благодаря изменению состава х-твердого раствора $In_{1-x}Ga_xP$, так и благодаря изменению ширины квантовой ямы L_{QW} и, следовательно, изменению энергетических уровней размерного квантования электронов E_{e1} и дырок E_{hh1} . Напомним, что энергия кванта излучения

$$h\nu(x, L_{QW}) = E_g(x) + E_{e1}(L_{QW}) + E_{hh1}(L_{QW}).$$

Структура выращивалась методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подложке арсенида галлия GaAs. Более детальное описание аналогичных по зонной диаграмме структур и условий их выращивания дано в работе [1].

Конструкция лазерного диода схематично показана на рис. 2; она имеет преимущества по сравнению с конструкцией, имеющей широкий полосковый контакт. В указанном аналоге возможно образование так называемых «филаментов» [2], связанных с различного типа неоднородностями. Как результат в процессе стимулированного излучения возможно резкое изменение условий генерации и переключение ее областей, что приводит к низкочастотным осцилляциям интенсивности излучения, профиля излучения в ближнем и дальнем полях. Описанное явление ухудшает пространственно-временную стабильность излучения. Предлагаемая конструкция лазерного диода (см. рис. 2) улучшает характеристики лазера. Вместо обычного широко-

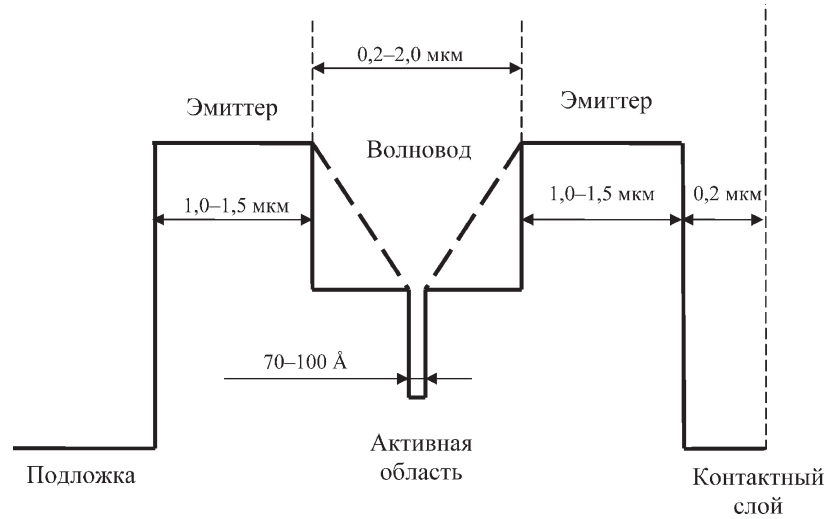


Рис. 1. Зонная диаграмма двойных наногетероструктур с квантовой ямой для лазерных диодов на длину волны генерации 665 нм

го 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 пучка ионов аргона с энергией до 1 кэВ 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°, в то время как в плоскости этого перехода полуширина диаграммы направленности составляет примерно 6° (рис. 3).

Типичный спектр стимулированного излучения лазерного диода показан на рис. 4. Видно, что полуширина линии излучения не превышает значения 1 нм.

Зависимость мощности излучения от тока показана на рис. 5. Пороговые токи для лазер-

ного диода составляют 1,3 и 2,0 А при 20 и 50 °С соответственно, а плотности пороговых токов — 244 и 375 А/см² для двух указанных температур. Характеристическая температура T_0 , определяющая рост порогового тока $j_{\text{пор}}$ с ростом температуры

$$j_{\text{пор}} \propto \exp(T/T_0),$$

равна 70 °С. Мощность излучения в 1 Вт достигается при токе 2,5 А (см. рис. 5).

Изучение шумовых характеристик лазерных диодов с системой полосковых излучателей

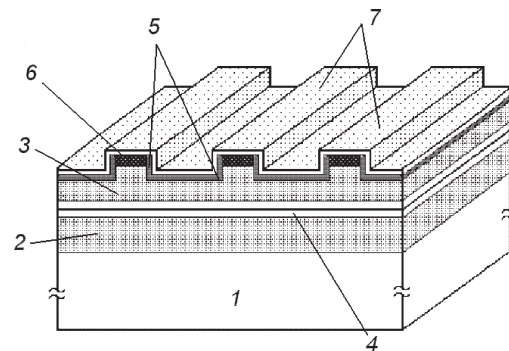


Рис. 2. Конструкция лазерного диода со связанными полосковыми излучателями типа «мелкая меза с дополнительной изоляцией»:

1 — подложка *n*-GaAs; 2,3 — *n*-AlGaInP и *p*-AlGaInP соответственно; 4 — активная область AlGaInP/GaInP/AlGaInP с квантовой ямой шириной ~ 10 нм; 5 — SiO₂ изоляция; 6 — контактный слой *p*-GaAs; 7 — металлический контакт

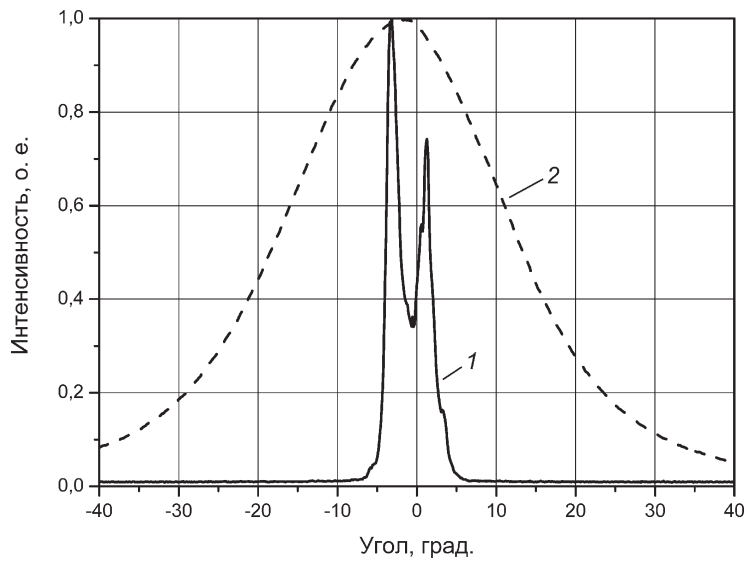


Рис. 3. Распределение интенсивности излучения лазера в дальнем поле в плоскостях, параллельных (1) и перпендикулярных (2) плоскости $p-n$ -перехода. Температура $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$

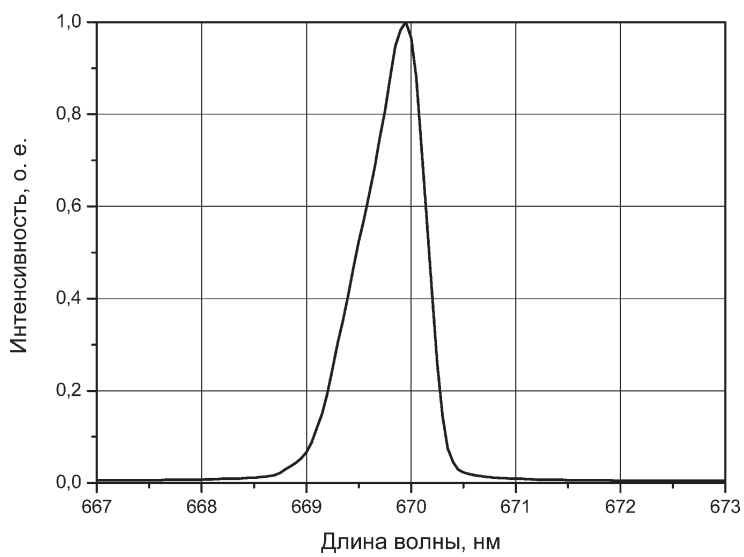


Рис. 4. Спектр излучения лазерного диода; $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$

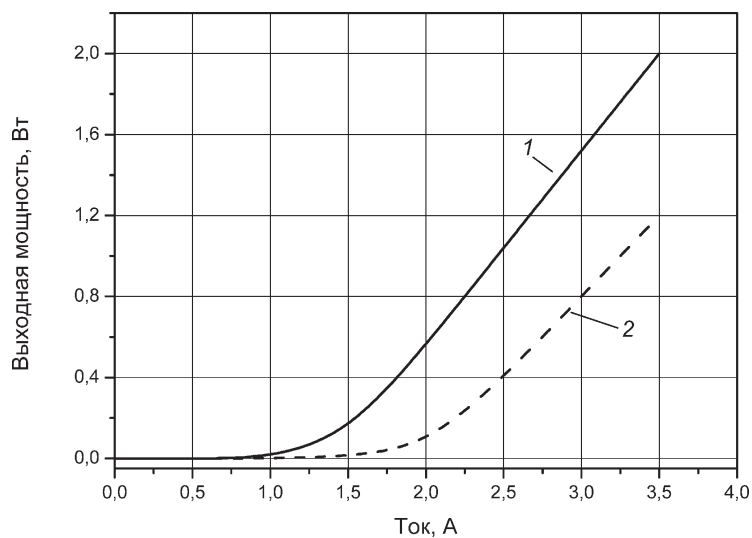


Рис. 5. Зависимость мощности излучения лазерного диода от тока при температурах 20 °С (1) и 50 °С (2)

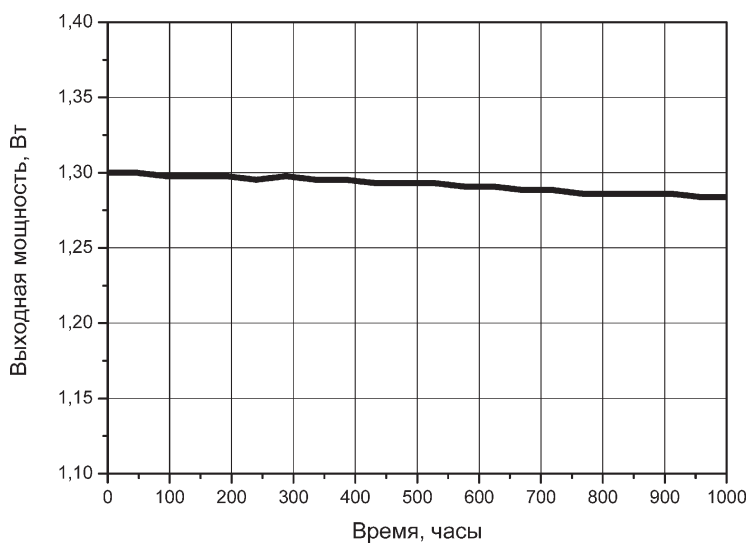


Рис. 6. Зависимость выходной оптической мощности от времени наработки лазерного диода; ток лазера 2,77 А, время деградации 1000 ч, падение мощности 1,3 %

позволило установить, 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 °С (рис. 6). 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.

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

Настоящая 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).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Карпов, С.Ю.** Линейки мощных полупроводниковых лазеров, изготовленных методом молекулярно-пучковой эпитаксии [Текст] / С.Ю. Карпов, Г. де ла Круз, В.Е. Мячин [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 [Text]/ W.W. Chow, D. Depatie // IEEE J. Quantum Electron.— 1988.— Vol. 24— Iss. 7.— P. 1297–1301.