

# Особенности спектров генерации и тепловое сопротивление непрерывных лазерных диодов с длиной волны излучения 976 нм и мощностью до 15 Вт

В.В.Безотосный, О.Н.Крохин, В.А.Олещенко, В.Ф.Певцов, Ю.М.Попов, Е.А.Чешев

*Исследованы спектральные характеристики излучения непрерывных лазерных диодов, собранных на теплоотводящих элементах типа F-маунт, с ресурсной мощностью 15 Вт. Обнаружены особенности огибающей спектра при мощности излучения, превышающей 5–7 Вт. Обсуждается метод определения максимума огибающей спектра в условиях его уширения и появления особенностей на контуре огибающей. Экспериментально определено тепловое сопротивление диодов в диапазоне токов накачки от порогового до максимального, равного 14 А, которое составило 2.25 К/Вт при токе 10 А и 1.5 К/Вт при токе 4 А. Проведено сравнение полученных результатов с литературными данными. Приведены соображения, касающиеся адекватности применения параметра «тепловое сопротивление» для сравнения и оценки тепловых характеристик лазерных диодов.*

**Ключевые слова:** мощные лазерные диоды, КПД, ресурсная мощность, тепловое сопротивление.

## 1. Введение

В настоящее время одной из наиболее актуальных задач лазерных технологий является переход к прямому использованию излучения мощных лазерных диодов при обработке материалов. Для её решения требуется существенно увеличить их выходную мощность и яркость. Такие работы, в частности, успешно проводятся в рамках проекта BRIDLE [1].

Основным фактором, ограничивающим мощность лазерных диодов, по-прежнему является тепловая проблема. Для повышения яркости, кроме того, необходимо решить проблемы оптической стойкости и долговечности зеркал резонаторов при экстремальных оптических нагрузках и многомодового режима генерации. В целом технологии получения высококачественных зеркальных сколов уже разработаны. Все основные операции, включая скрайбирование и разлом гетероструктуры, пассивацию полученной ювенильной поверхности сколотых граней кристалла и их защиту с помощью диэлектрических покрытий, проводятся в условиях высокого вакуума в одной вакуумной системе. Параметры получаемых зеркал находятся на пределе технологических возможностей, поэтому требуются новые подходы к решению указанных задач. Одним из вариантов может быть разработка гетероструктур с экстремально широким волноводом, позволяющим снизить плотность оптической мощности на выходном зеркале лазерного резонатора, однако значительное увеличение толщины волноводного слоя со-

пряжено с увеличением последовательного электрического сопротивления структуры и повышением теплового сопротивления, что в целом может привести к снижению полного КПД и обострению тепловой проблемы при высоких мощностях накачки.

В нашей последней работе [2] сообщалось о повышении от 10 до 15 Вт ресурсной выходной мощности лазера с полосковым контактом шириной 95 мкм, излучающего на  $\lambda = 976$  нм, при переходе к монтажу лазерного кристалла на медный теплоотводящий элемент типа F-маунт вместо элемента типа C-маунт. Ценность найденного результата заключается также в том, что мы не применяли дорогостоящих алмазных либо композитных (на основе алмаза) сабмаунтов, поэтому себестоимость изделия осталась невысокой. Для сравнения полученных нами результатов по повышению эффективности отвода тепла с результатами других авторов необходимо использовать общепринятые критерии и параметры оценки. Таким параметром является тепловое сопротивление диодов, измерению которого и посвящена настоящая работа.

## 2. Выходная мощность, КПД и спектры излучения лазерных диодов

Ватт-амперная характеристика и полный КПД изготовленного нами образца в непрерывном режиме приведены на рис.1. Измерения проводились при температуре монтажной поверхности базовой медной теплоотводящей пластины 20 °С. Указанная температура поддерживалась с помощью термоэлектрического охладителя. Полученные основные параметры были следующими: пороговый ток ~0.9 А, ватт-амперная характеристика близка к линейной, её средняя крутизна 1.11 Вт/А в диапазоне токов 1–14 А, максимальный КПД (при токе накачки ~5 А) 72%, мощность излучения 15 Вт при токе ~14 А.

Спектры излучения таких лазеров, как показал анализ доступных нам публикаций, изучены недостаточно, вместе с тем они представляют значительный интерес для ряда практических применений, включая накачку лазер-

В.В.Безотосный, О.Н.Крохин, Ю.М.Попов, Е.А.Чешев. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Россия, 115409 Москва, Каширское ш., 31; e-mail victorbe@sci.lebedev.ru  
В.А.Олещенко, В.Ф.Певцов. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53

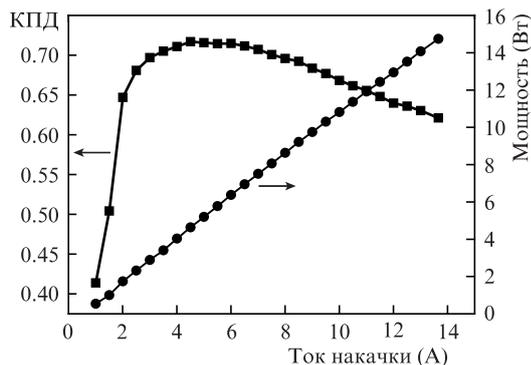


Рис.1. Ватт-амперная характеристика и полный КПД лазерного диода ( $\lambda = 976$  нм) в непрерывном режиме при температуре  $20^\circ\text{C}$ .

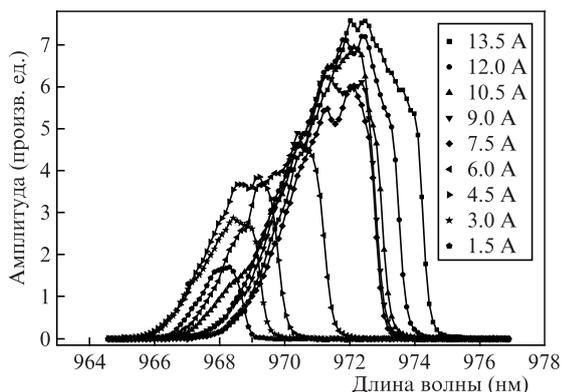


Рис.2. Спектры излучения лазерного диода при различных токах накачки.

ных активных сред. Огибающие спектров излучения в стационарном непрерывном режиме приведены на рис.2. Отчётливо видно, что при токах накачки свыше 5 А на коротковолновом крыле формируются особенности, которые по мере увеличения тока принимают вид локальных максимумов. Поскольку при определении теплового сопротивления используются спектральные измерения, а положение максимума спектра весьма существенно для получения верных значений, мы вынуждены поднять эту тему.

### 3. Тепловое сопротивление: определения и методика измерений

Использование параметра «тепловое сопротивление» является общепринятым для оценки тепловых характеристик электронных приборов. Этот параметр с соответствующей поправкой в его определении широко применяется также при анализе тепловых характеристик мощных лазерных диодов.

По определению для лазерного диода тепловое сопротивление  $R_{\text{therm}} = \Delta T / P_{\text{therm}}$ , где  $\Delta T$  – приращение температуры диода в результате вложения полной электрической мощности  $P = P_{\text{therm}} + P_{\text{opt}}$ ;  $P_{\text{therm}}$  – тепловая нагрузка;  $P_{\text{opt}}$  – мощность когерентного оптического излучения. Лазер преобразует вложенную мощность  $P = IU$  ( $I$  – ток,  $U$  – напряжение) пропорционально полному КПД  $\eta_{\text{tot}}$  в когерентное оптическое излучение:  $P_{\text{opt}} = P\eta_{\text{tot}}$ , т.е. тепловая нагрузка  $P_{\text{therm}} = P(1 - \eta_{\text{tot}})$ . В частности, такое определение в явном виде использовано в работе [3].

Для определения температуры активного слоя в лазерной гетероструктуре используются спектральные измерения и известная для данного состава и толщины ак-

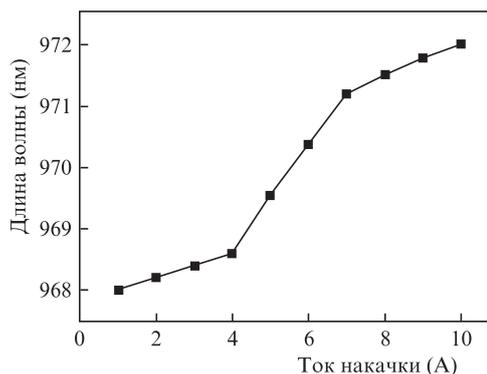


Рис.3. Зависимость длины волны максимума огибающей спектра излучения лазерного диода от тока накачки.

тивного слоя зависимость длины волны максимума спектра излучения от температуры. Для лазерных диодов, излучающих в спектральном диапазоне 970–980 нм,  $\Delta\lambda/\Delta T = 0.3 - 0.33$  нм/К, при расчёте мы использовали минимальное значение (0.3 нм/К).

Очевидно, что появление особенностей в спектрах излучения, представленных на рис.2 в виде локальных максимумов, а также существенное уширение огибающей спектра осложняют задачу определения положения максимума и, соответственно, вычисления теплового сопротивления. Более того, если вычислять тепловое сопротивление для каждого значения тока накачки, то в определённых диапазонах тока мы наблюдали изменения интенсивности в локальных максимумах на огибающей, когда преобладающим становился коротковолновый максимум. Если в данном случае «доверить» обработку спектра стандартной компьютерной программе, то это приведёт к парадоксальным результатам, включая получение отрицательных значений теплового сопротивления для отдельных диапазонов тока накачки. Мы полагаем, что при существенном уширении огибающей спектра и появлении указанных особенностей более адекватной является следующая методика. Стандартным программным методом определяется ширина спектра на полувысоте, и за положение максимума принимается середина полученного отрезка на шкале длин волн.

Зависимость от тока накачки длины волны максимума огибающей, полученная при использовании такого подхода, показана на рис.3. Характерной особенностью этой зависимости является возможность её достаточно точной аппроксимации тремя линейными участками с разным наклоном в диапазонах тока накачки 1–4 А, 4–7 А и 7–10 А.

### 4. Результаты измерений, сравнение с опубликованными данными

Значения теплового сопротивления при различных токах накачки приведены на рис.4. Для правильной интерпретации данных требуются некоторые пояснения. При определении теплового сопротивления для каждого значения тока накачки величины  $\Delta T$  и  $\Delta P_{\text{therm}}$  вычислялись как разности их значений при указанном токе и в начальной точке при токе накачки 1 А. Кривая  $I$ , назовём её «идеальной», получена в предположении, что длина волны максимума спектра изменяется линейно с ростом тока накачки. Указанная зависимость является обратно пропорциональной в соответствии с определением теплово-

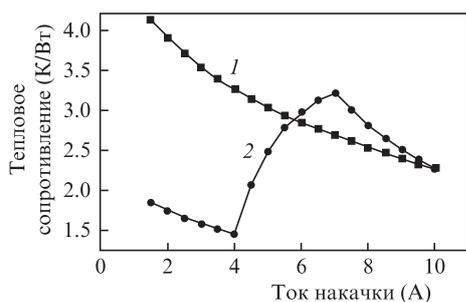


Рис.4. Зависимости теплового сопротивления лазерного диода от тока накачки: рассчитанная в предположении линейной зависимости длины волны максимума огибающей спектра от тока накачки (1) и полученная по экспериментальным значениям длины волны максимума огибающей спектра (2).

го сопротивления, т. к. числитель зависит от тока линейно, а в знаменателе первое слагаемое растёт квадратично с ростом тока накачки.

Кривая 2 построена с использованием реальной экспериментальной зависимости длины волны максимума спектра от тока накачки, приведенной на рис.3. Три линейных участка этой зависимости определяют наличие трех участков зависимости 2 на рис.4, а также качественно коррелируют с зависимостью полного КПД на рис.1. Действительно, на первом участке КПД растёт, соответственно тепловое сопротивление немного уменьшается, поскольку в общем тепловом балансе увеличивается доля излучаемой энергии. Между первым и вторым участками наблюдается минимум теплового сопротивления. На втором участке происходит медленное снижение КПД после прохождения им максимума, доля тепловой нагрузки растёт, соответственно растёт тепловое сопротивление. На третьем участке экспериментальная кривая 2 приближается к идеальной кривой, что свидетельствует о достаточной адекватности предложенного метода определения положения максимума огибающей спектра. В работе [4] приведены результаты измерений теплового сопротивления для излучающего на  $\lambda = 980$  нм лазерного диода с длиной резонатора 4 мм и шириной полоскового контакта 95 мкм. При использовании сабмаунта на основе композита медь–алмаз тепловое сопротивление составило 2 К/Вт, при монтаже указанной конструкции на микроканальные охладители тепловое сопротивление снизилось до рекордно низкого значения (1.5 К/Вт), что, по всей видимости, является пределом при существующих технологиях охлаждения и применяемых материалах сабмаунтов и теплоотводящих элементов. В работе [3] для С-маунтов и F-маунтов найдены значения теплового сопротивления 4.25 и 2.97 К/Вт соответственно.

Полученные нами результаты при монтаже лазерных кристаллов непосредственно на медные теплоотводящие элементы дают  $R_{\text{therm}} \approx 2.25$  К/Вт при токе накачки 10 А, что незначительно уступает рекордным значениям [4], достигнутым с использованием композита медь–алмаз, и существенно превышает значение, найденное в [3]. Отметим, что вблизи максимума КПД при токе накачки около 4 А измеренное сопротивление  $R_{\text{therm}}$  составляет около 1.5 К/Вт, что равно рекордным значениям, приведённым в [4]. Считаем, что адекватное сравнение тепловых сопротивлений должно проводиться при одинаковом токе накачки. Полагаем также, что полученные результаты свидетельствуют о высоком качестве монтажа и высокой эф-

фективности теплопередачи, обеспечиваемыми разработанной нами технологией.

## 5. Заключение

Наиболее важный вывод работы очевиден – использование параметра «тепловое сопротивление» и анализ тепловых характеристик лазерных диодов на его основе допустимы. Однако такой подход, очевидно, нельзя считать строгим, поскольку даже в рассмотренном идеальном случае тепловое сопротивление по определению зависит от выбранной для измерений рабочей точки по току накачки. Зависимость теплового сопротивления от тока накачки является обратно пропорциональной: чем больше ток и, соответственно, чем больше выходная мощность, тем меньше значения теплового сопротивления будут получены даже в идеальном случае линейной зависимости длины волны максимума огибающей спектра от тока накачки. Вследствие этого очевидного факта необходимо проявлять осторожность при сравнении результатов, полученных различными группами исследователей при различных мощностях накачки, а также при использовании различных материалов в качестве теплоотводящих элементов и различных схем охлаждения лазерных диодов. Наши эксперименты показывают, что при измерениях теплового сопротивления большую роль играет тип применяемой системы охлаждения, в качестве которой могут использоваться радиаторы с кондуктивным отводом тепла, радиаторы с принудительным воздушным охлаждением, системы жидкостного охлаждения – чиллеры, а также термоэлектрические охладители, тепловые трубки, тепловые камеры и др. Важную роль при измерениях играет расположение термодатчика относительно корпуса лазерного диода и относительно самого лазерного кристалла, а также рабочие параметры электронной системы термостабилизации.

Уширение спектров и появление особенностей на огибающей спектра при высоких мощностях накачки (начиная от 5–6-кратного и до 15-кратного превышения пороговой мощности генерации) ещё более осложняют адекватное определение положения максимума огибающей спектра и вычисление теплового сопротивления. Нами предложен простой и логичный метод определения длины волны максимума спектра и теплового сопротивления.

В случае использования такого подхода, при высоких мощностях накачки (при 15-кратном превышении пороговой мощности генерации), экспериментальная зависимость теплового сопротивления от тока накачки практически совпадает с идеальной, рассчитанной для линейной зависимости длины волны максимума огибающей спектра от тока накачки.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ (соглашение № 14.575.21.0047, уникальный идентификатор прикладных научных исследований (проекта) RFMEFI57514X0047).

1. Cruimp P., Decker J., Winterfeldt M., Fricke J., Maassdorf A., Erbert G., Trankle G. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **9348**, 93480D (2015).
2. Безотосный В.В., Крохин О.Н., Олещенко В.А., Певцов В.Ф., Попов Ю.М., Чешев Е.А. *Квантовая электроника*, **45** (12), 1088 (2015).
3. Xiaoning Li, Yanxin Zhang, Jingwei Wang, Lingling Xiong, Pu Zhang, Zhiqiang Nie, Zhenfu Wang, Hui Liu. *IEEE Trans. Compon., Packag. Manuf. Technol.*, **2** (10), 1592 (2012).
4. Crump P., Wenzel H., Erbert G., Trankle G. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **8241**, 824120U (2012).