

Анализ тепловых режимов мощных полупроводниковых лазеров и наборных решеток

Г.Т.Микаелян

Представлены результаты теплофизических исследований полупроводниковых лазеров, на основе которых определяются оптимальные требования к материалам, конструктивным параметрам и режимам технологического процесса монтажа мощных полупроводниковых лазеров, линеек и двумерных матриц с целью достижения наилучшего отвода тепла. Приведены методики расчета механических напряжений, остающихся после сборки, и определения условий монтажа, при которых возникающие напряжения незначительны и их влияние на качество лазеров минимально. Также приведены методы расчетов тепловых сопротивлений для различных теплоотводов, в том числе радиаторов с принудительным охлаждением, и определения конструктивных требований к теплоотводу, обусловленных заданными условиями эксплуатации.

Ключевые слова: лазерный диод, механическое напряжение, предел прочности, припой, радиатор, теплоотвод.

1. Введение

Несмотря на достаточно высокий коэффициент преобразования электрической энергии в световую (более 50%), серьезной проблемой в технологии изготовления полупроводниковых лазеров остается создание условий обеспечения эффективного отвода тепла из активной области лазерного кристалла. Тепловая энергия в кристалле выделяется вследствие безызлучательной рекомбинации инжектированных в активную область носителей, их термализации и поглощения излучения в пассивных областях кристалла, а также за счет джоулевых потерь при протекании тока накачки по объему полупроводника и токоподводящим контактам [1, 2].

В реальных полупроводниковых лазерах КПД составляет около 50 % – 60 %, поэтому примерно 40 % – 50 % подводимой к полупроводниковому кристаллу электрической энергии тем или иным способом превращается в тепловую энергию, в результате чего происходит разогрев активной области лазерного кристалла. Повышение температуры активного слоя в свою очередь приводит к снижению внутренней квантовой эффективности, уменьшению усиления, повышению порогового тока, снижению мощности излучения и сдвигу длины волны. Кроме того, с повышением рабочей температуры активной области лазерного кристалла снижаются надежность и долговечность лазера.

Характеристическим параметром для теплоотвода заданной конструкции с установленным на него лазерным кристаллом является тепловое сопротивление R_T . Величина, обратная тепловому сопротивлению R_T , характеризует тепловую проводимость конструкции лазер-

ного диода, т.е. прохождение тепловой энергии от активной области лазерного кристалла к окружающей среде.

При рассмотрении отвода тепла из лазерного кристалла в окружающую среду учитываются особенности задачи, состоящие в том, что область, в которой выделяется достаточно большая тепловая энергия, мала по сравнению с теплоотводящими элементами. Поэтому при разработке технологических процессов изготовления полупроводниковых лазеров необходимо учитывать требования, предъявляемые к материалам, форме, размерам и состоянию поверхностей теплоотводов.

Необходимо также обеспечить выбор надежных и долговечных материалов припоев, подходящих для монтажа лазерного кристалла на теплоотвод, материалов для омических контактов кристалла, способов, режимов и условий монтажа и др. Технологический режим монтажа кристалла на теплоотвод должен отвечать условиям, при которых механические напряжения либо не возникают, либо они минимизированы. Решение указанных задач требует проведения как теоретических расчетов, так и глубоких экспериментально-технологических исследований с учетом имеющихся на сегодняшний день обширных данных, накопленных при промышленном выпуске полупроводниковых лазеров различными предприятиями.

В работах [3, 4] рассматривались температурные эффекты в полупроводниковых лазерных кристаллах для различных материалов гетероструктур. В них приведен расчет распределения температуры в каждом слое гетероструктуры. Распределения температуры в поперечном сечении кристалла рассчитывались как в плоскости p–n-перехода, так и в перпендикулярном направлении. В [5, 6] приводится сложное аналитическое выражение для распределения температуры в теплоотводе. Однако в указанных работах не принималось во внимание влияние на тепловые свойства лазеров слоев между кристаллом и теплоотводом – припоев и покрытий. Учет последних в аналитическом выражении в трехмерной задаче растекания тепла весьма затруднителен. Кроме того, по мето-

Г.Т.Микаелян. ФГУП «Научно-производственное предприятие "Инжект"», Россия, 410052 Саратов, просп. 50 лет Октября, 101; e-mail: inject@overta.ru

Поступила в редакцию 6 октября 2005 г., после доработки – 27 декабря 2005 г.

дикое, приведенной в указанных работах, невозможно точно рассчитать сложные теплоотводы, такие, например, как радиаторы с принудительным охлаждением, теплоотводы типа C-mount и др.

В настоящей работе приводится методика расчета, основанная на точных численных методах решения задач теплопроводности, ламинарного движения жидкости, механического согласования материалов без ограничений, обусловленных конструктивными особенностями теплоотводов и присоединительных материалов. Рассматриваются кондуктивный и конвективный (с вынужденным охлаждением) способы теплосъема.

2. Методика проектирования теплоотводов с учетом требований к лазерным диодам

Наиболее известной и широко распространенной конструкцией полупроводникового лазерного диода является металлический (очень часто медный) теплоотвод с припаянным к одной из его поверхностей лазерным кристаллом. Кроме функции передачи тепла из лазерного кристалла в окружающую среду теплоотвод выполняет также функцию токоподводящего контакта. Второй токоподводящий контакт к лазерному кристаллу представляет собой проволочный вывод, также припаянный или приваренный к обеспечивающей омический контакт металлизированной грани кристалла. Особенность данной конструкции заключается в том, что выделение тепла характеризуется большой плотностью в маленьком объеме.

Поскольку размеры самого лазерного кристалла и очень часто площади области выделения тепла в кристалле достаточно малы ($(10 - 100) \times 1000$ мкм) и не позволяют обеспечивать эффективную передачу тепла в окружающую среду, то металлический теплоотвод должен выполнять функцию «расширителя» тепловой поверхности, контактирующей с окружающей средой.

Решение теплофизической задачи в данном случае для каждой конкретной конструкции полупроводникового лазера задает определенные конструктивные и технологические требования к материалам, форме, размерам и состоянию поверхностей теплоотводов. Кроме того, в зависимости от конкретной задачи, обусловленной количеством выделяемого тепла, определяется способ отвода тепла – конвективный (с использованием теплоносителя), кондуктивный или смешанный. Определяются также необходимые свойства теплоносителей в случае активного конвективного охлаждения.

В основе решения данной задачи для теплоотводов разных конструкций лежит численное решение уравнения теплопроводности

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla(k\nabla T) = Q, \quad (1)$$

где ρ – плотность, C – теплоемкость и k – теплопроводность материалов; Q – плотность выделяемой тепловой энергии.

Граничные условия для каждого конкретного случая применения и заданной конструкции теплоотвода выбираются в соответствии с требованиями, вытекающими из способов передачи тепла в окружающую среду.

В случае кондуктивного теплообмена с окружающей средой рассматриваются граничные условия первого и

второго рода. При необходимости поддержания постоянной температуры на одной из граней теплоотвода (T_b) рассматривается граничное условие первого рода: $T_b = \text{const}$. При известном распределении на границе плотности теплового потока можно рассматривать граничное условие второго рода. В других случаях, когда охлаждение задается за счет конвекции, используется граничное условие третьего рода:

$$-k\nabla T = g,$$

где $g = \alpha_t(T_w - T_{\text{liq}})$ – тепловой поток на границе; α_t – коэффициент теплопередачи [7].

Для теплоотводов с принудительным охлаждением жидкостным теплоносителем скорость движения u в микроканале определяется решением уравнения Навье–Стокса для несжимаемой жидкости [7, 8]:

$$\tilde{\rho} \frac{du}{dt} = \eta \nabla^2 u - \nabla P, \quad (2)$$

где η – динамическая вязкость жидкости; P – перепад давлений на входе и выходе микроканала; $\tilde{\rho}$ – плотность теплоносителя.

Учет переноса тепла жидкостью конвективным – кондуктивным способом осуществляется решением совместно с уравнением (2) уравнения баланса тепловой энергии [7, 8]

$$k\nabla^2 T = \tilde{\rho} \tilde{C}(\mathbf{u}\nabla)T, \quad (3)$$

где \tilde{C} – теплоемкость жидкости.

Граничные условия для этих уравнений выбираются следующим образом. Микроканал движения теплоносителя считается симметричным относительно центральной оси (или плоскости), а зависимость скорости движения на входе этого микроканала от поперечной координаты y – параболической:

$$u = u_0 \frac{y}{d_m} \left(1 - \frac{y}{d_m}\right),$$

где d_m – ширина микроканала; $u_0 = \text{const}$.

На входе микроканала задается также постоянное значение температуры теплоносителя: $T = T_{\text{in}}$. Условие смачивания (прилипания) на стенках канала записывается как $\mathbf{u} = 0$. Через эти стенки происходит передача тепловой энергии из материала теплоотвода за счет теплопроводности. На выходе канала используются граничные условия беспрепятственного движения жидкости и считается, что конвективный теплообмен значительно больше кондуктивного:

$$P = 0, \quad \mathbf{u} \mathbf{t} = 0, \quad \mathbf{n}\nabla T = 0,$$

где \mathbf{n} и \mathbf{t} – нормальный и тангенциальный по отношению к плоскости сечения на выходе микроканала единичные векторы.

Решения уравнений (2) и (3) с указанными граничными условиями позволяют определить коэффициент теплосъема на границах микроканала при заданных параметрах теплоносителя. Далее, подставив найденные значения коэффициента теплосъема в граничные условия, при решении задачи теплопроводности (1) определяют тепловые характеристики теплоотводов заданной

конструкции в каждом конкретном случае применения лазеров.

Одним из наиболее распространенных материалов для теплоотводов полупроводниковых лазеров является медь. Выбор этого материала связан, в первую очередь, с ее доступностью и высоким (по сравнению с другими материалами) коэффициентом теплопроводности $\kappa \sim 400 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$ [9, 10]. Однако медь имеет больший, чем полупроводники, коэффициент теплового расширения (КТР) $\alpha \sim 16 \times 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ (для полупроводников α составляет $(5 - 7) \times 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ [9]). Различие в значениях КТР является существенным с точки зрения возникновения механических напряжений в лазерном кристалле и в присоединительных припоях после монтажа.

Решение задачи механического согласования полупроводниковых лазерных кристаллов с металлическими теплоотводами позволяет определять требования к технологическим процессам и материалам, а также к конкретной конструкции лазерного диода.

Соотношение между тензором напряжений и тензором деформаций с учетом тепловых эффектов имеет следующий вид [11, 12]:

$$\sigma_{ij} = \frac{E}{1+\nu} \left(\varepsilon_{ij} + \frac{\nu}{1-2\nu} \delta_{ij} \delta_{ik} \right) - \frac{E\alpha\Delta T}{3(1-\nu)} \delta_{ij}, \quad (4)$$

где

$$\sigma_{ij} = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} \end{pmatrix}$$

– компоненты тензора напряжений на плоскости;

$$\varepsilon_{ij} = \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_{yy} \end{pmatrix}$$

– компоненты тензора деформаций, связанные для двумерного случая с компонентами вектора смещения u_x, u_y соотношениями

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial u_x}{\partial x}, \quad \varepsilon_{yy} = \frac{\partial u_y}{\partial y}, \quad \varepsilon_{xy} = \varepsilon_{yx} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right)$$

$$(\varepsilon_{ii} = \varepsilon_{xx} \text{ при } i = j = 1; \varepsilon_{ii} = \varepsilon_{yy} \text{ при } i = j = 2);$$

E – модуль Юнга; ν – коэффициент Пуассона; $\Delta T = T_{\text{melt}} - T$; δ_{ij} – символ Кронекера.

Уравнение равновесия с учетом напряжений за счет тепловых эффектов имеет вид [11, 12]

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_i} - \frac{E}{3(1-2\nu)} \frac{\partial(\alpha\Delta T)}{\partial x_i} = 0. \quad (5)$$

Решениями уравнений (4) и (5) совместно с условием совместимости деформаций (условие Сен-Венана) [12]

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_{ij}}{\partial x_i^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_{ji}}{\partial x_j^2} = \frac{\partial^2 \varepsilon_{ij}}{\partial x_i \partial x_j}$$

и условием отсутствия внешних нагрузок полностью задаются значения напряжений и деформаций в окрестности каждой точки в поперечном сечении конструкции лазера (кристалл, припой, теплоотвод).

Таким образом, для известных параметров материалов и заданной конструкции лазера можно рассчитать возникающие при его охлаждении (после присоединения кристалла к теплоотводу) напряжения и деформации.

Это позволяет выбрать для монтажа лазерного кристалла на теплоотвод оптимальные припои, которые будут минимизировать остаточные механические напряжения как в кристалле, так и в месте соединения кристалла с теплоотводом. От состояния этого «межсоединения», изменения его свойств при эксплуатации и хранении зависят как основные эксплуатационные параметры полупроводниковых лазеров, так и их надежность и долговечность.

Исследования механических и теплофизических свойств конструкции лазерного кристалла, его омических контактов, присоединительных припоев и теплоотвода позволяют определить требования к технологии изготовления лазерных диодов заданной конструкции в зависимости от условий их применения.

3. Требования к теплоотводу и припоям

Несмотря на заметное различие между КТР меди и полупроводникового лазерного кристалла в настоящий момент наиболее часто используются медные теплоотводы. В этом случае в качестве припоя применяются так называемые мягкие припои (In, PbSn, SnAg и др.), которые позволяют минимизировать сжатие кристалла после пайки при снижении температуры до комнатной и ниже, если это требуется по условиям применения. Рассмотрим наиболее распространенный вариант лазерного диода – лазерный кристалл, припаянный с помощью индия к медному теплоотводу. Для выработки требований к размерам теплоотвода, материалу покрытий и толщине припоя необходимо решить трехмерную задачу теплопроводности, учитывая конкретные требования к лазерному диоду (в том числе к конструкции лазерного кристалла), вытекающие из условий его применения. Для начала рассмотрим в качестве теплоотвода медный параллелепипед с размерами $s \times d \times h = 3 \times 3 \times 2 \text{ мм}$, на который припаян одиночный лазерный кристалл ($500 \times 600 \times 100 \text{ мкм}$) с размерами активной области $W \times L = 10 \times 600 \text{ мкм}$, обращенной к теплоотводу. На рис.1–3 показаны конструкции теплоотводов одиночных лазерных

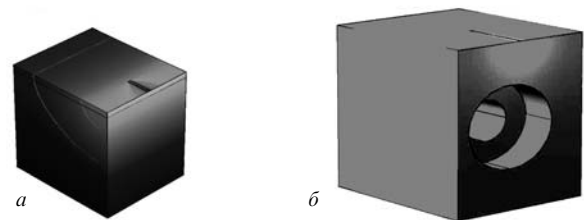


Рис.1. Образцы теплоотводов для одиночных лазерных кристаллов с шириной полоскового контакта менее 50 мкм (а) и с шириной активной области 100 мкм и более (б).

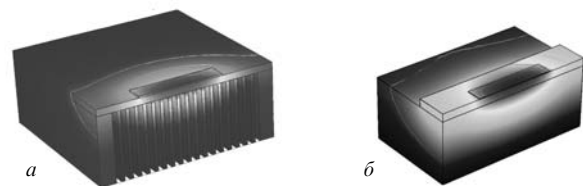


Рис.2. Конструкции теплоотводов для монтажа непрерывных лазерных линеек – ребристый теплоотвод для конвективного охлаждения (а) и теплоотвод для кондуктивной передачи тепла на более массивный теплоотвод (б). Качественно показаны области распределения теплового потока.

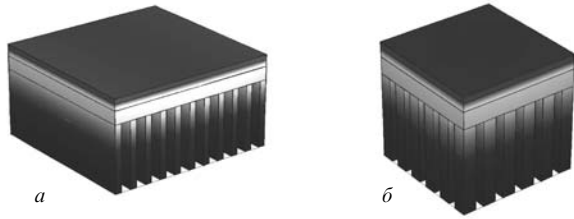


Рис.3. Радиаторы двумерных матриц с вынужденным охлаждением – ребристый (а) и игольчатый (б). Качественно показана область распределения тепла по толщине ребер.

кристаллов, мощных полупроводниковых лазеров, лазерных линеек и матриц лазерных диодов, в том числе и для случая с принудительным охлаждением.

Результаты численного решения уравнения теплопроводности (1) с соответствующими граничными условиями для различных размеров прямоугольного медного теплоотвода приведены на рис.4.

Для полоскового лазера с шириной контакта $W \approx 10$ мкм температурный перепад происходит в малом объеме теплоотвода, находящемся ближе к кристаллу. Требование к расширению теплового поля по объему теплоотвода приводит к увеличению его размеров, а следовательно, и к увеличению теплового сопротивления.

В зависимости от конкретного применения теплоотводящей поверхностью может служить одна или несколько граней контактной пластины. Очень часто в этом качестве используется грань, противоположная присоединенной к лазерному кристаллу, либо перпендикулярная этой грани поверхность теплоотвода.

На рис.4 приведены значения теплового сопротивления прямоугольного теплоотвода полоскового ($W = 10$ мкм) лазера в случае отвода тепла в окружающую среду с заданной температурой через противоположную к монтажной грани поверхность теплоотвода. Результаты рас-

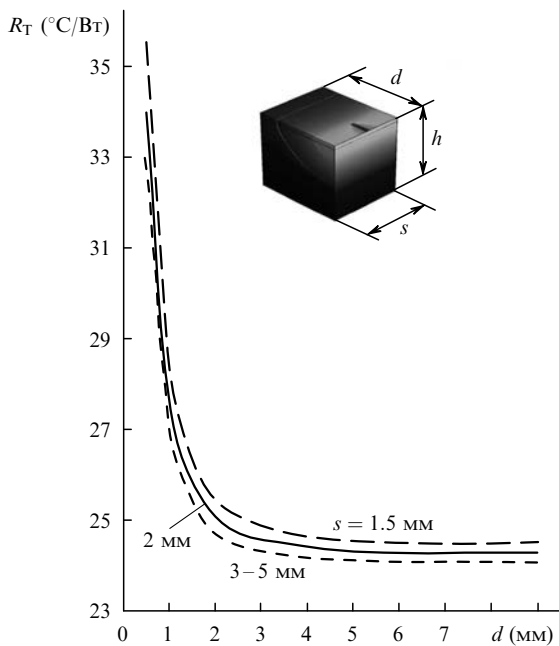


Рис.4. Зависимости теплового сопротивления контактной пластины с In-припоем толщиной 3 мкм от толщины d контактной пластины при $h = 3$ мм и различных значениях s . Ширина полоскового контакта $W = 10$ мкм, теплосъем осуществляется с нижней поверхности теплоотвода, длина лазерного кристалла $l_0 = 600$ мкм.

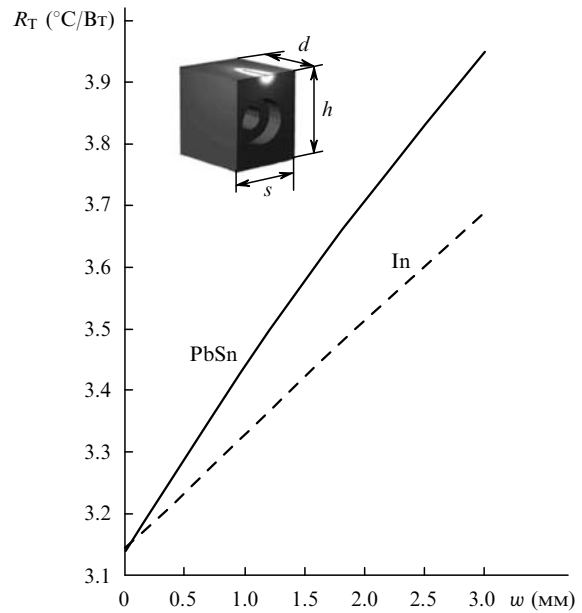


Рис.5. Зависимости теплового сопротивления стандартной контактной пластины типа C-mount с припоем от толщины припоя w при $l_0 = 1$ мм, $W = 100$ мкм. Теплосъем осуществляется с задней поверхности контактной пластины.

четов теплового сопротивления, определяющегося теплоотводом и припоем, для мощных однокристалльных полупроводниковых лазеров с широкими полосковыми контактами ($W = 100$ мкм), смонтированных на стандартном теплоотводе типа C-mount (см. рис.1,б), приведены на рис.5. Показаны зависимости теплового сопротивления от толщины припоя при использовании In и PbSn (ПОС-61). Для однокристалльных лазеров рассматриваемая тепловая задача является трехмерной.

Задача становится двумерной в случае лазерных линеек длиной 5 или 10 мм (см. рис.2). Если же ширина теплоотвода больше длины лазерной линейки, то условие для крайних кристаллов становится более благоприятным из-за трехмерного распространения тепла в теплоотводе. Что же касается кристаллов, расположенных в середине линейки, то тепло от них уходит по двум направлениям (вниз и назад).

На рис.6 представлены распределения температуры по высоте H теплоотводов различных конструкций для лазерных линеек и двумерных матриц. Кривая 1 отно-

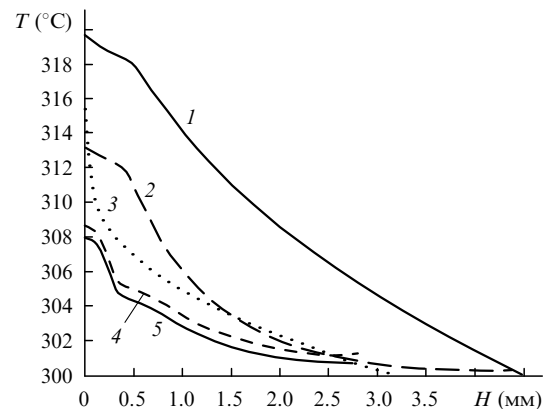


Рис.6. Распределения температуры по высоте теплоотводов различных конструкций для лазерных линеек и двумерных матриц (см. текст).

сится к работающей в непрерывном режиме лазерной линейке, смонтированной на алмазном теплоотводе, в случае кондуктивного (см. рис.2,а) теплообмена с окружающей средой. Противоположная линейке грань имеет температуру 300 К. Кривая 2 демонстрирует распределение температуры по высоте ребра для медного теплоотвода с микроканальным ребристым радиатором в случае водяного охлаждения, а кривая 3 – распределение температуры по высоте теплоотвода для линейки лазерных диодов с полосковым контактом шириной 10 мкм и с шагом 250 мкм.

По кривым 4 и 5 можно проследить распределение температуры по высоте ребра медного ребристого теплоотвода для двумерных лазерных матриц, где основой, на которой смонтированы лазерные линейки, служит прямоугольная диэлектрическая пластина с теплопроводностью $250 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$.

Используя результаты, представленные на рис.6, или аналогичные расчеты для других конструкций теплоотводов, можно для каждого конкретного случая определить оптимальную высоту теплоотвода или ребра при конвективном теплообмене, обеспечивающую минимальное или приемлемое тепловое сопротивление.

4. Расчет параметров технологического режима монтажа лазерных кристаллов на теплоотвод

Использование мягких припоев (In, PbSn, SnAg и др.) накладывает определенные требования на технологический режим монтажа. Нахождение температурно-временных режимов процесса монтажа в каждой конкретной конструкции лазера является ключевым технологическим фактором, влияющим как на параметры, так и на надежность лазера. Напряжения, возникающие при монтаже из-за несогласованных КТР теплоотвода и лазерного кристалла, являются определяющими факторами, влияющими на надежность и долговечность полупроводникового лазера. Выбор режимов монтажа, минимизирующих остаточные напряжения при использовании мягких припоев, можно осуществить, рассчитав напряжения и времена их релаксации в используемых припоях. Для этого воспользуемся решениями уравнений (4), (5) для заданных размеров и материалов теплоотвода, кристалла и припоя.

Рассматривая процесс охлаждения теплоотвода с установленным кристаллом после отвердевания припоя, можно определить необходимую скорость снижения температуры от температуры плавления до комнатной. Условием выбора служит отсутствие напряжений, превышающих разрывные напряжения в материале припоя.

Величины напряжения σ , приложенного к одной из поверхностей припоя, находящегося между кристаллом и теплоотводом, и разности скоростей сдвига двух противоположных поверхностей этого материала связаны соотношением [11, 13]

$$\sigma = \eta \frac{v_2 - v_1}{w}, \quad (6)$$

где η – вязкость вещества; w – толщина припоя; v_1 и v_2 – скорости сдвига поверхностей припоя, присоединенных к кристаллу и теплоотводу соответственно.

Для упрощения расчетов одну из этих поверхностей (припой – кристалл) будем считать неподвижной ($v_1 = 0$).

Тогда $\Delta v = v_2 \equiv v$. При этом скорость сдвига поверхности относительно теплоотвода $v = \Delta l / \Delta t$, где

$$\Delta l = \Delta \alpha \Delta T l_0 \quad (7)$$

– разность длин теплоотвода и кристалла, уменьшившихся при снижении температуры от температуры плавления припоя до комнатной (ΔT); l_0 – линейный размер кристалла; Δt – время, за которое происходит это уменьшение; $\Delta \alpha$ – разность КТР материалов теплоотвода и кристалла.

Теперь выражение (6) примет следующий вид:

$$\sigma = \eta \frac{\Delta l}{w \Delta t}. \quad (8)$$

Используя (7) и (8), можно определить время релаксации, за которое под действием напряжения $\sigma(\Delta T)$ происходит относительный сдвиг противоположных поверхностей припоя (пластическая деформация):

$$\Delta t_{\text{rel}} = \frac{\eta l_0 \Delta \alpha \Delta T}{w \sigma(\Delta T)}. \quad (9)$$

Для скорости изменения температуры из (7) и (8) имеем

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{w \sigma}{\eta l_0 \Delta \alpha}. \quad (10)$$

В этом выражении все величины, кроме σ , для заданной конструкции лазера известны. Неизвестные напряжения σ , возникающие в материале припоя при уменьшении температуры на определенную величину, для заданных размеров и материалов лазерного кристалла, теплоотвода и припоя рассчитываются с помощью уравнений (4) и (5).

В процессе монтажа лазерного кристалла нельзя допускать возникновения в припое напряжений, превышающих разрывное напряжение σ_{fs} для данного материала, т.е. σ_{max} должно быть меньше σ_{fs} . Учитывая это, с помощью (10) получим условие для скорости спада температуры

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} < \frac{w \sigma_{\text{fs}}}{\eta l_0 \Delta \alpha}. \quad (11)$$

Другими словами, время спада Δt_{tech} температуры на заданную величину $\Delta \bar{T}$ должно быть больше времени релаксации напряжений Δt_{rel} , возникающих при уменьшении температуры на $\Delta \bar{T}$: $\Delta t_{\text{tech}} > \Delta t_{\text{rel}}$.

Результаты проведенных с помощью уравнений (4), (5) численных расчетов напряжений в In-припое для лазерного кристалла длиной $l_0 = 1$ мм, припаянного к медному теплоотводу, представлены на рис.7 и 8. В случае охлаждения на 130° , что соответствует снижению температуры от температуры плавления In (156°C) до комнатной, возникающее напряжение составляет $(2.5 - 5) \times 10^7$ Па (рис.7). Разрывное напряжение для этого припоя равно 6×10^6 Па [14]. Если не допустить релаксации напряжений, возникающих в процессе охлаждения после пайки кристалла, то в припое появятся разрывные участки, пустоты и микротрещины. Это ухудшит как тепловые характеристики межсоединения, так и его механические свойства. Из рис.7 видно, что напряжения на краях кри-

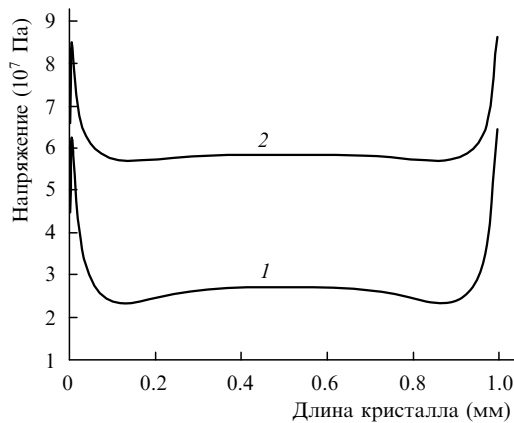


Рис.7. Распределение напряжений в центральной плоскости внутри припоя толщиной 3 мкм по длине лазерного кристалла ($l_0 = 1$ мм), припаянного к медному теплоотводу с помощью индия (1) и PbSn (2), при уменьшении температуры на 130°C – от температуры плавления припоя до комнатной.

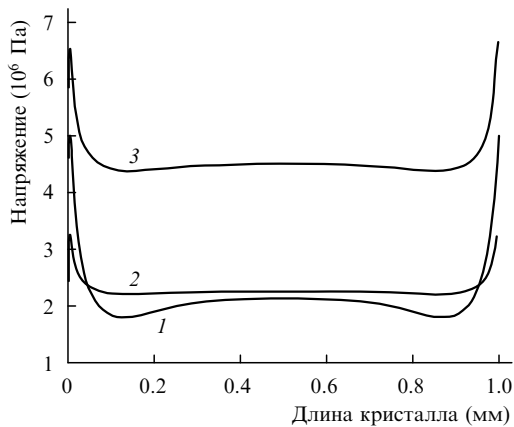


Рис.8. Распределение напряжений в центральной плоскости внутри припоя толщиной 3 мкм по длине лазерного кристалла ($l_0 = 1$ мм), припаянного к медному теплоотводу с помощью индия (при уменьшении температуры на $\Delta T = 10^\circ\text{C}$ (1)) и PbSn (при $\Delta T = 5^\circ\text{C}$ (2) и 10°C (3)).

сталла в 1.5–2 раза превышают напряжения в его центре. Поэтому при сравнении напряжений с разрывным напряжением σ_{fs} следует использовать напряжения на краях кристалла.

При разработке технологического процесса необходимо задавать такие скорости спада температуры, при которых в материале припоя успевают происходить релаксационные процессы. Так, например, для In-припоя толщиной 3 мкм при снижении температуры на 10°C (от температуры отверждения) возникающие напряжения составляют $(2 - 4) \times 10^6$ Па (кривая 1 рис.8); эти значения меньше, чем σ_{fs} для индия. Если этот спад осуществляется за время, превышающее время релаксации данного напряжения, то возникновения микротрещин, разрывов и пустот в материале припоя можно избежать. Например, для In-припоя время релаксации, рассчитанное по указанной методике, при изменении температуры

на 10°C составляет примерно 10 с. В данном случае в технологическом процессе монтажа установка должна быть запрограммирована таким образом, чтобы снижение температуры на каждый градус происходило более чем за одну секунду.

Аналогичные расчеты для PbSn-припоя с $w = 3$ мкм дают необходимую скорость спада температуры менее $0.8^\circ\text{C}/\text{с}$. Распределение напряжений по длине лазерного кристалла в центральной плоскости внутри этого припоя, соединяющего лазерный кристалл с медным теплоотводом, показано на рис.7 (кривая 2) и рис.8 (кривые 2 и 3).

5. Заключение

Численное решение уравнения теплопроводности с заданными граничными условиями для каждого конкретного случая позволило рассчитать тепловые сопротивления для различных конструкций теплоотводов – мощных диодных лазеров, лазерных линеек и двумерных матриц лазерных диодов, в том числе в случае принудительного охлаждения. Эта методика дает возможность определять оптимальные размеры теплоотводов, отвечающих заданным условиям применения, как при кондуктивном, так и при конвективном теплопереносе.

Результаты данной работы, основанные на численном решении системы определяющих уравнений структурной механики с учетом тепловых эффектов, позволяют находить параметры технологического режима монтажа для каждой конкретной конструкции лазерного кристалла и теплоотвода, а также для различных припоев. Данная методика дает возможность также определять условия, при которых минимизированы механические напряжения, возникающие при монтаже. Например, при использовании In-припоя для монтажа кристалла из GaAs на медный теплоотвод скорость спада температуры должна быть меньше, чем $1^\circ\text{C}/\text{с}$. При использовании PbSn-припоя скорость спада температуры не должна превышать $0.8^\circ\text{C}/\text{с}$.

1. Кейси Х.С., Паниш М.Б. *Лазеры на гетероструктурах. Том 1* (М.: Мир, 1981).
2. Mrozwiewich B., Bugajcky M., Nakwaski W. *Physics of Semiconductor Lasers* (Warszawa: Polish Scientific Publishers, 1991).
3. Nakwaski W. *IEE Proc. Pt. 1. Sol. State and Electron-Devices*, **131**, 94 (1984).
4. Nakwaski W. *IEE Proc. Pt. J. Optoelectronics*, **134**, 87 (1987).
5. Nakwaski W. *Electron. Lett.*, **22**, 1169 (1986).
6. Nakwaski W. *Electron. Lett.*, **23**, 458 (1987).
7. Юдаев Б.Н. *Теплопередача* (М.: Высшая школа, 1973).
8. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. *Гидродинамика* (М.: Наука, 1988).
9. Кикоин И.К. *Таблицы физических величин. Справочник* (М.: Атомиздат, 1976).
10. Бобышев А.В. *Механические и технологические свойства материалов* (М.: Металлургия, 1987).
11. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. *Теория упругости* (М.: Наука, 1987).
12. Новиков И.И., Ермишкин В.И. *Физическая механика реальных материалов* (М.: Наука, 2004).
13. Илюшин А. А. *Механика сплошных сред* (М.: изд-во МГУ, 1978).
14. Федоров П.И., Акчурин Р.Ч. *Индий* (М.: Наука, 2000).