

# Модификация структуры металлических пленок излучением твердотельного лазера с диодной накачкой для повышения выходных параметров мощных лазерных диодов

В.В.Безотосный, В.Ю.Бондарев, В.И.Коваленко, О.Н.Крохин,  
В.Ф.Певцов, Ю.М.Попов, В.Н.Токарев, Е.А.Чешев

*Для повышения выходных параметров мощных лазерных диодов металлические пленки теплоотводящих элементов, нанесенные методом магнетронного напыления, были модифицированы излучением импульсного твердотельного Nd: YAG-лазера с диодной накачкой.*

**Ключевые слова:** мощный лазерный диод, монтаж лазерного кристалла, лазерная очистка, модификация металлических пленок.

## 1. Актуальность задачи

Комплекс технологических процессов монтажа полупроводниковых кристаллов на теплоотводящие элементы корпуса является одним из важнейших этапов в полном технологическом цикле изготовления, испытания и сертификации готовых приборов, поскольку эти операции должны обеспечить надежность и длительный срок службы лазерных кристаллов при экстремальных условиях работы. Высокое качество и долговременная стабильность соединения лазерного кристалла с теплоотводящим элементом, обеспечивающие однородность электрического и теплового контактов, являются ключевыми факторами, которые способствуют достижению надежности и большого срока службы мощных излучателей на основе лазерных диодов.

## 2. Выбор метода металлизации

Наиболее качественные металлические пленки полупроводникового кристалла и теплоотводящего элемента могут быть получены методом вакуумного напыления. В качестве материала припоя для монтажа лазерных кристаллов мы использовали пленки на основе чистого индия, полученные методом магнетронного напыления.

Выбор метода обусловлен следующими соображениями. Для реализации комплекса необходимых параметров паяного соединения при монтаже кристаллов одиночных лазерных диодов и кристаллов линеек лазерных диодов толщина пленок припоя должна находиться в диапазоне 2–10 мкм. Метод магнетронного напыления высокопроизводительный, скорость нанесения пленок высокая и стабильная (в нашем случае она составляет около 0.2 мкм/мин), поэтому возможен достаточно про-

стой и точный контроль их толщины на протяжении процесса. Выходное зеркало лазерного диода является наиболее нагруженным элементом всего лазерного кристалла, т.к. в этой зоне сосредоточены максимальные упругие напряжения, а также максимальные температура и плотность оптической мощности. Условия отвода тепла от выходного зеркала лазерного кристалла при этом наиболее жесткие, поскольку поток тепла в данной зоне по своему типу близок к одномерному (в отличие от двумерного потока в объеме кристалла) [1–4]. С помощью этого метода можно достичь высокой адгезии металлических пленок и более качественного в сравнении с методом термического напыления нанесения пленок на ребра теплоотводящих элементов, что весьма ценно при осуществлении металлизации под монтаж традиционных лазерных диодов с торцевым выводом излучения.

## 3. Свойства магнетронных пленок

Была исследована микроструктура пленок индия, служащих в качестве припоя при монтаже мощных лазерных кристаллов. Индий – традиционный и наиболее часто используемый материал припоя, применение которого для монтажа лазерных кристаллов обусловлено рядом его привлекательных свойств. Это низкая температура плавления (по разным данным, 156–161 °С), высокая пластичность, доступность и относительно небольшая стоимость. Пластичность индия позволяет получить достаточно высокие выходные параметры мощных лазерных диодов при монтаже кристаллов на теплоотводящие элементы из меди, дешевого и доступного материала, имеющего высокую теплопроводность ( $\sim 401 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$  при 300 К [8]), но весьма большой ( $16.7 \times 10^{-6} \text{ К}^{-1}$  при 300 К) коэффициент температурного расширения (КТР), сильно отличающийся от КТР полупроводникового материала лазерного кристалла ( $\sim 5.8 \times 10^{-6} \text{ К}^{-1}$  [8]).

Были получены и изучены пленки толщиной от 800 Å до 4 мкм. На рис.1 приведены микрофотографии пленки индиевого припоя, нанесенной на рабочую поверхность теплоотводящего элемента. Микрофотографии получены на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) при увеличении  $140\times$  и  $4300\times$ . При увеличении  $140\times$  по-

В.В.Безотосный, В.Ю.Бондарев, В.И.Коваленко, О.Н.Крохин, В.Ф.Певцов, Ю.М.Попов, Е.А.Чешев. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; e-mail: victorbe@sci.lebedev.ru  
В.Н.Токарев. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38

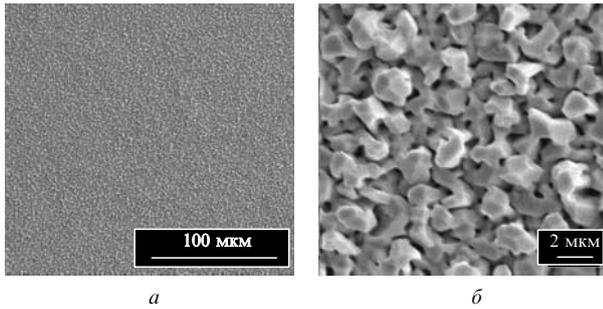


Рис.1. Структура пленки индия толщиной 2.7 мкм при наблюдении на СЭМ: увеличение 140× (а) и 4300× (б).

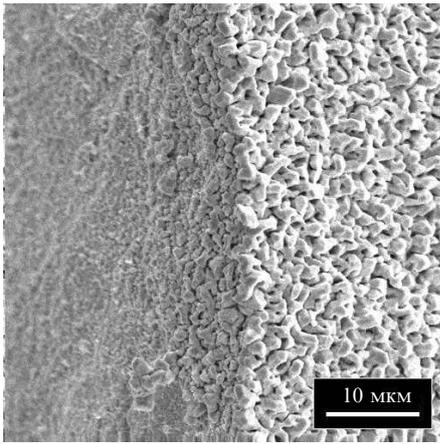


Рис.2. Микрофотография структуры пленки индия вблизи рабочего ребра теплоотводящего элемента при наблюдении на СЭМ; увеличение 1700×.

верхность пленки матовая, а при увеличении 4300× видна микроструктура в виде столбиков (вискеров) и пустот. Вискеры имеют выраженную огранку, свидетельствующую об их кристаллической структуре.

На рис.2 представлена микрофотография покрытого индием ребра теплоотводящего элемента, из которой видно, что микроструктура пленки в виде вискерообразных столбиков (см. рис.1,б) характерна для всей толщины пленки, причем пленка равномерно покрывает ребро, а также частично боковую грань.

Исследовались структуры пленок, полученных при различной температуре подложки и варьировании других параметров процесса напыления (скорости напыления, расстояния от подложки до мишени и т.д.). В определенных условиях удалось получить пленки с высокой планарностью поверхности и блеском, однако добиться «зеркальности» их поверхности не удалось. Формирование «микроструктуры» в виде кристаллитов на поверхности и в объеме толстых пленок (в нашем случае индия), полученных методом магнетронного распыления, является, вероятно, принципиальным моментом при высокой скорости напыления и характерно для механизма роста пленок типа ПК (пар – кристалл) [ 5 ].

#### 4. Эксперименты по монтажу, объемному плавлению и отверждению пленок индия

Эксперименты по монтажу лазерных кристаллов и объемному плавлению проводились на установке Lambda A6 (Finetech) в условиях локальной чистой зоны клас-

са 100. Плавление и отверждение пленок контролировалось визуально на мониторе с помощью телекамеры и микроскопа. Эти процессы проходили в атмосфере чистого азота (99.998 %) при скорости потока 6 л/мин. Инфракрасный нагреватель и принудительное охлаждение рабочей зоны позволяли получать скорости нагрева и охлаждения до ~20 °С/с. Термоциклы процессов программировались и контролировались на мониторах компьютера и видеокамеры, а моменты плавления и отверждения фиксировались в виде меток на графической диаграмме процесса. При исследовании плавления припоя, нанесенного на медные теплоотводящие элементы, использовались различные методы подготовки поверхности, в том числе различные режимы травления перед напылением. Варьировались состав и параметры пленок металлизации, а также параметры процесса напыления. В результате были разработаны технологии металлизации, обеспечивающие воспроизводимое плавление и отверждение припоя без образования капель и неоднородностей.

#### 5. Расчет лазерных параметров процесса модификации пленки припоя

Для повышения эффективности и однородности отвода тепла от лазерного кристалла необходимо разрушить границы зерен пленки припоя (см. рис.1,б) и переплавить их для образования однородной пленки. Использование наносекундного импульсного лазерного нагрева металлов позволяет выполнить условие так называемого поверхностного теплового источника:  $\sqrt{\gamma\tau} > \gamma^{-1}$ . Здесь  $\gamma$  – коэффициент поглощения материала (в  $\text{см}^{-1}$ ),  $\chi$  – температуропроводность (в  $\text{см}^2/\text{с}$ ) и  $\tau$  – длительность лазерного импульса. Предполагается также одномерный поток тепла (в глубину материала), что справедливо при выполнении неравенства  $\sqrt{\chi\tau} \ll r$ , где  $r$  – радиус пятна излучения. Для наносекундных импульсов при типичных радиусах пятна, превышающих, как правило, 15 мкм, это условие выполнено. Считается, что воздействующий импульс имеет прямоугольную форму. Такая идеализированная форма импульса удобна для получения аналитических оценок.

При этих предположениях глубина расплава  $h_0$ , достигаемая в течение импульса, дается выражением [6, 7]

$$h_0(F) = 2(\chi\tau)^{1/2} H_0(F/F_m), \quad (1)$$

где

$$H_0(F/F_m) = \frac{\pi^{1/2}}{1.4} \left\{ \left[ \frac{2.8}{\pi} \ln \left( \frac{F}{F_m} \right) + 1 \right]^{1/2} - 1 \right\}; \quad (2)$$

$F = I\tau$  – плотность энергии в импульсе (в Дж/см<sup>2</sup>);  $I$  – интенсивность (в Вт/см<sup>2</sup>);

$$F_m = \frac{(\pi\chi\tau)^{1/2}}{2A} \rho [C(T_m - T_i) + L_m] \quad (3)$$

– порог плавления материала. В формуле (1) не учитываются эффекты поверхностного испарения. Таким образом, при варьировании интенсивности импульса глубина расплава  $h_0$  изменяется от нулевого при  $F = F_m$  до максимального (в отсутствие испарения) значения  $h_{0\text{max}}$  при  $F = F_{\text{max}} = F_v$ :

$$h_{0\max} = 2(\chi\tau)^{1/2}H_0(F_v/F_m), \quad (4)$$

где

$$F_v = \frac{(\pi\chi\tau)^{1/2}}{2A}\rho[C(T_b - T_i) + L_m] \quad (5)$$

– порог испарения (за него условно принимаем плотность энергии в импульсе, при которой достигается нормальная точка кипения  $T_b$  на поверхности в конце импульса,  $t = \tau$ );  $\rho$  – плотность;  $C$  – удельная теплоемкость (в Дж·г<sup>-1</sup>·град<sup>-1</sup>);  $T_i$  – начальная температура;  $L_m$  – скрытая теплота плавления (в Дж/г);  $A = 4n/[(n + 1)^2 + k^2]^{-1}$  – поглощательная способность материала;  $n$  и  $k$  – действительная и мнимая части показателя преломления на длине волны  $\lambda = 1.06$  мкм;  $\gamma = 4\pi k/\lambda$  – упомянутый выше коэффициент поглощения материала (в см<sup>-1</sup>).

После окончания импульса ( $t > \tau$ ) толщина расплава продолжает расти от  $h(t = \tau) = h_0$  до максимальной величины  $h = h_1$  при  $t = t_{\max}$  из-за избытка энтальпии, запасенной в слое расплава в течение импульса. При  $t > t_{\max}$  начинается затвердевание: толщина расплавленного слоя уменьшается от  $h = h_1$  до нуля при  $t = t_s$ , где  $t_s$  – момент полного затвердевания. Оценки снизу ( $h_{11}$ ) и сверху ( $h_{12}$ ) для  $h_1$ , т.е.  $h_{11} < h < h_{12}$ , даются следующими выражениями [6, 7]:

$$h_{11}(F/F_m) = \frac{(\pi\chi\tau)^{1/2}}{2} \left[ \frac{F}{F_m} - \frac{1}{1 + 0.4953H_0(F/F_m)} \right], \quad (6)$$

$$h_{12}(F/F_m) = 2(\chi\tau)^{1/2} \frac{1}{0.246} \times \left[ 1 - \left( 1 - 2 \times 0.246 \ln \frac{F}{F_m} \right)^{1/2} \right] \text{ при } F/F_m < 6.7, \quad (7)$$

$$h_{12}(F/F_m) = \frac{(\pi\chi\tau)^{1/2}}{2} \frac{F}{F_m} = \frac{AF}{\rho[C(T_m - T_i) + L_m]} \text{ при } F/F_m \geq 6.7. \quad (8)$$

Для индия  $\rho = 7.3$  г/см<sup>3</sup>,  $C(0-150^\circ\text{C}) = 0.234$  Дж·г<sup>-1</sup> × К<sup>-1</sup>,  $T_i = 20^\circ\text{C}$ ,  $T_m = 157^\circ\text{C}$ ,  $T_b = 2024^\circ\text{C}$ ,  $L_m = 28.4$  Дж/г [3],  $\chi = 0.4$  см<sup>2</sup>/с. Реальные значения  $n$  и  $k$  на  $\lambda = 1.06$  мкм в нашем случае определяются структурными свойствами поверхности; кроме того, эти параметры в процессе лазерной обработки являются динамическими, т.е. варьируются при изменении микроструктуры пленки. По оценке значения коэффициента  $A$  лежат в диапазоне 0.1–1. При длительности импульса  $\tau = 6$  нс из этих формул получим:

Для  $A = 0.1$ :  $F_m = 0.19$  Дж/см<sup>2</sup>,  $F_v = 1.58$  Дж/см<sup>2</sup>. При  $F = F_v$  имеем  $h_0 = 0.87$  мкм,  $h_{11} = 3.4$  мкм и  $h_{12} = 3.6$  мкм.

Для  $A = 0.2$ :  $F_m = 0.09$  Дж/см<sup>2</sup>,  $F_v = 0.79$  Дж/см<sup>2</sup>. При  $F = F_v$  имеем  $h_0 = 0.87$  мкм,  $h_{11} = 3.3$  мкм и  $h_{12} = 3.6$  мкм, т.е.  $h_1 = 3.5$  мкм.

Для  $A = 0.5$ :  $F_m = 0.038$  Дж/см<sup>2</sup>,  $F_v = 0.32$  Дж/см<sup>2</sup>. При  $F = F_v = 0.32$  Дж/см<sup>2</sup> имеем  $h_0 = 0.87$  мкм,  $h_{11} = 3.4$  мкм и  $h_{12} = 3.6$  мкм, т.е.  $h_1 \approx 3.5$  мкм. При  $F = 0.24$  Дж/см<sup>2</sup> получим  $h_1 \approx 2.7$  мкм.

Для  $A = 1$ :  $F_m = 0.019$  Дж/см<sup>2</sup>,  $F_v = 0.16$  Дж/см<sup>2</sup>. При  $F = F_v = 0.16$  Дж/см<sup>2</sup> имеем  $h_0 = 0.87$  мкм,  $h_{11} = 3.4$  мкм и  $h_{12} = 3.6$  мкм, т.е.  $h_1 \approx 3.5$  мкм, а при  $F = 0.12$  Дж/см<sup>2</sup> получим  $h_1 \approx 2.7$  мкм.

Эти оценки необходимой плотности энергии лазерного импульса, а также глубины расплава были использованы для определения необходимых параметров лазера, применяемого при обработке пленок индия. Его максимальная энергия превышала 100 мкДж, соответственно максимальная плотность энергии в импульсе составляла более 0.32 Дж/см<sup>2</sup> при диаметре пятна  $\sim 200$  мкм по уровню  $1/e^2$ . В качестве источника накачки использовался лазерный диод. Согласно сделанным оценкам, указанная плотность энергии при диаметре пучка  $\sim 200$  мкм с запасом перекрывает порог плавления при  $A = 0.1$  – 1 и порог испарения при  $A > 0.5$ . В случае  $A = 0.1$  порог испарения может быть достигнут при более острой фокусировке пучка в пятно диаметром  $\sim 90$  мкм.

## 6. Эксперимент по лазерной модификации металлических пленок

При объемном нагреве подложки вместе с пленкой припой слиянию вискозиса препятствуют развитая поверхность границ зерен, окисление и загрязнение этой поверхности на воздухе, а также образование неоднородностей структуры пленки и мениска. Как было сказано выше, эксперименты по модификации пленок припою проводились с помощью специально разработанного импульсного твердотельного лазера с диодной накачкой, модуляция добротности которого осуществлялась введенным в резонатор акустооптическим модулятором. Схема лазера показана на рис.3. Пороговый ток полупроводникового лазера накачки был равен 0.7 А, крутизна ватт-амперной характеристики – 1.15 Вт/А, максимальная мощность в непрерывном режиме составляла около 5 Вт. Были получены следующие выходные параметры импульсного твердотельного лазера:

Длина волны излучения (мкм).....	1.064
Модовый состав.....	TEM <sub>00</sub>
Диаметр пучка (мм).....	0.22 по уровню 1/e <sup>2</sup>
Расходимость излучения (мрад).....	6.5
Поляризация.....	линейная (более 100:1)
Частота следования импульсов (кГц).....	до 300
Длительность импульса (нс).....	6–140
Стабильность (%/ч).....	1
Размеры излучающей головки (мм).....	35 × 55 × 140
Вес (кг).....	0.8

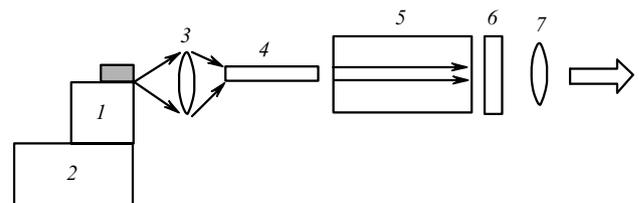


Рис.3. Схема твердотельного лазера с диодной накачкой: 1 – полупроводниковый лазер накачки, собранный на теплоотводящем элементе типа С-маунт; 2 – термоэлектрический холодильник; 3 – фокусирующая оптика; 4 – кристалл YAG:Nd; 5 – акустооптический модулятор; 6 – выходное зеркало; 7 – коллиматор.

Табл. 1. Зависимость средней мощности импульсного твердотельного лазера при частоте 5 кГц от тока накачки непрерывного лазерного диода.

Ток накачки (А)	Средняя мощность (Вт)
1.04	0
1.25	0.012
1.5	0.054
2.04	0.142
2.5	0.22
3.05	0.33
3.47	0.426
3.8	0.5

Выходная мощность твердотельного лазера изменялась путем регулировки тока накачки полупроводникового лазера согласно табл. 1.

Для сканирования лазерным пучком обрабатываемый теплопровод закреплялся на двухкоординатном оптическом столике, управляемом компьютером. При определении оптимальных режимов обработки варьировались шаг сканирования и энергия в импульсе излучения. Максимальная импульсная мощность твердотельного лазера была равна  $\sim 15$  кВт при длительности импульса 6.5 нс и частоте следования 5 кГц, соответственно максимальная энергия в импульсе составляла  $\sim 100$  мкДж.

## 7. Обсуждение результатов

Микроструктура пленки, находившейся вне зоны воздействия и в зоне лазерной обработки, показана на рис. 4. При наблюдении в оптическом и сканирующем электронном микроскопе было зафиксировано улучшение микроструктуры пленки после облучения при полной энергии в пучке около 3 мкДж и диаметре пучка 160 мкм по уровню  $1/e^2$ . При этом определенный экспериментально диаметр зоны слияния вискеров в случае проплавления пленки на всю глубину составил  $\sim 35$  мкм, а переходная область с неполным по глубине проплавлением пленки достигла  $\sim 5$  мкм. Полная падающая энергия в этой зоне составила  $\sim 1$  мкДж, средняя плотность падающей энергии равнялась  $\sim 0.1$  Дж/см<sup>2</sup>. При достижении указанной плотности энергии и более высоких уровнях облучения наблюдался горячий факел и был слышен звук ударной волны.

Данное значение плотности энергии находится между значениями, соответствующими расчетной оценке порогов плавления и испарения при  $A = 0.5$ . Толщина модифицированной пленки по данным микроскопии была почти в 2.5 раза меньше толщины исходной пористой пленки. С учетом этого экспериментальные оценки плотности энергии ( $\sim 0.1$  Дж/см<sup>2</sup>) и толщины модифициро-

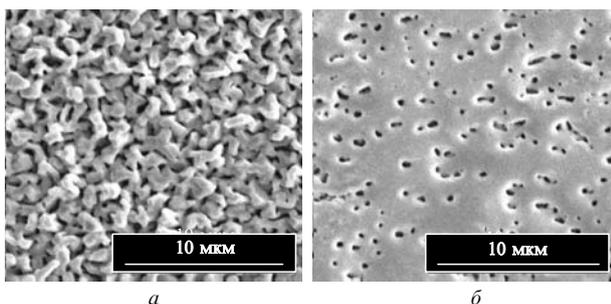


Рис. 4. Структура пленки индия толщиной 2.7 мкм до (а) и после (б) лазерной обработки при наблюдении на СЭМ; увеличение  $4300\times$ .

ванной пленки ( $\sim 1$  мкм) хорошо согласуются с расчетными для  $A = 0.5$  и  $F = 0.1$  Дж/см<sup>2</sup>: расчет дает  $h_0 = 0.45$  мкм,  $h_{11} = 0.79$  мкм и  $h_{12} = 1.1$  мкм. Глубина проплава, приближенно оцениваемая как  $h_1 = \frac{1}{2}(h_{11} + h_{12})$ , составляет тогда 0.95 мкм. Отметим, что значение  $A = 0.1$  характерно для гладкой поверхности металлической пленки [9], тогда как для поверхности с микропорами, как в нашем случае,  $A$ , вероятно, находится в диапазоне 0.3–0.5 (в зависимости от формы, размера и объема, занимаемого порами). При плотности энергии  $\sim 0.3$  Дж/см<sup>2</sup> пленка индия испаряется в зоне максимальной плотности энергии лазерного пятна (диаметр зоны испарения  $\sim 10$  мкм); с увеличением плотности энергии диаметр зоны испарения индия увеличивается и в центре пятна начинается испарение материала теплоотводящего элемента.

Лазерная обработка позволила повысить однородность поверхности и улучшить структуру пленки (см. рис. 4, б). После лазерной обработки пленка приобретает признаки аморфной структуры – вероятно, за счет быстрого (наносекундного) плавления и остывания материала в области воздействия лазерного импульса.

Тепловое расширение индия, в особенности при переходе через точку плавления, при нагреве от комнатной температуры до температуры испарения может оказывать значительное механическое разрушающее воздействие на окисную пленку на границах зерен, что важно для их слияния и получения более сплошного и однородного покрытия.

После лазерной модификации слоя индия эффективность отвода тепла от полупроводникового лазерного кристалла может быть значительно увеличена, поскольку увеличивается площадь, на которой после объемного плавления происходит взаимодействие припоя с металлической пленкой на лазерном кристалле, а также возрастает теплопроводность слоя припоя за счет уменьшения количества пор. Соответственно при использовании таких модифицированных пленок можно ожидать существенного улучшения выходных параметров мощных полупроводниковых приборов, в особенности мощных лазерных диодов. Отметим, что микроструктура исходных и обработанных пленок, как видно из микрофотографий, далека от совершенства: после обработки на поверхности и в объеме пленок наблюдаются дефекты. Эти дефекты имеют, в основном, округлую форму и размеры от 0.1 до 1 мкм. В дальнейшем для уменьшения количества дефектов и получения более однородной по структуре поверхности планируется совершенствование методов лазерной обработки.

Приведенные предположения относительно возможности улучшения отвода тепла от полупроводниковых кристаллов при использовании обработанных лазером металлических пленок были проверены при сборке кристаллов мощных диодных лазеров на пленках припоя с лазерной обработкой и без нее. Типичные ватт-амперные характеристики двух лазеров на длине волны 808 нм показаны на рис. 5. Использовались теплоотводящие элементы из одной партии, металлизация которых была проведена в одном процессе напыления; лазерные кристаллы также выбирались из одной партии. Пороговые токи лазеров различались незначительно. При токе 4.3 А мощность лазера LD № 01, собранного при лазерной модификации пленки индия, составила 4 Вт. Максимум огибающей спектра его излучения (при  $T = 25^\circ\text{C}$ ) находился на  $\lambda = 808.3$  нм, полуширина спектра излучения равня-

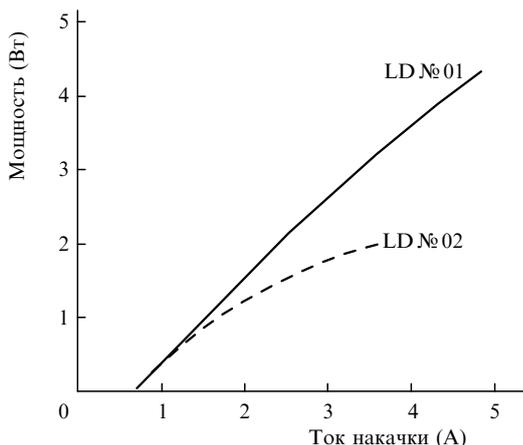


Рис. 5. Ватт-амперные характеристики мощных диодных лазеров в непрерывном режиме при температуре 25 °С; LD № 01 – с лазерной обработкой металлической пленки, LD № 02 – без лазерной обработки.

лась 1 нм, а температурный коэффициент смещения длины волны был равен 0.23 нм/К, что удовлетворяет требованиям к источникам накачки кристаллов YAG: Nd. С технологической точки зрения такие спектральные параметры свидетельствуют о высокой однородности отвода тепла от кристалла. Кратковременные испытания диодов, собранных с применением лазерной обработки, показали, что за 100 ч работы их выходная мощность (4 Вт) не изменилась в пределах точности измерений: максимальная мощность лазера LD № 01 составила 5 Вт при токе 6 А. Максимум огибающей спектра излучения лазера LD № 02 по сравнению с лазером LD № 01 был сдвинут в длинноволновую сторону из-за недостаточно эффективного и неоднородного отвода тепла, полуширина спектра его излучения составила 2 нм при токе накачки 3 А. Максимальная мощность лазера LD № 02, собранного без лазерной модификации пленки индия, достигала лишь 2 Вт, а при токе 4.5 А наблюдалось насыщение мощности.

## 8. Заключение

Показано, что лазерная обработка позволяет модифицировать микроструктуру металлических пленок, в

частности уменьшить пористость и шероховатость поверхности, разрушить окисные пленки и очистить поверхность от загрязнений. Оценки плотности энергии и глубины переплавленного слоя индия, полученные на основе расчетной модели при поглотительной способности поверхности  $A = 0.5$ , хорошо согласуются с оценками, сделанными на основе экспериментальных результатов. Указанные свойства модифицированной поверхности позволили воспроизводимо получать высокие излучательные параметры при монтаже мощных лазерных диодов на длине волны 808 нм, согласующиеся с требованиями к источникам накачки кристаллов YAG: Nd.

Разработанные методы модификации структуры металлических пленок могут быть использованы в различных микро- и оптоэлектронных технологиях.

Авторы считают своим приятным долгом поблагодарить И.В.Акимову за проведение исследований на СЭМ. Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 05-08-65399 и 06-02-08058-офи) и гранта Президента РФ государственной поддержки ведущих научных школ РФ № НШ – 6055.2006.2.

1. Безотосный В.В., Кумыков Х.Х., Маркова Н.В. *Квантовая электроника*, **23** (9), 775 (1996).
2. Безотосный В.В., Кумыков Х.Х., Маркова Н.В. *Квантовая электроника*, **24** (6), 495 (1997).
3. Безотосный В.В., Кумыков Х.Х. *Квантовая электроника*, **25** (3), 225 (1998).
4. Basov N.G., Bezotosny V.V., Kumykov Kh.Kh., Popov Yu.M. *Laser and Particle Beams* (USA, Cambridge: Cambridge University Press, 1999, Vol. 17, No. 3, p. 427–436).
5. Палатник Л.С., Фукс М.Я., Косевич В.М. *Механизм образования и субструктура конденсированных пленок* (М.: Наука, 1972, с. 15).
6. Tokarev V.N., Kaplan A.F.H. *Lasers in Engineering*, **7** (3–4), 295 (1998).
7. Tokarev V.N., Kaplan A.F.H. *J. Appl. Phys.*, **86**, 2836 (1999).
8. *Физические величины. Справочник* (М.: Энергоатомиздат, 1991).
9. Делоне Н.Б. *Взаимодействие лазерного излучения с веществом* (М.: Наука 1989, с. 226).
10. Tokarev V.N., Kaplan A.F.H. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **32**, 1526 (1999).
11. Lazare S., Tokarev V.N., in *Recent Advances in Laser Processing of Materials*. Ed. by J.Perriere, E.Millon, E. Fogarassy (Amsterdam: Elsevier, 2006, Ch. 5).
12. Tokarev V.N. *Laser Phys.*, **16** (9), 1291 (2006).