

# Повышение эффективности мощных диодных лазеров при использовании алмазных теплоотводов

В.В.Паращук, Г.И.Рябцев, А.К.Беляева, Т.В.Безъязычная, В.В.Баранов, Е.В.Телеш,  
Vu Doan Mien, Vu Van Luc, Pham Van Truong

*На базе многофункциональных ионно-лучевых и магнетронных распылительных систем разработаны химической и вакуумные методы формирования металлических покрытий с высокой адгезией к различным поверхностям, в том числе применительно к медным и алмазным теплоотводящим основаниям (АТО) для диодных лазеров. Определены оптимальные условия сборки диодных лазеров и линеек на основе разработанных способов металлизации и достигнуто существенное улучшение выходных характеристик приборов. В случае лазерных диодов непрерывного режима с АТО предельная выходная мощность увеличивается до двух раз и существенно расширяется линейный (рабочий) участок ватт-амперной характеристики, а кроме того, дифференциальная эффективность по сравнению с эффективностью образцов на медных хладопроводах возрастает в 1,5–2 раза. Применение АТО для импульсных лазерных линеек позволяет расширить рабочую область по току накачки в 2–3 раза, а по длительности возбуждающих импульсов при частоте их следования  $f \geq 10$  Гц в миллисекундном диапазоне – более чем на порядок.*

**Ключевые слова:** мощные диодные лазеры, тепловые процессы, алмазные теплоотводящие подложки, высокоадгезионная металлизация, технология сборки лазера, выходные характеристики.

## 1. Введение

Лазерные диоды (ЛД) и лазерные диодные линейки с мощностью от единиц до десятков и сотен ватт в непрерывном режиме требуют интенсивного отвода тепла от активной области полупроводниковой гетероструктуры. Как было показано еще в конце 60-х годов прошлого века [1], эффективными теплоотводящими основаниями для полупроводникового лазера могут служить кристаллы алмаза. Теплопроводность алмаза принадлежит к его наиболее выдающимся свойствам, она в несколько раз превышает теплопроводность всех других твердых материалов – металлов, полупроводников и диэлектриков [2], в том числе и меди, которая наиболее часто используется для теплоотвода в электронике. Алмазы нашли применение в качестве высокоэффективных теплоотводов и в других полупроводниковых приборах – лавинно-пролетных диодах, диодах Ганна и т. д. [1, 3, 4]. Однако их широкое практическое (в промышленных масштабах) использование пока сдерживается как относительной дороговизной, так и рядом нерешенных физико-технологических проблем.

В настоящей работе для решения этих проблем используется сравнительный анализ возможности приме-

нения синтетических и природных моно- и поликристаллов алмаза и его эффективности. Известно, что преимущества алмаза как теплоотвода проявляются лишь тогда, когда его тепловое сопротивление  $R_{\text{th}}$  больше, чем у всех других элементов прибора [1]. Этого можно достичь, как показано нами ниже, при использовании нового способа металлизации алмазного теплоотводящего основания (АТО), который обеспечивает достаточно высокие степень и однородность адгезии металлического покрытия поверхностей, а также путем разработки соответствующей технологии сборки диодных структур.

Сверхтвердые материалы, к которым относится алмаз, представляют собой вещества с устойчивыми электронными конфигурациями атомов, химически инертные по отношению к большинству металлов и припоев. В качестве компонентов, проявляющих адгезионную активность к алмазу, должны использоваться металлы с высоким химическим сродством к углероду, причем предпочтительнее такие, которые образуют с этим элементом соединения, обладающие «металлической» межатомными связями и металлическими свойствами (хром, титан, ниобий, цирконий, тантал, молибден, вольфрам). Разработка технологии создания высокоадгезионных металлических покрытий алмаза представляет собой важную, во многом еще не решенную проблему.

Согласно данным наших предварительных исследований [5, 6], эффективность АТО определяется не только высокой степенью адгезии его металлического покрытия, но и достаточной величиной электрической проводимости, не вызывающей существенного джоулевого нагрева основания. Однако как оказалось, одновременное удовлетворение этих условий осложняется тем, что требуемая степень адгезии достигается при толщине покрытия  $d \leq 0.1$  мкм, а хорошая проводимость – при  $d > 0.1$  мкм. Кроме того, необходима однородность адгезии ко

В.В.Паращук, Г.И.Рябцев, А.К.Беляева, Т.В.Безъязычная. Институт физики им. Б.И.Степанова НАНБ, Белоруссия, 220072 Минск, просп. Независимости, 68; e-mail: v.parashchuk@ifanbel.bas-net.by  
В.В.Баранов, Е.В.Телеш. Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Белоруссия, 220027 Минск, ул. П.Бровки, 6  
Vu Doan Mien, Vu Van Luc, Pham Van Truong. Institute of Materials Science, Vietnamese Academy of Science and Technology, Hoang Quoc Viet, Can Giay, Hanoi, Vietnam

всем основным поверхностям основания – монтажной, посадочной (противоположной монтажной) и боковым, которые обеспечивают электрическую связь первых двух поверхностей при минимальном удельном сопротивлении металлического покрытия. Так, в наших первоначальных опытах было установлено, что химический метод осаждения никеля обеспечивает наивысшую степень адгезии покрытия АТО по сравнению с другими методами, однако при этом требуемая степень однородности не достигается. Данное явление объяснялось различием физических свойств указанных поверхностей и ростовыми особенностями используемых кристаллов. В дальнейшем этот метод был усовершенствован с применением дополнительной обработки (очистки и активации) поверхностей и успешно апробирован на кубическом нитриде бора (сNB) – перспективном, как оказалось, аналоге алмаза применительно к нашим целям. Вопросы применения сNB и АТО, а также преимущества и недостатки обеих структур предполагается рассмотреть отдельно.

В настоящей работе исследованы возможность и основные закономерности процесса металлизации АТО на основе природных и искусственных алмазов (моно- и поликристаллов) путем нанесения трехслойных покрытий (Ti–Ni–Ni, Ti–Al–Ni, C–Ni–Ni) различными методами. Модельной средой служила система Ti–Ni–Ni, на примере которой выяснены условия получения однородного высокоадгезионного металлического покрытия алмазных оснований с требуемым низким удельным сопротивлением по отношению ко всем экспонируемым поверхностям. Схожие результаты получены и для остальных систем. Металлизация АТО проводилась следующим образом. Методом вакуумно-плазменного напыления из сепарированной плазмы на алмаз наносился подслой Ti, на который методом химического осаждения из раствора электролита был нанесен слой Ni. Затем методом ионно-лучевого (или магнетронного) распыления вновь наносился Ni, пока толщина покрытия не доходила до требуемого значения. На основе данных методов разработана технология сборки диодных лазеров и линеек и установлено, что наилучшие характеристики приборов достигаются при ионно-лучевом методе нанесения металлических покрытий на элементы лазерной структуры.

## 2. Формирование металлических покрытий алмазных теплоотводящих оснований и процесс сборки лазера

Разработанные нами вакуумные методы формирования металлических покрытий с высокой адгезией к различным поверхностям основаны на применении многофункциональных ионно-лучевых и магнетронных распылительных систем, а также сплавов внедрения с высоким сродством к углероду в качестве адгезионных слоев [5]. В частности, напыление Ti/Ni-пленок ионно-лучевым методом проводилось на установке Z-400 «Leybold-Heгаeus» с безмасляной откачкой при рабочем давлении  $7.8 \times 10^{-2}$  Па после нагрева алмазного основания до температуры 200–350 °С. Металлизация осуществлялась с помощью специальной распылительной системы, позволяющей перед нанесением пленок обрабатывать поверхность пучком ионов аргона с энергией  $\sim 1$  кэВ. Это позволяло удалять с поверхности алмаза загрязнения и

нарушенные приповерхностные слои с низким сцеплением и обеспечивало адгезию наносимой металлической пленки на уровне энергии межатомных связей. Толщина пленок титана составляла  $\sim 20$  нм при скорости напыления 0.2–0.25 нм/с, никеля – около 300 нм при скорости напыления 0.35 нм/с.

Согласно разработанной методике сборки процессы металлизации АТО и предварительной очистки его поверхностей выполняются в едином непрерывном цикле. В дальнейшем осуществляют наращивание слоя никеля до толщины 0.2–0.3 мкм (контактный слой) и термический отжиг в вакууме либо без него при  $T = 400–450$  °С в течение 30–40 мин. Затем АТО присоединяют к массивному металлическому теплоотводу высокотемпературным композиционным припоем ПОС-61 в восстановительной среде (сухой очищенный водород H<sub>2</sub>). Композиционный припой наносят на посадочную поверхность алмазного теплоотвода методом вакуумного терморезистивного напыления или иным способом (толщина слоя 4–6 мкм). Таким же образом на монтажную поверхность теплоотвода наносят слой индия толщиной 3–5 мкм, после чего с использованием микроскопа выполняют позиционирование активного элемента (единичного ЛД или линейки ЛД в виде полоски длиной  $L$ ) с заданной точностью в рабочей области монтажной поверхности.

Полученную структуру помещают в специальную кассету, загружают в кварцевую камеру (реактор) печи и осуществляют припайвание в восстановительной среде в динамическом режиме с временем нагрева/охлаждения 3–5 мин при температуре  $T_{\max} \geq T_{\text{liq}} + (50 - 70)$  °С, где  $T_{\text{liq}}$  – температура ликвидуса материала ( $T_{\text{liq}} \approx 190$  °С для ПОС-61 и 156.8 °С для In). Конструкция кассеты позволяет осуществлять впаивание как в условиях заданной механической нагрузки, так и без нее. При этом между основными операциями сборки лазера соблюдается минимальный технологический перерыв (не более 1 ч), а также поддерживаются необходимые микроклиматические условия. Процесс сборки завершается после присоединения к гетероструктуре контактных проводов (путем ультразвуковой сварки) и, при необходимости, размещения системы в стандартном корпусе, закрепляемом в радиаторе.

После металлизации АТО качество его покрытия (степень адгезии, однородность), электропроводность и тепловые характеристики (тепловое сопротивление и теплопроводность) контролировались как визуально, так и с помощью микроскопа. Соединяемые элементы демонтировались, и адгезия определялась по усилию отрыва (метод «нормального отрыва», использовался стендовый динамометр) или способом «царапания» (использовались микроскопы МИМ-7, МИИ-4).

## 3. Влияние технологических условий сборки лазерных диодных структур на их основные характеристики

АТО для диодных лазеров изготавливались из монокристаллов синтетического алмаза типа МСТМ «Алмазот», выращенных методом температурного градиента из раствора углерода в расплаве металла при высоких давлении и температуре. Кристаллы вырезались по плоской сетке куба усеченного октаэдра и имели размеры  $\sim 1.5 \times 1.5 \times 0.3$  мм. После полировки шероховатость поверхности АТО составляла 2.8–12.8 нм. В отдельных

случаях использовались природные алмазные образцы, а также поликристаллические синтетические алмазные основания, выращенные модифицированным CVD-методом, с размерами  $\sim 12 \times 2.5 \times 0.3$  мм или меньше, впрессованные в медные теплоотводы, в связи с чем для обработки были доступны всего одна или две поверхности.

Для возбуждения ЛД в непрерывном режиме использовался источник тока типа LDC-8-01 с погрешностью установки уровня тока  $\sim 1$  мА. Для мощных лазерных диодных линеек он выдавал импульсы тока с амплитудой до  $200 \pm 2$  А, длительностью до 10 мс и частотой следования до 100 Гц. Мощность (энергия) излучения фиксировалась измерителем Coherent FM со сменными головками. При необходимости спектры излучения регистрировались установкой на базе монохроматора МДР-23 и CCD-камерой Sony ILX512, сопряженной с компьютером; спектральное разрешение установки составляло  $\sim 0.3$  Å. Теплопроводность алмазных оснований оценивалась путем исследования теплопереноса через образец на установке УКТ-3 или методом релаксации тепловых решеток на лазерном терморелаксметре ЛТР 266-01 до и после процесса металлизации с погрешностью  $\sim 20\%$ .

### 3.1. Теплоотводящие основания из природного алмаза

На начальном этапе экспериментов использовались теплоотводы из природного алмаза и ЛД на основе InGaAs/AlGaAs-гетероструктур с квантовой ямой и шириной полоскового контакта  $\sim 100$  мкм. АТО имели коэффициент теплопроводности  $\sim 1400$  Вт·м $^{-1}$ ·К $^{-1}$ , их размеры соответствовали оптимальным с точки зрения результатов моделирования в них тепловых процессов [6].

Исследовалась зависимость мощности излучения, генерируемого ЛД в непрерывном режиме, от тока накачки в широком диапазоне – вплоть до полной деградации (рис.1). Характеристики лазеров с АТО сравнивались с параметрами приборов, собранных при тех же условиях непосредственно на медном хладопроводе. Зеркала резонаторов лазеров формировались путем естественного скола граней кристалла (без напыления диэлектрических покрытий).

Как видно из рис.1, в целом лазерные диоды с АТО деградируют при более высоких уровнях накачки. Наблюдаемый разброс данных связан, по-видимому, с разбросом адгезионных свойств пленочных покрытий АТО, зависящих от используемого процесса металлиза-

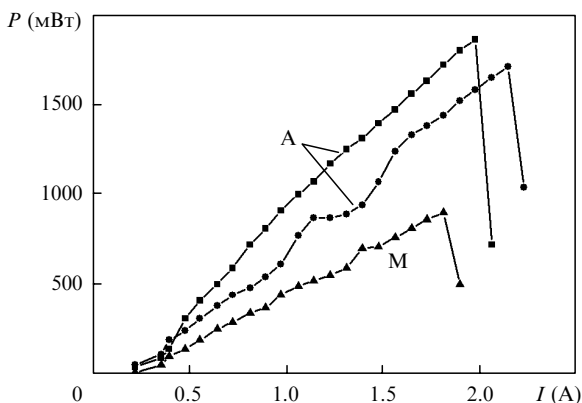


Рис.1. Ватт-амперные характеристики лазерных диодов, собранных на алмазных основаниях (А) и на медном хладопроводе (М) по оптимизированной технологии.

ции и влияющих на тепловое сопротивление прибора  $R_{th}$ . При оптимизированной технологии сборки значение  $R_{th}$  в случае алмазной подложки снижается в среднем не менее чем на 30% (до  $R_{th} \leq 3$  К/Вт). Это объясняется более высокой эффективностью алмазных теплоотводов по сравнению с медными вследствие значительно большей интенсивности процессов теплообмена в первом случае [6]. Согласно данным [3, 4], в этих условиях максимальное снижение теплового сопротивления для мощных транзисторов может достигать 2.5 раза.

Из рис.1 также следует, что дифференциальная эффективность лазеров на АТО, собранных по описанной выше оптимизированной технологии, в 1.5–2 раза больше, чем одного из лучших образцов на медном основании. Согласно оценкам, примерно во столько же раз возрастает и КПД.

Последовательное применение технологических операций, оптимизирующих в целом процесс сборки лазерных диодов на АТО (использование высокотемпературного твердого припоя ПОС-61 вместо индиевого, отжиг АТО после металлизации, напайвание лазерного диода на АТО при механической нагрузке), позволило увеличить выходную мощность ЛД не менее чем в два раза (рис.2), что согласуется с данными для других полупроводниковых приборов [3, 4]. Из рис.2 следует, что ватт-амперная характеристика образцов на АТО сохраняет линейность во всем диапазоне токов накачки. При этом, в отличие от образца на медном хладопроводе, оптимизация технологии сборки не меняет их дифференциальную эффективность. Насыщение ватт-амперной характеристики одного из лучших ЛД на медном хладопроводе наступает уже при токе  $\sim 1.8$  А, что может быть следствием меньшей теплопроводности меди по сравнению с АТО и увеличения  $R_{th}$  прибора при больших токах возбуждения.

Следует отметить, что припой ПОС-61 характеризуется большим коэффициентом теплопроводности и более высокими температурой плавления и прочностью, чем у индия, что важно для повышения надежности, срока службы и стабильности параметров мощных ЛД, в особенности при высоких температурах окружающей среды.

### 3.2. Теплоотводящие основания из искусственных алмазов

Использовались также теплоотводы на основе искусственных алмазов и ЛД, аналогичные описанным выше.

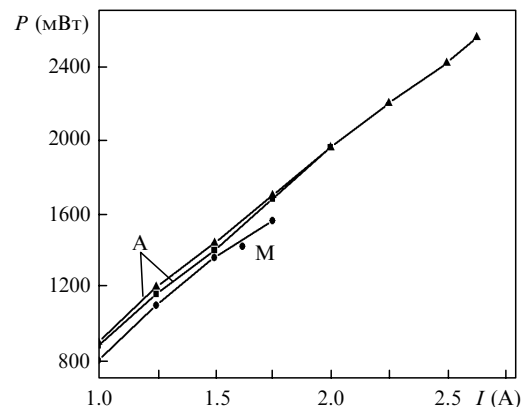


Рис.2. Ватт-амперные характеристики ЛД, собранных на алмазных (А) и медных (М) основаниях с использованием термообработки (по оптимизированной технологии).

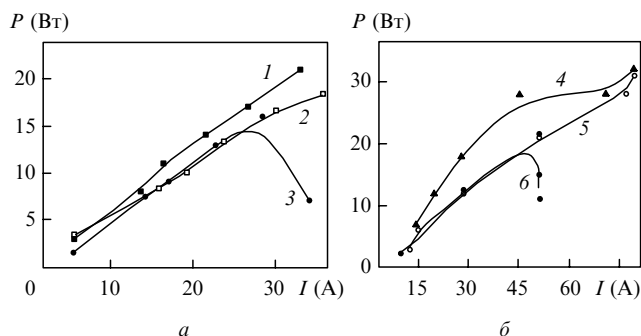


Рис.3. Ватт-амперные характеристики лазерных линеек на медных (а) и алмазных (б) основаниях при длительностях импульсов тока 30 (1), 50 (2), 100 (3), 500–1000 (4–6) мкс. Кривые 1–4 получены для образцов, не прошедших наработку, 5 и 6 – после наработки.

Измеренные теплопроводности неметаллизированных АТО, используемых в наших экспериментах, находились в диапазоне  $600\text{--}1400\text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$ . Сравнение параметров изготовленных лазеров показало, что при использовании теплоотводящих оснований из синтетического алмаза, металлизированных методом ионно-лучевого распыления, их характеристики близки к таковым для ЛД, собранных на теплоотводящих основаниях из природного алмаза с теплопроводностью  $\sim 1400\text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$ . Измеренные значения адгезии для различных образцов составляли 5–30 МПа. Разброс значений адгезии для одного образца составлял не более 30% и определялся режимами нанесения пленок и процессом пайки. Удельное сопротивление напыленных слоев не превышало 1 Ом·см.

### 3.3. Импульсные диодные линейки на АТО

Было проведено сравнение эффективностей лазерных диодных линеек на основе алмазных и медных подложек. Исследовались 30-ваттные диодные линейки с длиной резонатора 2–3 мм на базе гетероструктур InGaAs/AlGaAs/GaAs, излучающие на длине волны 810 нм импульсы света миллисекундной длительности в широком (до 100 А) диапазоне амплитуд возбуждающих импульсов при частоте их следования до 10 Гц. Использовались АТО из поликристаллов, выращенных модифицированным CVD-методом. При этом были рассмотрены два метода соединения алмазного основания с медной подложкой: один – с использованием традиционной технологии металлизации и последующего припаивания, другой – упрощенным способом механической впрессовки. Сравнительные исследования ватт-амперных характеристик лазерных линеек, собранных с использованием поликристаллических АТО, а также искусственных монокристаллов и медных оснований показали (рис.3), что при частотах следования импульсов тока 10 Гц и прочих равных условиях лазерные линейки на алмазных теплоотводах могут работать при длительностях импульсов до 1000 мкс, тогда как линейки на медных основаниях имеют ограниченную ста микросекундами область длительностей возбуждающих импульсов.

Следует отметить, что наиболее эффективными в данном случае оказались АТО из монокристаллов. Метод впрессовки поликристаллов дает сравнимые или несколько худшие результаты, однако отличается большей технологичностью и менее трудоемок. Использование комбинированного охлаждения «микроканальный жидкостный теплоотвод – АТО» (рис.3,б, кривые 4, 5) позволяет расширить рабочую область лазерных линеек по току накачки в 2–3 раза при частоте следования импульсов 10 Гц в миллисекундном диапазоне длительностей. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности использования алмазных технологий при разработке мощных линеек и других структур на основе инжекционных лазеров.

## 4. Выводы

Разработаны технологии сборки и формирования высокоадгезионных металлических покрытий, позволяющие создавать лазерные диодные структуры с высокоэффективными теплоотводами на основе природных и искусственных алмазов, обладающие улучшенными базовыми характеристиками. При сборке по неоптимизированной технологической цепочке лазерные диоды непрерывного режима на основе АТО позволяют увеличить предельную выходную мощность до двух раз и существенно расширить линейный (рабочий) участок ватт-амперной характеристики, а также повысить дифференциальную эффективность в 1.5–2 раза по сравнению с образцами на медных хладапроводах. Оптимизация процесса сборки увеличивает дифференциальную эффективность только образцов на медных основаниях. Применение алмазных теплоотводящих оснований для импульсных лазерных линеек позволяет расширить рабочий диапазон токов накачки в 2–3 раза, а также более чем на порядок (до миллисекунд) диапазон длительностей возбуждающих импульсов при частоте их следования свыше 10 Гц.

Работа поддержана Белорусским республиканским фондом фундаментальных исследований и Вьетнамской академией наук и технологий в рамках совместного международного проекта (Ф09ВН-007).

1. Алмаз в электронной технике. Под ред. В.Б. Кваскова (М.: Энергоатомиздат, 1990)
2. Anthony T.R., Vanholzer W.F., Fleischer T.F., et al. *Phys. Rev. B*, **42** (2), 1104 (1990).
3. Моряков О.С., Квасков В.Б., Горбачев В.В., Зезин Р.Б., Храброва Т.В. *Обзоры по электронной технике. Сер. 2. Полупроводниковые приборы* (М.: ЦНИИ «Электроника», 1988, вып. 4 (1342)).
4. Моряков О.С. *Обзоры по электронной технике. Сер. 2. Полупроводниковые приборы* (М.: ЦНИИ «Электроника», 1982, вып. 1 (857)).
5. Баранов В.В., Парашук В.В., Рябцев Г.И. и др. *В сб. матер. V Междуна. науч.-техн. конф. «Проблемы проектирования и производства РЭС»* (Новополоцк: изд-е ПГУ, 2008, т. 1, с. 32–35).
6. Рябцев Г.И., Батай Л.Е., Парашук В.В. и др. *Lithuan. J. Phys.*, **39** (4–5), 389 (1999).