

ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(12)

РЕСПУБЛИКА БЕЛАРУСЬ



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ
СОБСТВЕННОСТИ

(19) ВУ (11) 14404

(13) С1

(46) 2011.06.30

(51) МПК (2009)

H 01S 3/04

H 01S 5/00

H 01L 21/02

H 01L 33/00

(54) СПОСОБ ИЗГОТОВЛЕНИЯ АЛМАЗНОГО ТЕПЛОТВОДЯЩЕГО ОСНОВАНИЯ ДЛЯ ЛАЗЕРНЫХ ДИОДНЫХ СТРУКТУР

(21) Номер заявки: а 20090892

(22) 2009.06.18

(43) 2011.02.28

(71) Заявители: Государственное научное учреждение "Институт физики имени Б.И.Степанова Национальной академии наук Беларуси"; Учреждение образования "Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники" (ВУ)

(72) Авторы: Баранов Валентин Владимирович; Беляева Ада Казимировна; Парашук Валентин Владимирович; Рябцев Геннадий Иванович; Телеш Евгений Владимирович (ВУ)

(73) Патентообладатель: Государственное научное учреждение "Институт физики имени Б.И.Степанова Национальной академии наук Беларуси"; Учреждение образования "Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники" (ВУ)

(56) US 4425195, 1984.

RU 2285977 C1, 2006.

SU 855793, 1981.

CN 1365169 A, 2002.

WO 01/26153 A1.

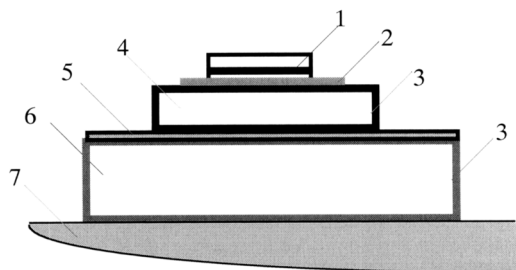
JP 60127750 A, 1985.

ЛАНИН В. и др. Силовая электроника. - 2008. - № 3. - С. 120-124.

ДУХНОВСКИЙ М.П. и др. Электронная техника. - Сер. 1, СВЧ-техника, 2008. - Вып. 1. - С. 3-7.

(57)

Способ изготовления алмазного теплоотводящего основания для лазерных диодных структур, включающий металлизацию поверхностей основания и присоединение его к медному хладопроводу, отличающийся тем, что нагревают основание до температуры 200-350 °С, выполняют металлизацию ионно-лучевым напылением с предварительной очисткой пучком ионов аргона в едином цикле и формируют на двух рабочих и, по меньшей мере, одной боковой поверхностях основания металлические слои титан-никель толщиной 0,02 и 0,3 мкм соответственно с последующим наращиванием слоя никеля до толщины 0,2-0,3 мкм и термическим отжигом в вакууме либо без него при температуре 400-450 °С в течение 30-40 мин.



Фиг. 1

Изобретение относится к квантовой электронике, полупроводниковой и оптоэлектронной технологии, в частности к технологии изготовления когерентных излучателей для систем накачки мощных твердотельных лазеров, создания медицинской аппаратуры, лазерного технологического оборудования и других целей.

Мощные лазерные диоды и лазерные диодные линейки (структуры), излучающие световую мощность от единиц до десятков и сотен ватт в непрерывном режиме, требуют интенсивного отведения тепла от активной области полупроводниковой гетероструктуры. Создание таких мощных излучающих структур является одним из приоритетных направлений развития мирового лазерного приборостроения. Получение высоких выходных мощностей напрямую связано с решением проблемы отвода тепла от активного слоя структуры.

Известны различные способы изготовления теплоотводов для электронных и оптоэлектронных компонентов, в том числе диодных лазеров, путем крепления активного элемента на предварительно металлизированной контактной пластине из алмаза [1, 2]. При этом основная проблема эффективного использования металлизированной контактной пластины из алмазного теплоотводящего основания (АТО) заключается в необходимости обеспечения высокой степени адгезии покрытия при достаточно большой величине его электрической проводимости, не вызывающей существенного джоулевого нагрева основания. Кроме этого, требуется однородность адгезии по отношению ко всем основным поверхностям основания - монтажной, посадочной (противоположной монтажной) и боковым, которые обеспечивают электрическую связь первых двух поверхностей при минимальном удельном сопротивлении металлического покрытия.

Наиболее близким к заявляемому по технической сущности является способ изготовления алмазного теплоотводящего основания, включающий операции металлизации алмаза, установки его на базовую пластину, нанесения гальваническим способом на рабочие поверхности теплоотводящего основания вторичного металлического слоя (слоев) и проволочного соединения сформированных поверхностей [3]. Используемый в данном способе процесс металлизации не обеспечивает необходимую степень адгезии как первичного, так и вторичного металлического покрытия рабочих поверхностей теплоотводящего основания. Способ их электрического соединения при помощи проволок обуславливает дополнительный, помимо основных тепловых процессов в активном элементе, джоулев нагрев (за счет конечного их сопротивления, неомичности контактов и т.п.). Сам способ является трудоемким и ненадежным.

Задачей изобретения является повышение адгезии алмазного основания, качества и надежности контактного соединения с активным элементом и улучшение на этой основе выходных характеристик лазера.

Поставленная задача решается следующим образом. В способе изготовления алмазного теплоотводящего основания для лазерных диодных структур, включающем металлизацию поверхностей основания и присоединение его к медному хладопроводу, нагревают основание до температуры 200-350 °С, выполняют металлизацию ионно-лучевым напылением с предварительной очисткой пучком ионов аргона в едином цикле и формируют на двух рабочих и, по меньшей мере, одной боковой поверхностях основания металлические слои титан-никель толщиной 0,02 и 0,3 мкм соответственно с последующим наращиванием слоя никеля до толщины 0,2-0,3 мкм и термическим отжигом в вакууме либо без него при температуре 400-450 °С в течение 30-40 мин.

При этом достигнуто однородное высокоадгезионное металлическое покрытие алмазных оснований с требуемым низким удельным сопротивлением на всех экспонируемых поверхностях основания. Похожие результаты получены и для систем Ti-Al-Ni и Cr-Ni-Ni.

Сущность предлагаемого изобретения поясняется чертежами, где:

на фиг. 1 показано схематическое изображение сборки лазерной гетероструктуры на алмажном теплоотводящем основании;

ВУ 14404 С1 2011.06.30

на фиг. 2 - ватт-амперные характеристики лазерных диодов, собранных на алмазных основаниях и на медных хладопроводах;

на фиг. 3 - ватт-амперные характеристики лазерных диодов, собранных на алмазных (А), медных (М) основаниях с использованием термообработки;

на фиг. 4 - сравнительные ватт-амперные характеристики лазерных диодов, собранных на синтетических и природных алмазных теплоотводах;

на фиг. 5 - сравнительные ватт-амперные характеристики лазерных диодных линеек на медных и алмазных основаниях.

Изготовление алмазного теплоотводящего основания для лазерных диодных структур заключается в том, что процесс металлизации АТО выполняют ионно-лучевым напылением с предварительной очисткой пучком ионов аргона в едином (непрерывном) цикле, в условиях безмасляной откачки рабочего вакуума при нагреве основания до температуры $T = 200-350\text{ }^{\circ}\text{C}$, по крайней мере на двух рабочих поверхностях и одной боковой формируют титан-никелевые металлические слои толщиной соответственно ~ 20 и 300 нм с последующим наращиванием слоя никеля до толщины $0,2-0,3$ мкм (контактный слой) и термическим отжигом в вакууме либо без него при $T = 400-450\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение времени $t = 30-40$ мин. Затем присоединяют АТО к медному (внешнему) хладопроводу путем напайки припоем типа ПОС-61 в восстановительной среде (очищенный водород H_2). Композиционный припой наносят на посадочную поверхность алмазного теплоотводящего основания методом вакуумного терморезистивного напыления или иным способом (толщина слоя $4-6$ мкм). После этого на монтажную поверхность теплоотводящего основания наносят тем же способом слой индия толщиной $3-5$ мкм. С использованием микроскопа выполняют позиционирование активного элемента - единичного лазерного диода или линейки в виде полоски длиной L с заданной точностью в рабочей области монтажной поверхности. Полученную структуру помещают в специальную кассету и загружают в кварцевую камеру (реактор) печи, и осуществляют припаивание в восстановительной среде в ускоренном режиме с временем нагрева/охлаждения $t = 3-5$ мин при температуре $T_{\text{max}} \geq T_{\text{ликв}} + (50-70)\text{ }^{\circ}\text{C}$, где $T_{\text{ликв}}$ - температура ликвидуса материала ($T_{\text{ликв}} \approx 190\text{ }^{\circ}\text{C}$ для ПОС-61, $156,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ для In). Конструкция кассеты позволяет осуществлять процесс сплавления как в условиях заданной механической нагрузки, так и без нее. При этом соблюдают минимальный технологический перерыв между основными операциями сборки лазера - не более 1 ч, а также необходимые микроклиматические условия.

Контролировались качество металлического покрытия АТО (степень адгезии, однородность), его электропроводность и тепловые характеристики - тепловое сопротивление и теплопроводность - как визуально, так и с использованием микроскопа путем демонтирования соединяемых элементов и испытанием адгезии по усилию отрыва (метод "нормального отрыва", стендовый динамометр) или способом "царапания" (микроскопы МИМ-7, МИИ-4). Теплопроводность алмазных оснований оценивалась путем исследования теплопереноса через образец на установке типа УКТ-3 до и после процесса металлизации с точностью $\sim 20\%$.

Технический результат изобретения - существенное повышение адгезии алмазного теплоотводящего основания, качества и надежности контактного соединения с активным элементом. Все это приводит к улучшению основных характеристик лазера - тепловых режимов, выходной мощности излучения, снижению пороговых токов и расширению рабочего (линейного) участка ватт-амперной характеристики.

Для изготовления АТО для мощных ЛД и ЛДЛ использовались монокристаллы синтетического алмаза (МСТМ "Алмазот"), выращенные 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. Полировка АТО осуществлялась с доведением шероховатости поверхности до значений $2,8-12,8$ нм. Использовались и природные алмазные образцы, а также поликристалличе-

ВУ 14404 С1 2011.06.30

ские синтетические алмазные основания, выращенные модифицированным CVD-методом (Chemical Vapour Deposition, напыление путем химической газотранспортной реакции), с размерами $\sim 12 \times 2,5 \times 0,3$ мм, а также меньших размеров, - впрессованные в медные теплоотводящие основания и допускающие обработку всего одной или двух поверхностей.

Пример 1.

В процессе сборки на начальном этапе использовались теплоотводы из природного алмаза и лазерные диоды на основе InGaAs/AlGaAs гетероструктур с квантовой ямой и шириной полоскового контакта ~ 100 мкм без напыленных зеркал резонатора. АТО имело коэффициент теплопроводности ~ 1400 Вт/м·К, его размер ($\sim 1,5 \times 1,5 \times 0,3$ мм) соответствовал оптимальным с точки зрения результатов моделирования в нем теплового процесса [4]. Характеристики инжекционных лазеров, собранных с применением алмазных оснований, сравнивались с параметрами приборов, собранных при тех же условиях непосредственно на медном хладопроводе. На фиг. 1 схематически изображена сборка лазерного диода на алмазном теплоотводящем основании, где 1 - мощная гетероструктура, 2 - слой индия, 3 - слой никеля, 4 - алмазное теплоотводящее основание, 5 - слой высокотемпературного припоя, 6 - медный хладопровод, 7 - внешний радиатор.

В таблице представлены величины тепловых сопротивлений (R_T) исследованных приборов, определенных по температурному смещению длины волны генерации. Значения R_T рассчитывались на основании измерений температурного смещения длины волны генерации лазерного диода при его кратковременном разогреве калиброванными прямоугольными импульсами тока ($I = 500$ мА, длительность - 1,5 мкс, частота следования импульсов накачки - 1 кГц). Номерами А2-А11 обозначены образцы лазерных диодов, собранных на алмазных основаниях, металлизированных методом термического напыления. Образцы А4Б, А5Б собраны на АТО, металлизированных методом химического осаждения Ni из раствора. Образцы М2-М5, М12 напаивались непосредственно на никелированное медное основание. Знаками "+"/"-" отмечено наличие или отсутствие технологических операций.

Как видно из таблицы, операция отжига АТО после металлизации, ведущая к структурным изменениям Ni и повышению твердости покрытия, позволяет снизить величину общего теплового сопротивления диодного лазера в среднем на 30 %. Кроме того, использование при напаивании лазерного кристалла механической нагрузки (~ 1 г) обеспечивает дополнительное снижение R_T .

№ образца	R_T , К/Вт	Отжиг теплоотвода	Механическая нагрузка на лазерный кристалл
М2	5,3	+	-
М3	6,5	+	-
М4	5,6	+	-
М5	4,7	+	-
М12	2,6	+	+
А2	7,1	-	-
А3	6,0	-	-
А4Б	5,5	-	-
А5Б	5,7	-	-
А6	4,4	+	-
А7	4,6	+	-
А8	4,6	+	-
А9	3,7	+	-
А10	4,0	+	-
А11	3,8	+	+

ВУ 14404 С1 2011.06.30

Исследовалась зависимость мощности P излучения, генерируемого лазерным диодом в непрерывном режиме, от тока накачки I в широком диапазоне - вплоть до полной деградации, и сравнивались ватт-амперные характеристики лазерных диодов, собранных на алмазном основании (А) и на медном хладопроводе (М) (фиг. 2). При этом измерение мощности осуществлялось в одном направлении. Из данных измерений следует, что в целом лазерные диоды с АТО деградируют при более высоких уровнях накачки. Наблюдаемый разброс данных в определенной мере обусловлен разбросом адгезионных свойств пленочных покрытий АТО, зависящих от используемого процесса металлизации и влияющих на общее тепловое сопротивление прибора. Кроме того, видно, что образцы без алмазных оснований, как правило, деградируют с ростом тока накачки тем раньше, чем ниже наклон линейного участка их характеристики, являющейся интегральным показателем качества диода. При наличии основания (образец А3) достигнуты большие примерно на 20 % предельные токи, несмотря на то что в этом случае наклон ВАХ меньше, чем у лучшего образца без подложки (М3, $P_{\max} \approx 919$ мВт). Этот факт объясняется более высокой эффективностью алмазных теплоотводящих оснований по сравнению с медными.

Последовательное применение технологических операций, оптимизирующих в целом процесс сборки лазерных диодов на АТО (использование высокотемпературного твердого припоя типа ПОС-61 вместо индиевого, отжиг АТО после металлизации, напаивание лазерного диода на АТО при механической нагрузке), позволило увеличить выходную мощность ЛД до 900 мВт (суммарная мощность излучения из двух граней резонатора ЛД - 1,8 Вт) при токе накачки $\sim 2,0$ А. Следует отметить, что припой типа ПОС-61 характеризуется большим коэффициентом теплопроводности и более высокими температурой плавления и прочностью, чем у индия, что необходимо для повышения надежности работы мощных ЛД, особенно при высоких температурах окружающей среды. В этом случае результирующая мощность генерации превысила величину $\sim 2,5$ Вт (фиг. 3, обр. А3).

Пример 2.

Использовались теплоотводящее основание на основе искусственных алмазов и лазерные диоды, аналогичные примеру 1. Измеренные значения теплопроводности неметаллизированных АТО, используемых в наших экспериментах, находились в диапазоне 600-1400 Вт/м·К. Напыление пленки Ti/Ni ионно-лучевым распылением производилось на установке Z-400 "Leybold-Heraeus" с безмасляной откачкой при рабочем давлении $7,8 \cdot 10^{-2}$ Па после нагрева алмазного основания до температуры 200-350 °С. Металлизация производилась с помощью специальной распылительной системы, позволяющей перед нанесением пленок производить обработку поверхности пучком ионов аргона с энергией порядка 1 кэВ. Это позволяло удалить с поверхности алмаза загрязнения и нарушенные приповерхностные слои с низким сцеплением и обеспечивало величину адгезии наносимой металлической пленки на уровне энергии межатомных связей. Толщина пленок титана составляла 20 нм при скорости напыления 0,2-0,25 нм/с, никеля - 300 нм при скорости напыления 0,35 нм/с.

Ватт-амперные характеристики изготовленных лазерных диодов, собранных на алмазных основаниях с использованием термообработки, приведены на фиг. 4, где указаны данные для теплоотводов из синтетических (1, 2) и природных (3, 4) алмазов.

Исследование показывает, что мощностные характеристики приборов, собранных на теплоотводящих основаниях из синтетического алмаза, металлизированных методом ионно-лучевого распыления Ni, близки к характеристикам таких же лазерных диодов, собранных на теплоотводящих основаниях из природного алмаза с коэффициентом теплопроводности ~ 1400 Вт/м·К. Измеренные величины адгезии для различных образцов находятся в пределах 5-30 МПа. Разброс значений величины 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.

Пример 3.

Рассмотрена возможность получения высокоэффективной генерации света лазерных диодных линеек длиной до 3 мм на основе гетероструктур типа InGaAs/AlGaAs/GaAs, излучающих на длине волны ~ 810 нм мощные импульсы света миллисекундной длительности в широком диапазоне амплитуд возбуждающих импульсов (до 150-200 А) при частоте следования до ~ 10 Гц. Изучена эффективность применяемых в лазерной системе алмазных теплоотводящих оснований из выращенных модифицированным CVD-методом поликристаллов. При этом рассмотрены два метода соединения алмазного основания с медной подложкой: один с использованием традиционной технологии металлизации и последующего припаивания, другой - способом впрессовки.

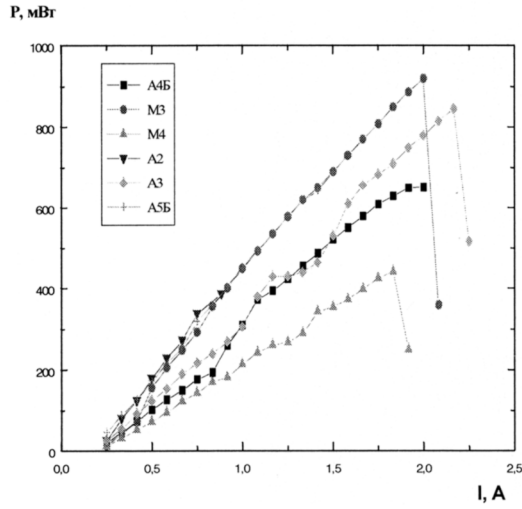
Сравнительные результаты исследования ватт-амперных характеристик ЛДЛ, собранных с использованием указанных АТО, а также на основе искусственных монокристаллов и медных оснований, показаны на фиг. 5. Здесь а) - образец на медном основании, б) - на алмажном основании; $T = 300$ К, ширина ближнего поля ЛДЛ - 1,7 (а) и 3 мм (б); частота следования импульсов тока накачки - 10 Гц, длительность импульсов тока - 30 (1), 50 (2), 100 (3-5) и 500 (6) мкс; кривые 1-4 получены для образцов, не прошедших наработку, кривые 5 и 6 - для образца на АТО после наработки.

Установлено, что при частотах следования импульсов тока накачки до ~ 10 Гц и прочих равных условиях рабочая область ЛДЛ на основе алмазного теплоотводящего основания достигает до $\tau \leq 5$ мс, в то время как медные основания позволяют работать в ограниченной области длительностей возбуждающих импульсов $\tau \leq 100$ мкс. Наиболее эффективными в данном случае оказались АТО из монокристаллов, метод впрессовки поликристаллов дает сравнимые и несколько худшие результаты, однако отличается большей технологичностью и менее трудоемок. Полученные значения удельной выходной мощности ≥ 10 Вт на 1 мм длины линейки указывают на то, что при ширине ближнего поля (длине линейки) порядка 10-11 мм может быть достигнута выходная мощность ЛДЛ свыше 100 Вт в импульсном режиме, что свидетельствует о перспективности использования алмазных технологий в предлагаемых к разработке мощных линейках диодных лазеров.

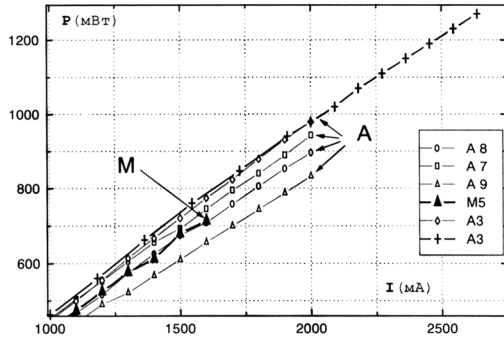
Таким образом, повышение эффективности лазерных диодных структур с использованием современных теплопередающих материалов (искусственных алмазов) и технологий формирования высокоадгезионных металлических покрытий позволяет разрабатывать и создавать опытные образцы мощных лазерных диодных структур, в том числе линеек инжекционных лазеров, с высокоэффективным теплоотводом на основе алмаза, обладающих улучшенными базовыми характеристиками, для широкого круга практических применений и недорогих при их последующем освоении в серийном производстве.

Источники информации:

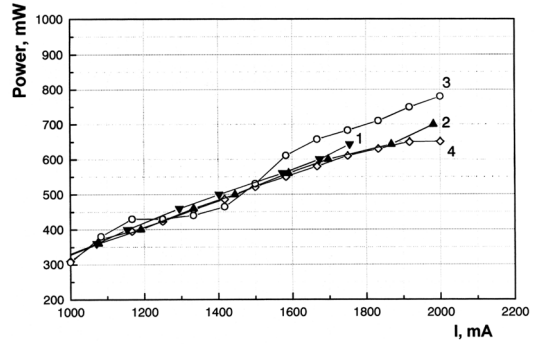
1. Патент US 6924170, 2005.
2. Патент US 6007730, 1999.
3. Патент US 4425195, 1984.
4. Рябцев Г.И., Паращук В.В. и др. Lithuanian // Journal of Physics. - 1999. - V. 39. - No. 4-5. - P. 389-394.



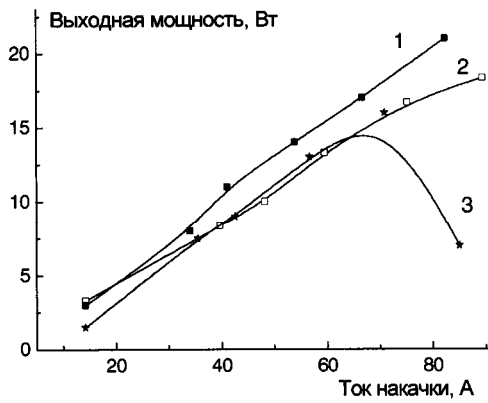
Фиг. 2



Фиг. 3



Фиг. 4



а)



б)

Фиг. 5