

Алмазные теплоотводы

для изделий электроники повышенной мощности

Проблемы отвода тепла в изделиях силовой электроники приобретают особую актуальность в связи с повышением плотности упаковки тепловыделяющих электронных компонентов. Применение теплоотводов на основе алмазоподобных пленок позволит значительно улучшить тепловые характеристики таких приборов. Для обеспечения эффективной работы необходим выбор конструкции теплоотвода и технологии формирования металлизационных слоев.

Владимир Ланин

vlanin@bsuir.by

Евгений Телеш

etelesh@mail.ru

Проблемы теплоотвода в изделиях электроники

Проблема рассеяния тепла всегда является лимитирующей при конструировании изделий электроники (ИЭ) повышенной мощности. В процессах теплопередачи выделяют три принципиально различных способа передачи теплоты: используя свойства теплопроводности, путем теплового излучения либо конвекции. Эти виды теплообмена в реальных условиях связаны между собой и проявляются одновременно. Однако максимальный вклад в процессы теплообмена вносит теплопроводность. Поэтому одним из возможных путей решения проблемы рассеяния тепла при конструировании ИЭ повышенной мощности является создание теплоотводов, обладающих высокими электроизоляционными свойствами и вместе с тем хорошей теплопроводностью. Эту задачу можно решить следующими способами:

1. На поверхность металла с высокой теплопроводностью нанести слой керамики, стекла или органического изолирующего вещества;
2. Применить керамические или кристаллические теплоотводы с высокой теплопроводностью.

Более перспективен первый способ, однако для разработки конструкции пленочного теплоотвода необходимо обоснованно выбрать материалы для основания и слоев теплоотвода, разработать технологию формирования слоев, оптимизировать режимы их получения с заданными характеристиками.

К традиционным системам охлаждения относят радиаторы с пассивным и активным отводом тепла от нагретой поверхности, которые обеспечивают интенсивный теплообмен электронного устройства с окружающей средой. Площадь поверхности электронного устройства чрезвычайно мала (несколько квадратных сантиметров) и недостаточна для эффективного отвода тепловой мощности. Благодаря своей оребренной поверхности радиатор в сотни и даже тысячи раз увеличивает площадь его теплового контакта с окружающей средой, способствуя интенсивному теплообмену и кардинальному снижению

рабочей температуры. Термическое сопротивление радиатора выражается соотношением:

$$R_t = (T_n - T_o) / P_m, \quad (1)$$

где T_n — температура нагретой зоны электронного устройства; T_o — температура окружающей среды; P_m — тепловая мощность электронного устройства.

На практике термическое сопротивление радиатора во многом зависит не только от площади оребренной поверхности, но и от его конструктивных особенностей и технологии изготовления. Наиболее дешевы алюминиевые радиаторы (рис. 1а), изготавливаемые методом экструзии (прессования), который позволяет получить достаточно сложный профиль оребренной поверхности и достичь хороших теплоотводящих свойств.

Складчатые радиаторы отличаются технологическим исполнением: на базовой пластине радиатора пайкой (или адгезионными теплопроводящими пастами) закрепляют тонкую металлическую ленту, свернутую в гармошку, складки которой играют роль своеобразной оребренной поверхности. Эта технология позволяет получать изделия компактных размеров и с высокой тепловой эффективностью (рис. 1б).

Наилучшей тепловой эффективностью отличаются радиаторы, полученные прецизионной механической обработкой монолитных заготовок на специали-

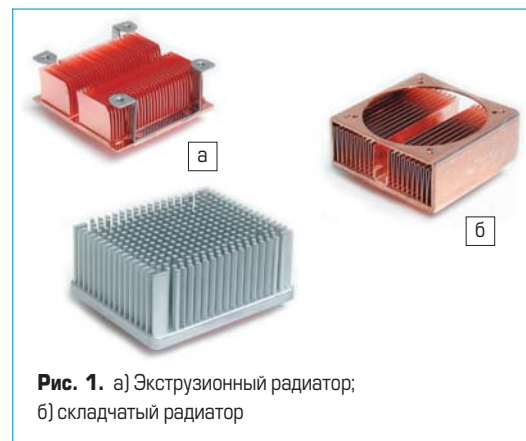


Рис. 1. а) Экструзионный радиатор; б) складчатый радиатор

зированных станках с ЧПУ. Однако себестоимость таких радиаторов достаточно высока.

Для снижения термического сопротивления радиатора создают условия вынужденной конвекции теплоносителя с помощью вентилятора, который продувает его внутреннее межреберное пространство.

Жидкостное охлаждение позволяет гораздо лучше отводить тепло от нагреваемого элемента, чем система воздушного охлаждения. Снижение шума и тепловыделения в окружающую среду дает определенные предпосылки для применения жидкостных систем для компьютерных изделий. Недостатками такой системы являются: сложность конструкции, увеличенная масса, меньшая надежность — при отказе одного из модулей система перестает функционировать.

Термоэлектрические холодильники, работа которых основана на использовании эффекта Пельтье, состоят из последовательно соединенных полупроводников *p*- и *n*-типа, образующих *p-n*- и *n-p*-переходы. Каждый из таких переходов имеет тепловой контакт с одним из двух радиаторов. В результате прохождения электрического тока определенной полярности образуется перепад температур между радиаторами модуля Пельтье: один радиатор работает как холодильник, другой радиатор нагревается и служит для отвода тепла. В зависимости от направления электрического тока через контакт полупроводников разного типа *p-n*- и *n-p*-переходов (рис. 2) вследствие взаимодействия зарядов, представленных электронами (*n*) и дырками (*p*), и их рекомбинации энергия либо поглощается, либо выделяется. В результате данных взаимодействий и порожденных энергетических процессов тепло либо поглощается, либо выделяется.

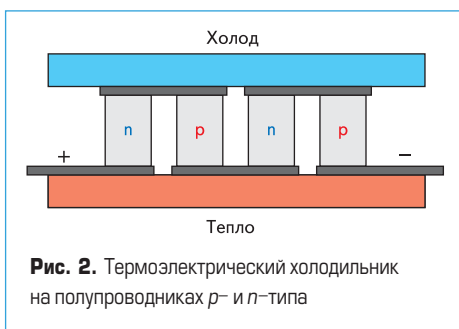


Рис. 2. Термоэлектрический холодильник на полупроводниках *p*- и *n*-типа

Модули Пельтье, применяемые в составе средств охлаждения электронных элементов, отличаются сравнительно высокой надежностью и, в отличие от холодильников, созданных по традиционной технологии, не имеют движущихся частей. Для увеличения эффективности своей работы они допускают каскадное использование, что позволяет довести температуру электронных элементов до отрицательных значений даже при их значительной мощности рассеяния.

Тепло Пельтье, как показали экспериментальные исследования, можно выразить формулой:

$$Q_n = \Pi \times q, \quad (2)$$

где q — количество прошедшего электричества за единицу времени; Π — коэффициент

Пельтье, величина которого зависит от природы контактирующих материалов и от их температуры.

Однако кроме очевидных преимуществ модули Пельтье обладают и рядом специфических свойств, которые необходимо учитывать при их использовании в составе охлаждающих средств. Выделяя в процессе своей работы большое количество тепла, они требуют наличия радиаторов и вентиляторов, способных эффективно отводить избыточное тепло от охлаждающих модулей. Термоэлектрические модули отличаются низким КПД и, выполняя функции теплового насоса, сами являются мощными источниками тепла и создают дополнительную нагрузку для цепей питания.

Низкие температуры, возникающие в процессе работы холодильников Пельтье, способствуют конденсации влаги из воздуха, что представляет опасность для электронных компонентов, так как конденсат может вызвать короткие замыкания между элементами.

Конструкции алмазных теплоотводов

Прогрессирующая микроминиатюризация поставила на повестку дня проблему, связанную с отводом тепла от полупроводниковых приборов. Площадь теплоотвода для миниатюрного полупроводника крайне мала (50–100 мкм²), а плотности рассеиваемой мощности могут достигать до $1,6 \times 10^5$ Вт/мм², поэтому рассеяние тепла с помощью обычных материалов (медь, алюминий, окись бериллия и т. д.) оказывается недостаточным. При микроминиатюризации электронных и твердотельных приборов возникает проблема теплового рассеяния внутри самих приборов. Если полная мощность прибора должна сохраняться постоянной, то уменьшение его в размерах будет неизменно сопровождаться увеличением плотности мощности.

Теплоотводы из меди или алюминия обычно в несколько раз превосходят по размерам охлаждаемый элемент. Применение таких теплоотводов позволяет достичь эффективного охлаждения, однако в случае микроминиатюрных полупроводниковых приборов площадь контакта теплового экрана оказывается настолько малой, что рассеяние тепла теплоотводами из таких материалов иногда оказывается недостаточным. В настоящее время все более широкое применение находят алмазные теплоотводы, основанные на высокой теплопроводности алмаза [1]. Применение алмазов в качестве теплоотводов для микроминиатюрных полупроводниковых приборов может значительно улучшить тепловые характеристики таких приборов. Тепловая проводимость алмаза в зависимости от его разновидностей в 2–5 раз превосходит этот параметр для меди (таблица 1).

Алмазный теплоотвод обладает способностью рассеяния намного большей удельной тепловой мощности, чем у обычных теплоотводящих материалов, поэтому мощные полупроводниковые приборы, оснащенные алмазными теплоотводами, могут работать с повышенной

Таблица 1. Теплопроводность алмазов и других материалов

Материал	Температура, °С	Теплопроводность, Вт/(мК)
Алмаз	20	2000
Медь	20	384
Алюминий	20	209
Сталь	20	47
Карбид кремния	40	21,5
Окись алюминия	100	6,9

полезной мощностью на выходе. Алмазные теплоотводы находят применение для транзисторов большой мощности, диодов Ганна, интегральных схем повышенной мощности, полупроводниковых лазеров, лавинно-пролетных диодов, варикапов и переключающих полупроводниковых приборов [2].

Основным несущим слоем алмазного теплоотвода (рис. 3) является медный хладопровод, адгезионными слоями являются карбид титана или титан, диэлектрическим слоем служит алмазоподобная пленка (АПП), а токопроводящим слоем является никель или монель (NiCu — 18%). Использование монеля обусловлено тем, что никель обладает магнитными свойствами, поэтому его нельзя использовать в установках магнетронного напыления, а добавление 18% меди позволяет использовать монель в установках магнетронного напыления, не ухудшая характеристик никеля.

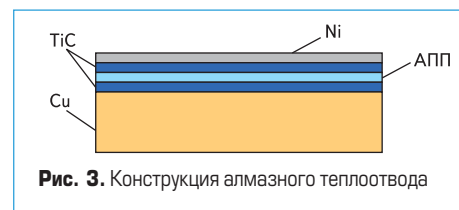


Рис. 3. Конструкция алмазного теплоотвода

Существуют две группы способов получения алмаза из газовой фазы: высокотемпературные, при которых могут быть созданы поликристаллические алмазные пленки, и низкотемпературные, позволяющие получать алмазоподобные пленки и пленки гидрогенизированного углерода. В таких пленках отсутствует дальний порядок, характерный для кристалла. Могут быть получены пленки с различными химическими связями, которые могут обладать рядом новых свойств, отличных от алмаза, графита и карбина. Анализ способов позволил сформулировать условия получения алмазных и алмазоподобных пленок:

- проведение процесса при больших пересыщениях, когда вероятность образования алмазного зародыша увеличивается;
 - предотвращение образования стабильной фазы углерода — графита, которого можно добиться путем: создания условий, когда образование графитовой структуры затруднено в силу кинетических факторов; использования атомарного водорода, газифицирующего графит; использования ионных пучков;
 - сохранение образовавшейся алмазной фазы и предотвращение перехода ее в графит.
- Для нанесения АПП используют CVD (Chemical Vapor Depositions) процесс, основанный на разложении углеводородов в смеси с водородом и последующем осаждении алмаза на нагретую подложку [3]. Рабочая смесь

диссоциирует в вакуумной камере под действием электрического разряда, СВЧ-плазмы или лазерного излучения. Давление газа в камере составляет 30–100 Торр, скорость осаждения — 10–20 мкм/ч.

В настоящее время разработаны различные методы соединения алмаза с металлическими и полупроводниковыми материалами. Наиболее эффективны методы, при которых контактирующие поверхности алмазного теплоотвода предварительно металлизуются. Для металлизации лучше всего подходят такие металлы, как титан, цирконий, ванадий, ниобий и тантал, которые затем сплавляются с медью, серебром или золотом [4]. Имея сильное сродство с углеродом, они растворяются или взаимодействуют с ним в вакууме или в инертной атмосфере. Расплавленный металл вначале смачивает алмаз, удаляя с его поверхности кислород, и затем вступает во взаимодействие с поверхностью алмаза, протравливая ее и химически связываясь с ней.

Число материалов, пригодных для создания слоев металлизации, довольно велико (таблица 2), однако существует ряд требований, которые значительно сужают круг таких материалов. Теплопроводность материала должна быть возможно более высокой, чтобы не снижать общую теплопроводность, а удельное сопротивление — минимальным, так как перенос тепла осуществляется как за счет фононного, так и электронного механизмов. Температурный коэффициент линейного расширения должен быть максимально близок к ТКЛР алмаза ($9-15) \times 10^{-7} 1/^\circ\text{C}$.

Выполнение этого условия предотвращает возникновение механических напряжений в напыленных пленках и способствует устранению эффектов, вызывающих их отслоение от алмазного основания. Материал адгезионного слоя должен обладать высоким сродством с углеродом и образовывать с ним высокоадгезионные соединения. Специфические требования к проводящему слою состоят в необходимости обеспечения хорошей паяемости, т. е. в создании условий для хорошего растекания припоя и смачивания им поверхности.

Таблица 2. Параметры материалов, применяемых для создания металлизации

Материал	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Удельное объемное сопротивление, 10^{-6} Ом·см	ТКЛР, 10^{-6} К ⁻¹
Al	209	2,7	23,5
Cu	384	1,67	17
Ag	407	1,6	18,7
Mo	138	5,4	5,1
W	154	5,5	4,5
Au	310	2,3	14
Ta	45,2	13,5	7
Ti	22	4,2	18,1
Fe	74	10	16,7
Co	69,5	9,7	17,9
Ni	67	6,9	13,2
Pt	74	10,6	8,9
Pd	72	10,8	12,5

Для адгезионных слоев металлизации алмазов применяют металлы, имеющие сильное сродство с углеродом, которые растворяются или взаимодействуют с ним. Разработаны адгезионно-активные сплавы, обеспечивающие прочное крепление алмазов к металлическим основаниям, уменьшение термических напряжений и имеющие температуру плавления в интервале 800–950 °С, что предохраняет алмазы от графитизации. К адгезионно-активным металлам относят титан, хром, цирконий, ниобий и тантал, которые поэтому и являются наиболее предпочтительными для создания адгезионных слоев металлизации. Адгезионная активность молибдена, вольфрама и никеля для использования в качестве компонентов мала. Тугоплавкие металлы Mo и W обладают низким сопротивлением, высокой теплопроводностью и небольшим ТКЛР. Однако тонкие пленки данных металлов имеют тенденцию отслаиваться и растрескиваться, что не обеспечивает требуемой величины адгезии. Титан, тантал, гафний имеют более высокое электрическое сопротивление и низкую теплопроводность, но обладают высокой адгезионной способностью и легко соединяются с углеродом. Уникальными параметрами обладает карбид титана, который превосходит титан по электрофизическим и теплофизическим свойствам. Учитывая вышеперечисленные требования, в качестве материала для адгезионного слоя целесообразно применять титан и тантал.

Наиболее оптимальные свойства проводящего слоя металлизации достигаются при использовании таких материалов, как никель и его сплавы, медь и серебро, которые обладают высокой тепло- и электропроводностью, а также хорошо смачиваются припоями. Однако медь и серебро имеют сильную склонность к окислению, кроме того, медь может эффективно диффундировать в слой припоя вплоть до активной полупроводниковой структуры. Для предотвращения этого следует использовать барьерный слой. Таким образом, наиболее предпочтительным материалом для создания проводящего слоя металлизации является никель и его сплавы.

Формирование металлизации на алмазных теплоотводах

Из всего многообразия методов формирования слоев металлизации наиболее привлекательными являются вакуумные методы нанесения. Они обеспечивают наибольшую чистоту пленок, позволяют варьировать в широких пределах условия нанесения [5]. В последние годы все большее распространение получают ионно-лучевые методы получения тонких пленок, что объясняется преимуществами ионно-лучевых систем:

- пространственное разделение областей генерации плазмы и области конденсации материала;
- более высокая чистота пленок из-за снижения рабочего давления;
- минимальное воздействие вторичных электронов на подложку;
- возможность нанесения любых материалов.

Поэтому для формирования адгезионных и проводящих слоев металлизации используются методы ионно-лучевого и магнетронного распыления. Магнетронные распылительные системы позволяют повысить скорость осаждения при одновременном снижении радиационного воздействия электронов на подложку [6].

Вакуумная установка Z-400 фирмы Leybold-Heгаeus для обработки методами ионной бомбардировки содержала устройства для возбуждения и поддержания газового разряда, натекатели для подачи плазмообразующих газов, мощные источники питания. Установка была оснащена ионно-лучевым и магнетронным распылительными устройствами. В качестве ионного источника использовался двухлучевой плазменный ускоритель с анодным слоем, который формировал два независимых пучка ионов: из верхней ступени в виде полого цилиндра и конусообразный из нижней ступени. Первый пучок предназначен для ионных очистки и бомбардировки, второй — для распыления мишени. Ионный источник был смонтирован в подколпачном объеме установки (рис. 4). Вакуумный объем откачивался турбомолекулярным насосом, что обеспечило получение остаточного вакуума 1×10^{-5} Торр. Для формирования адгезионного и проводящего слоев использовались соответственно мишени из Ti и Ni (Ni–18% Cu). Для нагрева подложек в процессе нанесения пленок использовался подложкодержатель, снабженный автономным нагревательным элементом



Рис. 4. Внешний вид подколпачного объема вакуумной установки Z-400

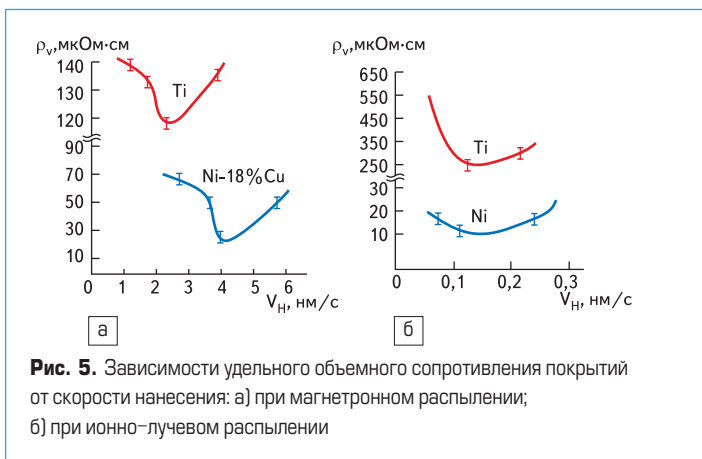


Рис. 5. Зависимости удельного объемного сопротивления покрытий от скорости нанесения: а) при магнетронном распылении; б) при ионно-лучевом распылении

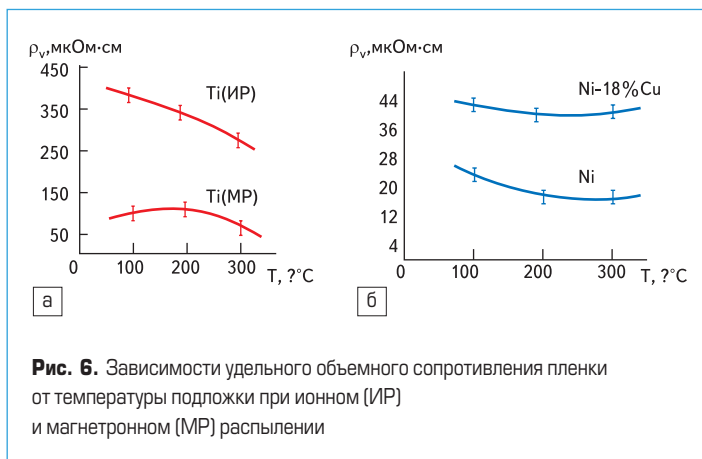


Рис. 6. Зависимости удельного объемного сопротивления пленки от температуры подложки при ионном (ИП) и магнетронном (МП) распылении

в виде поликорковой пластины с нихромовой проволокой.

Алмазоподобная пленка толщиной около 2 мкм наносилась на медный хладопровод, покрытый тонким адгезионным слоем. Осаждение АПП осуществлялось методом прямого осаждения из ионного пучка [7]. В качестве рабочего газа использовался пропан. Температура подложки не превышала 25 °С.

Вначале исследовалось влияние параметров процесса напыления на удельное объемное сопротивление покрытий ρ_v . Характер зависимости ρ_v от скорости нанесения V_n (рис. 5) можно объяснить следующим образом. При небольших скоростях нанесения повышенное значение ρ_v обуславливается большей степенью окисления растущей пленки. С ростом V_n действие этого эффекта убывает и ρ_v снижается. Увеличение ρ_v при больших скоростях нанесения объясняется, по-видимому, уменьшением плотности пленок.

Температура подложки в процессе нанесения пленок также оказывает некоторое влияние на удельное объемное сопротивление пленок, их структуру и адгезию (рис. 6). Пленки Ni, Ni-18% Cu, Ti наносились на подложки из окисленного кремния. Температура подложки варьировалась от 100 до 300 °С.

Исходя из полученных зависимостей, можно судить о том, что ρ_v пленок из никеля и сплава Ni-18% Cu незначительно зависит от температуры подложки, т. е. структура и состав этих пленок практически не изменяются. Что касается пленок из титана, то и здесь имеют место монотонные зависимости, что свидетельствует также об отсутствии качественных изменений в их структуре и составе.

На втором этапе исследовалось влияние энергии и тока бомбардирующего пучка ионов на адгезию и микроструктуру покрытий из Ti. Ускоряющее напряжение изменя-

лось от 1 до 2 кВ, а ток — от 5 до 15 мА. Адгезия оценивалась качественно (отрыв липкой ленты) и количественно методом нормального отрыва. Установлено, что ускоряющее напряжение не оказывает существенного влияния на величину адгезии, а увеличение тока ионного пучка приводило к значительному повышению адгезии. Так, при токе 5 мА адгезия составила 4,2 МПа, а при 15 мА — 6,8 МПа (таблица 3).

Таким образом, введение дополнительной энергии в зону конденсации за счет ионной бомбардировки способствует увеличению адгезии. Это можно объяснить повышением интенсивности десорбции и распыления инородных включений и загрязнений, активацией поверхности алмазоподобной пленки, радиационно-стимулированным внедрением атомов титана в подложку, повышением химической активности атомов металла, локальным разогревом поверхности подложки. Как следствие, результатом вышеперечисленных процессов будет являться формирование переходного слоя из карбида титана, что также способствует усилению адгезионных связей.

Исследование микроструктуры покрытий из титана с помощью атомно-силового микроскопа NT-206 (рис. 7) при нанесении в условиях облучения растущей пленки ионами аргона при ускоряющем напряжении 2 кВ и токе пучка 15 мА показало, что ионная бомбардировка способствует формированию плотной столбчатой структуры конденсата.

Для испытаний пленочных теплоотводов было применено термоциклирование, позволяющее выявить как скрытые конструктивные дефекты, так и дефекты в технологии, допущенные при изготовлении изделий. Устройство для термоциклирования состояло из блока нагрева и основания.

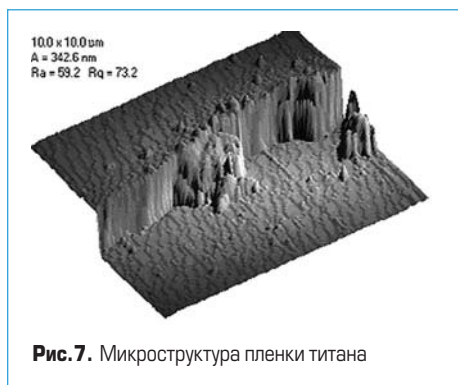


Рис. 7. Микроструктура пленки титана

Таблица 3. Влияние параметров ионного пучка на адгезию покрытий

Ускоряющее напряжение, кВ	Ток ионной бомбардировки, мА	Величина адгезии, МПа
1,0	10	4,8
1,5	10	4,9
2,0	10	5,0
2,0	5	4,2
2,0	15	6,8

Блок нагрева включал ИК нагреватель горизонтального типа с галогенной лампой накаливания КГ-500-220, расположенной внутри массивного отражателя, охлаждаемого проточной водой, что позволяло эксплуатировать лампу длительное время при максимальных тепловых нагрузках. Основание представляло платформу с каналами водяного охлаждения. Отражатель с лампой устанавливался над исследуемым образцом на вертикальной стойке с возможностью изменения расстояния между ними, что позволяло управлять скоростью нагрева. Верхняя плоскость основания отполирована для улучшения теплоотвода и на ней располагался образец. Электронный блок осуществлял автоматическое управление лампой для достижения заданной температуры на верхней плоскости основания.

Испытания проводились на образцах, имеющих двухслойную систему металлизации (адгезионный слой из титана толщиной 5 нм; проводящий слой никеля 500 нм), нанесенную на основание с алмазоподобной пленкой. Температура в одном цикле испытания изменялась от 15 до 200 °С, всего проведено 5000 циклов нагрев-охлаждение. В результате испытаний ни одна часть системы металлизации не отслоилась.

Теплопроводность системы оценивалась исследованием теплопереноса через образец на установке типа УКТ-3. Исследуемый образец помещался между алмазной пластиной прибора, которая разогревалась мощным транзистором, и алмазной иглой, охлаждаемой с помощью микрохолодильника Пельтье. Пластина и игла изготавливались из безазотного алмаза с теплопроводностью не ниже 2000 Вт/м·К. При установке иглы на исследуемый образец разность температур между алмазной пластиной прибора и иглой за счет обратной связи автоматически поддерживалась постоянной. Теплопроводность рассчитывалась из результатов измерений падения напряжения на коллекторе транзистора. Перед началом измерений установка калибровалась с помощью набора эталонных образцов с известной теплопроводностью (600, 1150 и 1800 Вт/м·К).

Измеренные значения теплопроводности алмазных пленочных теплоотводов (АТО) находились в диапазоне 600–1400 Вт/м·К (таблица 4). Полученные результаты показывают, что мощностные характеристики приборов, собранных на слоистых теплоотводах, близки к характеристикам лазерных диодов, собран-

Таблица 4. Результаты исследований теплопроводности

Ионно-лучевое распыление			Химическое осаждение		
№ образца	$\lambda_{ИСК}^*$, Вт/м·К	$\lambda_{МЕТ}^{**}$, Вт/м·К	№ образца	$\lambda_{ИСК}$, Вт/м·К	$\lambda_{МЕТ}$, Вт/м·К
1	949	657	2	600	109
3	1228	657	4	1078	154
5	903	533	Вакуумно-плазменное распыление		
6	900	894	7	1012	610

* $\lambda_{ИСК}$ — исходное значение теплопроводности неметаллизированного АТО.

** $\lambda_{МЕТ}$ — значение теплопроводности металлизированных АТО

ных на теплоотводящих основаниях из природного алмаза с теплопроводностью 1400 Вт/м·К.

Выводы

Применение алмазоподобных пленок в качестве теплоотводов для микроминиатюрных силовых полупроводниковых приборов может значительно улучшить тепловые ха-

рактеристики таких приборов, как СВЧ-транзисторы, полупроводниковые лазеры, диоды Ганна, и др. Проблема монтажа полупроводниковых кристаллов на алмазе является достаточно сложной ввиду низкого коэффициента теплового расширения алмаза и возникновения значительных механических напряжений в кристалле. Наиболее эффективны методы монтажа, при которых контактирующие поверхности алмазного теплоотвода предварительно металлизуются. Оптимальной является двухслойная система металлизации алмазного теплоотвода: адгезионный слой — пленка титана или карбида титана толщиной 0,05-0,1 мкм; проводящий слой — пленка никеля или его сплава с медью толщиной 0,3-0,8 мкм.

Литература

1. Моряков О. С. Алмазные теплоотводы в конструкции полупроводниковых приборов // Обзоры по электронной технике. Сер. Полупроводниковые приборы. М., 1982. Вып. 1(857).
2. Eden R. C. Applications of Diamond Substrates for Advanced Density Packaging // Diamond and Related Materials. 1993. N 3.
3. Ральченко В., Конов В. CVD-алмазы. Применение в электронике // Электроника: Наука. Технология. Бизнес. 2007. № 4.
4. Найдич Ю. В. Пайка и металлизация сверхтвердых материалов. Киев: Наукова думка, 1977.
5. Тхагопсоев Х. Г., Беров З. Ж., Гоов А. А. Металлизация природного алмаза катодным распылением // Алмазы и сверхтвердые материалы. 1976. № 10.
6. Телеш Е. В., Ильин А. В. Формирование адгезионных слоев к поверхностям с алмазоподобной структурой // Современные средства связи. Материалы IX международной научно-технической конференции. Нарочь, Беларусь. 2004.
7. Ланин В. Л., Достанко А. П., Телеш Е. В. Формирование токопроводящих контактных соединений в изделиях электроники. Минск: Издательский центр БГУ, 2007.