

Инновационный потенциал развития алмазных теплоотводов

Innovative development potential of diamond heat sinks

doi 10.26310/2071-3010.2021.276.10.001



В. В. Лучинин,

д. т. н., профессор, зав. кафедрой,
кафедра микро- и наноэлектроники
✉ cmid_leti@mail.ru

V. V. Luchinin,

doctor of technical sciences, professor,
head of the department of micro-
and nanoelectronics



О. С. Бохов,

к. т. н., начальник лаборатории,
Инжиниринговый центр микротехнологии
и диагностики (ИЦ ЦМИД)

O. S. Bokhov,

candidate of technical sciences,
head of the laboratory, Engineering center
of microtechnology and diagnostics (IC CMID)



С. Ю. Ильин,

к. т. н., научный сотрудник,
НОЦ «Нанотехнологии»
✉ isust@mail.ru

S. Yu. Ilyin,

PhD, researcher, SEC «Nanotechnology»

СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
ETU «LETI»

Представлен анализ современного состояния мирового и российского рынков производителей алмазных теплоотводов. Обсуждается динамика публикаций и патентов, оценен инновационный потенциал развития данного направления.

The analysis of the current state of the world and Russian markets of manufacturers of diamond heat sinks is presented. The dynamics of publications and patents are discussed, the innovative potential of the development of this direction is evaluated.

Ключевые слова: инновационный потенциал, алмазный теплоотвод, экстремальная электроника, рынок.

Keywords: innovation potential, diamond heat sink, extreme electronics, market.

Введение

Ключевые технологии цифровой экономики, будь то «большие данные», «искусственный интеллект» или «виртуальная реальность», безусловно, имеют материальную основу, базис, без которого невозможно создание, существование и функционирование носителей и продуктов этих технологий. Это означает экспоненциальный качественный и количественный рост электронных устройств всех уровней архитектуры — от микрочипов до глобальных сетевых решений.

Геополитические изменения мирового электронного рынка — ограничения поставок в Россию электронной компонентной базы, а также доступа к зарубежным технологиям, оборудованию и материалам — определяют жизненно необходимую потребность создания инновационной российской электроники, которая совмещает высокие характеристики, надежность и безотказное функционирование в широком диапазоне условий эксплуатации.

Миниатюризация (и одновременно возрастание удельной мощности и плотности упаковки) компонентов, микрочипов, модулей и блоков обостряет наиболее критичную проблему функционирования электронных устройств — отказ из-за перегрева. Тем самым критически возрастает значимость теплоотводов, возможности

которых отвечают потребностям, существующим и ожидаемым, электронных устройств [1-3].

Максимальную защиту электронных устройств с наиболее неблагоприятными условиями и режимами эксплуатации способны обеспечивать алмазные теплоотводы вследствие экстремального сочетания свойств (в первую очередь, механических, электрических и тепловых) самого алмаза и композитных материалов на его основе [4, 5].

Алмазные теплоотводы малой площади применимы для микроразмерных и субкомпактных электронных чипов и модулей, алмазные теплоотводы большой площади — для их совокупности в составе больших электронных устройств. Экономическая целесообразность алмазных теплоотводов и алмазных композитных теплоотводов, имеющих высокое соотношение «цена/качество», определяется в первую очередь возможностями производства монокристаллических и поликристаллических алмазных пластин, обладающих требуемыми характеристическими параметрами и геометрическими размерами.

Целью настоящей статьи является аналитическое рассмотрение современного состояния и инновационного потенциала отечественных и зарубежных алмазных и алмазных композитных теплоотводов для электроники с экстремальными режимами и условиями эксплуатации.

Рынок производителей алмазных теплоотводов

Отраслевая структура потребления в 2020 г. (рис. 1) [6] и прогноз стоимостного объема рынка до 2025 г. (рис. 2) [7] наглядно иллюстрируют основной тренд развития синтетической алмазной продукции — ускоренный рост спроса и потребления электронной отраслью монокристаллических и поликристаллических алмазных пластин, используемых (в том числе и как теплоотводы) на всех уровнях архитектуры существующих и перспективных электронных устройств.

Ведущие производители (согласно международным рейтингам) алмазных теплоотводов:

- Великобритания — «Element Six», «UniDiamond Superabrasives»;
- Индия — «Heyaru Group»;
- Китай — «Beijing Worldia Diamond Tools», «Hebei Plasma Diamond Technology», «Xiamen Powerway Advanced Material», «Zhengzhou Sino-Crystal Diamond»;
- Россия — «New Diamond Technology»;
- США — «Applied Diamond», «Delaware Diamond Knives», «Diamond Foundry», «Washington Diamonds Corporation», «Diamond Materials»;
- ФРГ — «Excellent Diamond Product»;
- Япония — «Sumitomo Electric Industries», «Tomei Diamond».

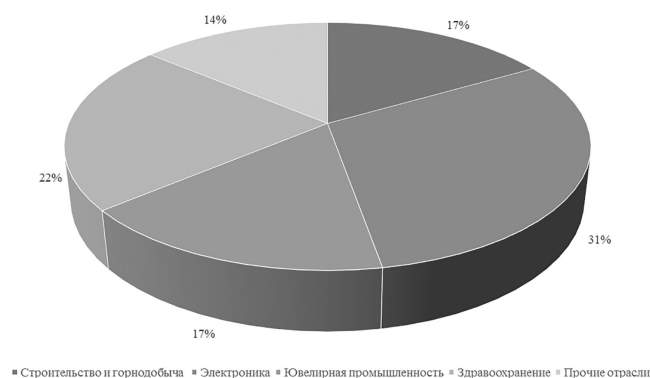


Рис. 1. Отраслевая структура мирового потребления синтетических алмазов

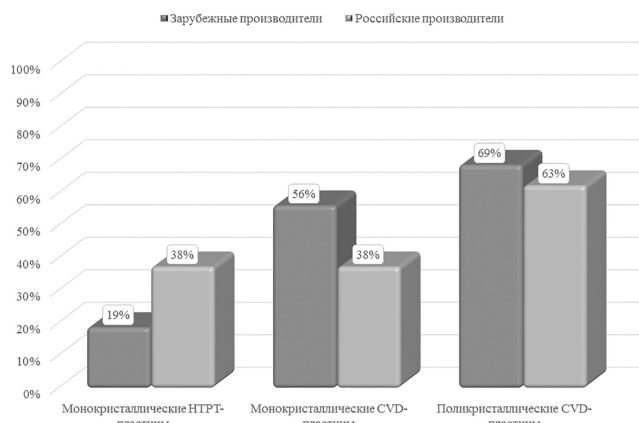


Рис. 3. Распределение производителей (доля в %) по технологиям алмазных пластин (доля в %)

Российские производители (не включенные в международные рейтинги) алмазных теплоотводов: «Синтез Технологджи», «ТВИНН», «ТИСНУМ», «Терекалмаз», «CVD SPARK», «FREZART», «Wonder technologies».

Распределение ведущих мировых производителей по странам отражает потребности рынков производства и сбыта электронной продукции стран, обладающих высоким технологическим потенциалом. В сочетании с ограниченным кругом ведущих игроков такое географическое распределение характеризует узкоспециализированный рынок высокотехнологичной продукции с высоким финансово-технологическим порогом входа.

Характеристические особенности продукции мировых и российских производителей алмазных теплоотводов представлены на рис. 3-10. Как видно из представленных рисунков, сопоставление российского и международного рынка производителей алмазных теплоотводов позитивно характеризует возможность формирования российской конструкторско-технологической ниши алмазных и алмазных композитных теплоотводов.

В целом зарубежный и российский рынки могут быть охарактеризованы следующим образом:

- преобладающий запрос на производство и использование алмазных CVD-теплоотводов¹ (рис. 3);

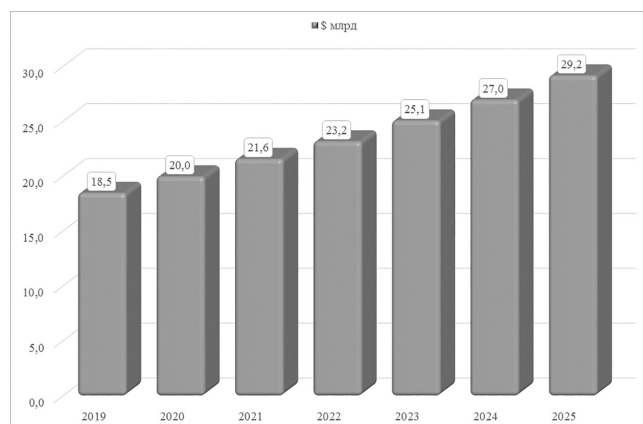


Рис. 2. Прогноз стоимостного объема мирового рынка синтетических алмазов, \$ млрд

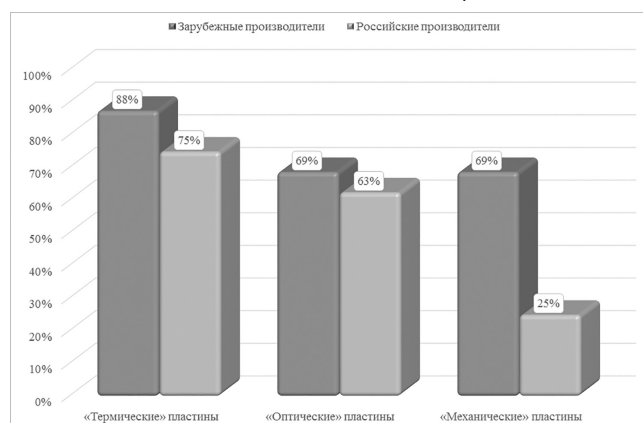


Рис. 4. Распределение производителей (доля в %) по функциональному назначению алмазных пластин

¹ CVD (chemical vapor deposition) — технология выращивания алмаза при низких давлениях.

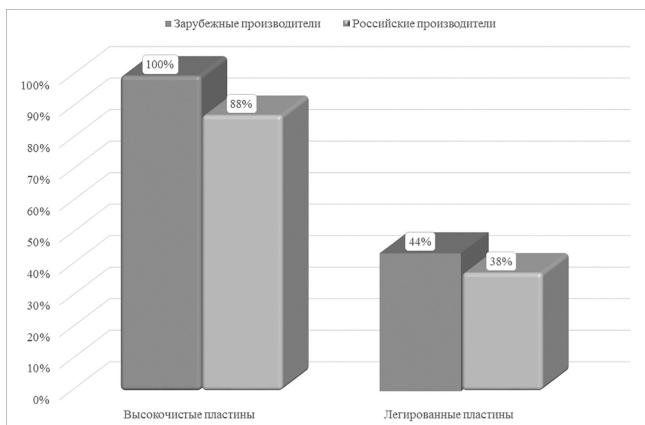


Рис. 5. Распределение производителей (доля в %) по физическим параметрам алмазных пластин

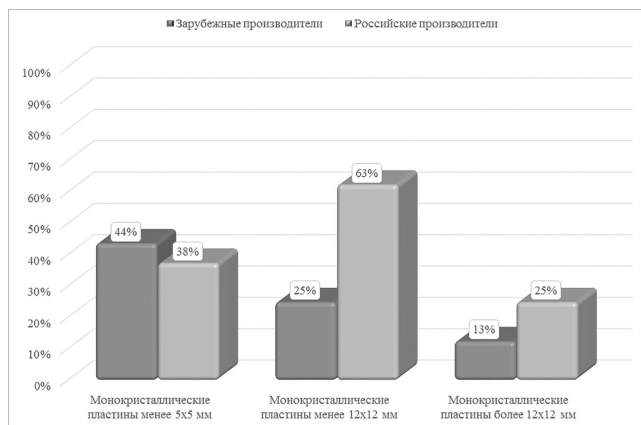


Рис. 6. Распределение производителей (доля в %) по размерам монокристаллических алмазных пластин

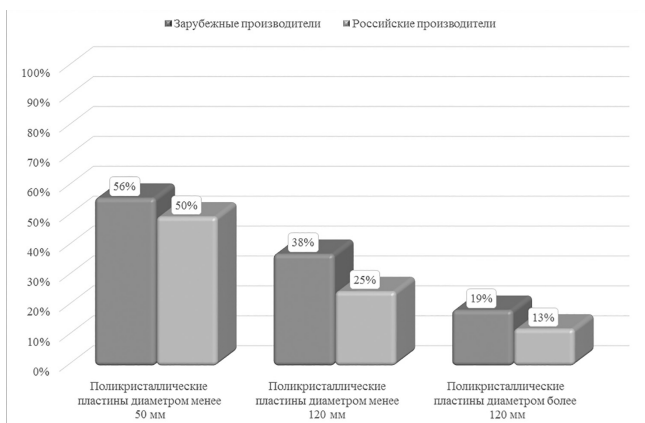


Рис. 7. Распределение производителей (доля в %) по размерам поликристаллических алмазных пластин

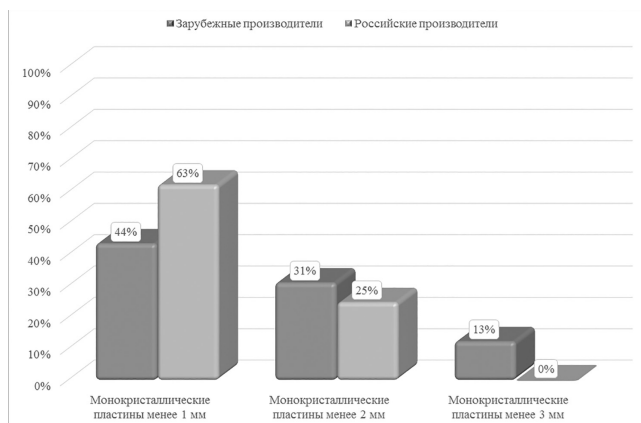


Рис. 8. Распределение производителей (доля в %) по толщине монокристаллических алмазных пластин

- высокая степень освоения производства монокристаллических алмазных НТРТ-теплоотводов² российскими производителями (рис. 3);
- дифференциация алмазной продукции по сферам применения, высокая доля теплоотводов в производственной номенклатуре (рис. 4);
- высокая степень освоения производства теплоотводов из чистых алмазных пластин совершенной структуры (рис. 5);
- недостаточная насыщенность рынков легированными алмазными пластинами применительно к теплоотводам, в структуру которых могут быть

- интегрированы сенсорные и/или управляющие устройства (рис. 5);
- соответствие геометрических размеров и толщины всех разновидностей выпускаемых алмазных пластин существующим потребностям электронной отрасли (рис. 6-9);
- внутренняя конкуренция различных линеек продукции сходного функционального назначения зарубежных производителей, исходя из соотношения «цена/качество», а также производство, помимо стандартной номенклатуры, изделий «под заказ» (рис. 10);

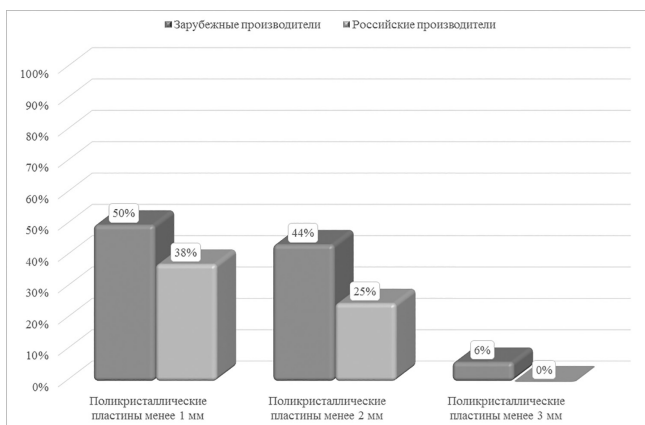


Рис. 9. Распределение производителей (доля в %) по толщине поликристаллических алмазных пластин

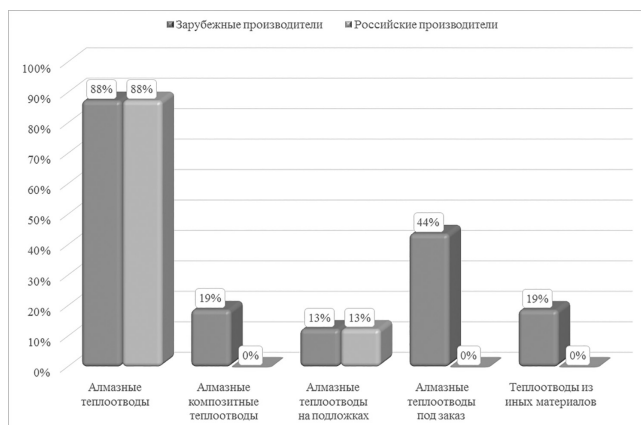


Рис. 10. Распределение производителей (доля в %) по разновидностям алмазных теплоотводов

² НРНТ (high pressure high temperature) – технология выращивания алмаза при высоких давлениях и высоких температурах.

- инновационный потенциал расширения номенклатуры коммерческих решений российских производителей (рис. 10).

Анализ рынка производителей показывает, что алмазные и алмазные композитные теплоотводы рассматриваются как решение, определяющее особый «тепловой комфорт» (и, тем самым, — стабильность характеристик и надежность функционирования) электронных устройств преимущественно в экстремальных условиях и режимах эксплуатации. Как следствие, преобладают, локальные решения для электронных компонентов и модулей (1D- и 2D-теплоотводы), комплексные решения для электронных устройств сложной архитектуры (2,5D-теплоотводы, 3D-теплоотводы, а также теплоотводы, в которые интегрирован расширенный функционал) практически не представлены.

Инновационный потенциал алмазных теплоотводов

Аналитическая оценка инновационного потенциала алмазных теплоотводов включала в себя:

- анализ научных публикаций (база «Scopus»);
- семантический анализ (база «Scopus»);
- патентный анализ (база «Espacenet»)³.

Распределение по странам научных публикаций и патентов представлено на рис. 11.

По аналогии с распределением ведущих зарубежных производителей, в сфере научных исследований и патентования алмазных и алмазных композитных теплоотводов лидирующие позиции принадлежат США и Китаю.

Большой удельный вес европейских исследований и патентов нежели европейских производителей отражает актуальность этой тематики для европейского электронного рынка.

Удельный вес российских патентов заметно выше, нежели российских публикаций. Преобладающие в российских патентах силовые электронные устройства и СВЧ-устройства отражают как существующую направленность отечественной электронной индустрии, так и мировые тренды. Меньший удельный вес российских публикаций не вполне корректно характеризует

результативность отечественных ученых, отражая существующие проблемы публикации в наиболее авторитетных международных научных изданиях.

Временное распределение научных публикаций и патентной активности за последние 10 лет (рис. 12) подтверждает научный и конструкторско-технологический запрос в сфере алмазных и алмазных композитных теплоотводов, сравнительно небольшое количество отобранных в соответствии с критериями поиска публикаций и патентов — выраженную специализацию этой сферы исследований и разработок.

Инновационные тенденции развития алмазных и алмазных композитных теплоотводов отражает матрица понятий, взаимосвязанных с ключевыми словами публикаций. Дополнить анализ матрицы научных публикаций позволил семантический анализ — метод обработки информации, в котором наиболее часто повторяющиеся в научных публикациях понятия систематизируются по соответствию ключевым словам поиска и взаимно увязываются по частоте повторений.

Наиболее релевантные, как показал анализ, понятия («наноалмазный теплоотвод», «микроканал», «алмазные покрытия») коррелируют с характеристическими особенностями алмазных и алмазных композитных теплоотводов, выделенными в процессе патентного анализа, что во многом объясняет тренд патентной активности, формирующийся в 2020-2021 гг.

Соотношение доли патентов по алмазным теплоотводам и алмазным композитным теплоотводам (56 и 44%, соответственно) наглядно иллюстрирует запрос, связанный с оптимизацией соотношения «цена/качество» теплоотводов без снижения функциональных возможностей электронных устройств.

Соотношение доли патентов по целевому назначению (корпусированные электронные устройства — 74%, рабочие подложки электронных устройств — 26%) иллюстрирует существующую интеграцию алмазных и алмазных композитных теплоотводов в электронные приборы, модули и устройства различной архитектуры.

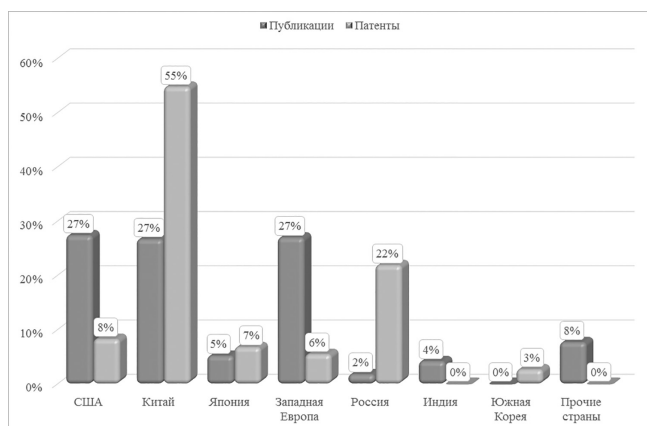


Рис. 11. Распределение по странам (доля в %) научных публикаций и патентов

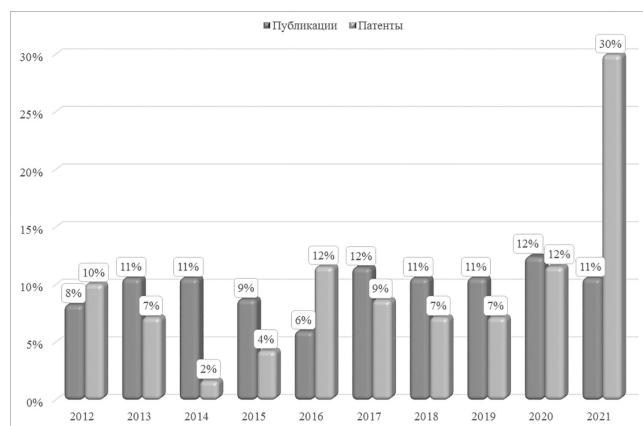


Рис. 12. Временное распределение (доля в %) научных публикаций и патентов (2012-2021 гг.)

³ По ключевым словам «алмазный теплоотвод».

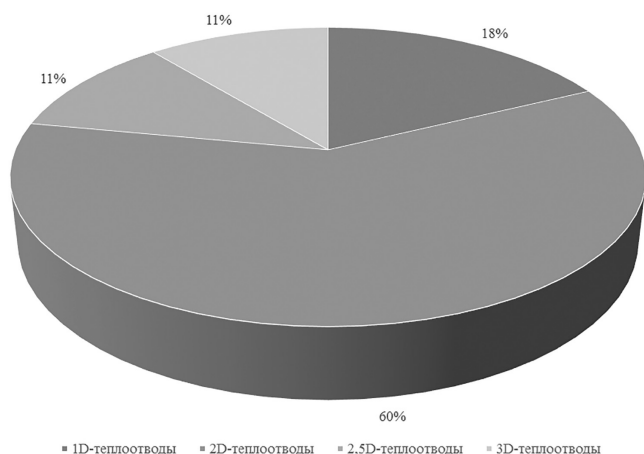


Рис. 13. Распределение (доля в %) патентов по разновидностям алмазных и алмазных композитных теплоотводов

Последнее обстоятельство подтверждает соотношение доли патентов по разновидностям алмазных и алмазных композитных теплоотводов (рис. 13).

Как видно, с традиционными решениями, такими как 1D-теплоотводы (ориентированные преимущественно на рабочие подложки полупроводниковых устройств) и 2D-теплоотводы (в том числе волоконные и гибкие), активно конкурируют 2,5D- и 3D-теплоотводы.

Совокупность результатов аналитической оценки инновационного потенциала алмазных и алмазных композитных теплоотводов позволила выявить ключевые тренды их развития на временном горизонте рассмотрения:

- «CVD diamond» – CVD-алмаз;
- «diamond coatings» – алмазные покрытия;
- «diamond-Cu composites» – алмазно-медный композит;
- «diamond-Al composites» – алмазно-алюминиевый композит;
- «metal-matrix composites» – металломатричные композиты.
- «high-power heat spreader» – теплорассеиватели высокой мощности;
- «microchannel heat sink» – микроканальный теплоотвод;
- «HEMT»⁴ – транзисторы с высокой подвижностью электронов;
- «diode laser» – диодный лазер.

Корректность представленных выше результатов иллюстрируют примеры запатентованных решений (табл. 1).

В совокупности результаты аналитического рассмотрения позволяют определить инновационный потенциал развития российских алмазных теплоотводов:

- освоение выпуска алмазных CVD-пластин большой площади для последующего производства полупроводниковых микрочипов групповыми методами на промышленных подложках;
- освоение выпуска композитных алмазных материалов и производства теплоотводов на их основе.

Таблица 1

Примеры запатентованных решений алмазных и алмазных композитных теплоотводов

Тип теплоотвода	Конструктивное решение теплоотвода	Патент (источник)
Алмазный 1D-теплоотвод	HEMT с угоненной SiC-подложкой, на обратную поверхность которой нанесено алмазное теплоотводящее пленочное покрытие	CN, патент №110379782, 2019
Алмазный композитный 1D-теплоотвод	Планарный медный теплоотвод с пленочным покрытием из наночастиц алмаза	CN, патент №110670035, 2020
Алмазный 2D-теплоотвод	Планарный алмазный монокристаллический теплоотвод	RU, патент №2757042, 2021
Алмазный композитный 2D-теплоотвод	Композитный теплоотвод (микрочастицы алмаза в медной матрице с добавлением примеси серебра или олова)	CN, патент №112609115, 2021
Алмазный 2,5D-теплоотвод	Алмазный микроканальный теплоотвод с продольными внутренними микроканалами	CN, патент №113161307, 2021
Алмазный композитный 2,5D-теплоотвод	Алмазно-медный микроканальный теплоотвод проточного типа	CN, патент №212666860, 2020
Алмазный 3D-теплоотвод	Распределенный алмазный теплоотвод для бокового отвода тепловых потоков вертикальной сборки полупроводниковых микрочипов	US, патент №2021407964, 2021
Алмазный композитный 3D-теплоотвод	Алмазный планарный теплоотвод в составе медного радиатора с теплоотводящей 3D-структурой	CN, патент №212874482, 2021

- освоение выпуска 2,5D- и 3D-теплоотводов для электронных устройств с экстремальными режимами и условиями эксплуатации.
- разработка и создание «интеллектуальных» теплоотводов с дополненным (сенсорика, управление) функционалом.

Заключение

Результаты рассмотрения современного состояния и инновационного потенциала алмазных и алмазных композитных теплоотводов позволяют сделать следующие выводы:

- рынок (зарубежный и российский) алмазных и алмазных композитных теплоотводов характеризуется активной стадией формирования и подъема;
- продукция зарубежного и российского рынков алмазных и алмазных композитных теплоотводов ориентирована в большей степени на текущие потребности, отвечающие запросам развития электронной отрасли, перспективные разработки в коммерческом производстве не освоены;
- прогнозируемая потребность в алмазных и алмазных композитных теплоотводах открывает, используя достигнутый научно-технологический потенциал и компетенции российских производителей [8, 9], «окно возможностей» для роста и устойчивого развития российского рынка.

⁴ HEMT (high electron mobility transistor) – транзистор с высокой подвижностью электронов.

Список использованных источников

1. В. Л. Ланин, Е. В. Телеш. Алмазные теплоотводы для изделий электроники повышенной мощности//Силовая электроника. 2008. № 3. С. 120-124.
2. В. Е. Роголин, М. И. Крымский, К. М. Крымский. О некоторых применениях алмазов в силовой оптике и электронике//Радиотехника и электроника. 2018. Т. 63. № 11. С. 1188-1196.
3. В. Б. Вяжиров, М. П. Духновский, А. К. Ратникова, Ю. Ю. Федоров. Изолирующие теплоотводы на основе CVD-алмаза для силовой электроники//Электронная техника. Серия 1. СВЧ-техника. 2009. Вып. 3 (502). С. 36-40.
4. В. В. Лучинин. Национальные технические приоритеты: алмазная экстремальная электроника//Нанотехнологии. 2018. Т. 11. № 2. С. 156-169.
5. В. В. Лучинин, А. В. Колядин, К. А. Машинский. Алмазная индустрия — российский инновационный вызов//Инновации. 2020 № 4 (258). С. 3-9.
6. «Global synthetic diamond market size, share & trends analysis report by (polished and rough) by manufacturing process (High-Pressure High-Temperature (HPHT) and Chemical Vapour Deposition (CVD)) by application (construction & mining, electronics, jewellery, healthcare, and others (oil and gas)) 2021-2027». <https://www.omrglobal.com/industry-reports/synthetic-diamond-market>.
7. Мировой рынок синтетических алмазов. <https://мниан.пф/analytcs/Mirovoj-rynok-sinteticeskih-almazov>.
8. P. P. Maltsev, S. V. Redkin, I. A. Glinskiy, N. V. Poboikina et al. Heatsink diamond nanostructures for microwave semiconductor electronics//Nanotechnologies in Russia. 2016. Vol. 11. № 7-8. P. 480-490.
9. П. М. Мелешкевич, С. А. Вашин, М. П. Духновский, Е. Н. Куликов. О возможности применения пластин CVD-алмаза в качестве конструктивных элементов в приборах СВЧ//Электронная техника. Серия 1. СВЧ-техника. 2020. Вып. 3 (546). С. 91-100.

References

1. V. L. Lanin, E. V. Telesh. Diamond heat sinks for high-power electronics products//Power electronics. 2008. № 3. P. 120-124.
2. V. E. Rogalin, M. I. Krymsky, K. M. Krymsky. On some applications of diamonds in power optics and electronics//Radio engineering and electronics. 2018. Vol. 63. № 11. P. 1188-1196.
3. V. B. Vyakhirev, M. P. Dukhnovsky, A. K. Ratnikova, Yu. Yu. Fedorov. Insulating heat sinks based on CVD-diamond for power electronics//Electronic equipment. Series 1. Microwave equipment. 2009. Issue 3 (502). P. 36-40.
4. V. V. Luchinin. National technical priorities: diamond extreme electronics//Nanotechnology. 2018. Vol. 11. № 2. P. 156-169.
5. V. V. Luchinin, A. V. Kolyadin, K. A. Mashinsky. The diamond industry — the Russian innovative challenge//Innovations. 2020. № 4 (258). P. 3-9.
6. «Global synthetic diamond market size, share & trends analysis report by (polished and rough) by manufacturing process (High-Pressure High-Temperature (HPHT) and Chemical Vapour Deposition (CVD)) by application (construction & mining, electronics, jewellery, healthcare, and others (oil and gas)) 2021-2027». <https://www.omrglobal.com/industry-reports/synthetic-diamond-market>.
7. «The world market of synthetic diamonds». <https://мниан.пф/analytcs/Mirovoj-rynok-sinteticeskih-almazov>.
8. P. P. Maltsev, S. V. Redkin, I. A. Glinskiy, N. V. Poboikina et al. Heatsink diamond nanostructures for microwave semiconductor electronics//Nanotechnologies in Russia. 2016. Vol. 11. № 7-8. P. 480-490.
9. P. M. Meleshkevich, S. A. Ivashin, M. P. Dukhnovsky, E. N. Kulikov. About the possibility of using CVD-diamond plates as structural elements in microwave devices//Electronic equipment. Series 1. Microwave technology. 2020. Issue 3 (546). P. 91-100.