

Потенциал отечественного алмаза. Теплоотводы

А. Колядин, к. т. н.¹, В. Лучинин, д. т. н.², Ю. Ягудаев, к. э. н.³,
О. Бохов, к. т. н.⁴, С. Ильин, к. т. н.⁵, И. Клепиков, к. г.-м. н.⁶,
А. Ножкина, д. т. н.⁷

УДК 621.382 | ВАК 05.27.06

В статье рассмотрены современное состояние и конструктивные особенности теплоотводов как одного из критических факторов электроники и фотоники с экстремальными режимами и условиями эксплуатации. Представлены результаты анализа мирового и российского рынка производителей синтетических алмазов для теплоотводов. На основе анализа публикационной и патентной активности оценены инновационность и потенциал развития алмазных теплоотводов.

ВВЕДЕНИЕ

Введенные глобальные ограничения на поставку в РФ ключевой электронной компонентной базы (ЭКБ) информационно-сверхвысокочастотной и силовой электроники, а также санкции и запреты на доступ к зарубежным технологиям, оборудованию и материалам могут критически сказаться на создании отечественной продукции военного, специального и гражданского назначения, определяющей безопасность и технологический суверенитет государства.

Особое место при создании радиоэлектронных, инфокоммуникационных и энергообеспечивающих систем занимают конструкторско-технологические решения в области гетерогенной интеграции компонентов в функциональные модули, поскольку базовые технические характеристики изделий определяются не только используемой ЭКБ, но и архитектурными решениями композиций, то есть процессами сборки [1]. Особое место в архитектурных композициях гетерогенно-интегрированных электронных функциональных модулей занимает теплоотводящий компонент, определяющий тепловой

«комфорт» прибора. Устанавливается необходимый для обеспечения функциональных характеристик изделия тепловой баланс между генерируемым в процессе работы теплом и его диссипацией – отдачей, определяющей температуру активной зоны преобразующего элемента. Таким образом, материал теплоотвода и его архитектурная компоновка в изделии совместно с преобразующим элементом во многом определяют функциональные характеристики изделия в отношении мощностных, импульсных, частотных параметров и условий эксплуатации.

Учитывая ранее отмеченные негативные для России изменения мирового электронного рынка, целью данной статьи является сравнение отечественных и зарубежных электронных технологий в отношении алмазных теплоотводов как одного из критических факторов электроники с экстремальными режимами и условиями эксплуатации [2].

Алмаз как инновационный базовый материал выбран не случайно. Обладая совокупностью уникальных теплофизических, электрофизических, механических и оптических свойств (табл. 1), проявляющихся в возможности достижения рекордных характеристик не только в рамках его технического использования в качестве базиса в теплоотводящих конструкциях [3, 4, 5], но и в широкой номенклатуре изделий микро- и нанотехники [6].

Данный материал становится научно-индустриальным и конструкторско-технологическим приоритетом, определяющим превосходство в изделиях нового поколения (табл. 2) [6].

Отечественный потенциал алмазной индустрии находится на высоком уровне, и представленный в данной статье сравнительный анализ использования синтетического алмаза при решении востребованной, но достаточно простой задачи создания алмазных теплоотводов указывает на наличие в России уникальных компетенций,

¹ ООО «НПК «Алмаз», заместитель генерального директора.

² СПбГЭТУ «ЛЭТИ», директор ИЦ ЦМИД, заведующий кафедрой микро- и нанoeлектроники, профессор, cmid_leti@mail.ru.

³ АО «Научно-исследовательский институт природных, синтетических алмазов и инструмента» (АО «ВНИИАЛМАЗ»), генеральный директор.

⁴ СПбГЭТУ «ЛЭТИ», заведующий лабораторией.

⁵ СПбГЭТУ «ЛЭТИ», научный сотрудник НОЦ «Нанотехнологии».

⁶ ООО «НПК «Алмаз», заведующий лабораторией.

⁷ АО «Научно-исследовательский институт природных, синтетических алмазов и инструмента» (АО «ВНИИАЛМАЗ»), заведующая лабораторией «Исследования алмазов и синтеза сверхтвердых материалов».

Таблица 1. Приоритетные свойства алмаза по областям применения

Приоритетные свойства алмаза	Направления, области применения					
	СВЧ-электроника	Силовая электроника	Фотоника	Микросистемная техника	Информационные технологии	Механообработка
Механическая твердость* 10 000 кг/мм ² (по Виккерсу)	-	-	-	★	-	★
Модуль упругости 10 ¹² Н/м ²	-	-	-	★	-	★
Коэффициент трения ~0,02	-	-	-	★	-	★
Теплопроводность* 2·10 ³ Вт/(м·К)	★	★	★	★	★	★
Коэффициент линейного расширения* 10 ⁻⁶ К ⁻¹	★	★	★	★	★	★
Скорость распространения звука* 18,2 км/с	★	-	-	★	-	-
Показатель преломления 2,4	-	-	★	★	★	-
Угол полного внутреннего отражения 24...25°	-	-	★	★	-	-
Край собственного поглощения 220...225 нм	-	-	★	★	★	-
Ширина запрещенной зоны 5,45 эВ	★	★	★	★	-	-
Критическая напряженность электрического поля* 10 ⁷ В/см	★	★	-	★	-	-
Дрейфовая скорость насыщения носителей заряда: электронов – 2·10 ⁷ см/с; дырок – 10 ⁷ см/с	★	-	-	-	-	-
Подвижность носителей заряда: электронов – 4 500 см ² /(В·с); дырок – 2 100 см ² /(В·с)	★	-	-	-	-	-
Удельное сопротивление при 20 °С 10 ¹³ Ом·см	★	-	-	★	-	-
Относительная диэлектрическая проницаемость 5,5	-	★	★	★	★	-
Химическая стойкость	-	-	-	★	-	★
Радиационная стойкость	★	★	★	★	★	-

* Рекордные значения. Рекордная температура Дебая – интегральная характеристика материала, определяющая его устойчивость к термическому, энергетическому, радиационному и химическому воздействиям, – равна 1 860 К.

Таблица 2. Номенклатура продукции нового поколения с достижением экстремальных характеристик при использовании синтетического алмаза

Продукция, изделия	Направления, области применения					
	СВЧ-электроника	Силовая электроника	Фотоника	Микросистемная техника	Информационные технологии	Механообработка
Подложки монокристаллические	★	★	★	★	★	-
Гомоэпитаксиальные структуры	★	★	★	★	★	-
Гетероэпитаксиальные структуры	-	-	★	★	-	-
Подложки мозаичные	-	★	-	★	-	-
Теплоотводы	★	★	★	★	-	-
Окна широкополосные	★		★		-	-
Оптические и рентгеновские компоненты (линзы, зеркала, призмы, фильтры)	★	-	★	★	★	-
Волноводы и капилляры	-	-	★	★	★	-
Транзисторы	★	★	★	-	-	-
Диоды	★	★	★	-	-	-
Автоэмиссионные структуры	★	-	★	★	-	-
Плазменные панели	-	-	★	-	-	-
Фотоприемники	-	-	★	★	★	-
Микромеханика	★	-	★	★	-	-
ПАВ-электроника	★	-	★	★	-	-
Микроинструмент	-	-	-	★	-	★
Электроды	-	-	-	★	-	-
Порошки	-	-	-	-	-	★
Электрохимические компоненты	-	-	-	★	-	-
Поглотители энергии	★	-	★	-	-	-

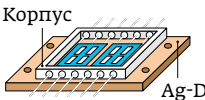
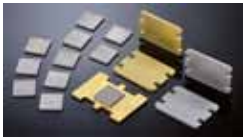
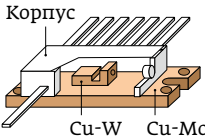

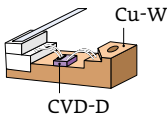
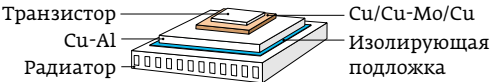
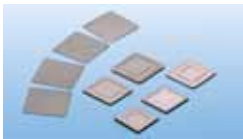

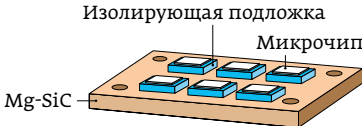

которые могут быть использованы в рамках опережающего импортозамещения на рынке ЭКБ для экстремальных режимов и условий эксплуатации.

ТЕПЛОТВОД КАК КОНСТРУКТИВНЫЙ ЭЛЕМЕНТ С КРИТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГОДИССИПИРУЮЩЕЙ ФУНКЦИЕЙ

Функциональные назначения и конструкторско-технологические решения современных теплоотводов (табл. 3) [7] могут быть определены как:

- обеспечение перспективной ЭКБ с экстремальным энерговыделением системами диссипации тепла и стабилизации температурных режимов работы на основе современных композиций материалов и процессов сборки с минимизацией массогабаритных показателей;
- обеспечение надежности и долговечности аппаратуры с экстремальными режимами и условиями эксплуатации с минимизацией процессов деградации и нестабильности функциональных параметров;

Таблица 3. Конструктивные решения современных теплоотводов

Устройство	Конструктивное решение модуля	Теплоотводы
Модульный микрочип в полимерном корпусе малой мощности базовых 5G-станций		
Модульный микрочип в керамическом корпусе базовых 5G-станций		
Модуль (микрочипы на печатных платах) в металлическом корпусе аэрокосмических систем		
Лазерный модуль в металлическом корпусе систем волоконно-оптической связи		
Мощный лазерный микрочип систем волоконно-оптической связи		
Силовой биполярный транзистор с изолированным затвором инверторного модуля двигателей электромобилей		
Термокрышка блока силовых транзисторных модулей		
Мощная LED-матрица на сапфировой подложке		
Мощная лазерная диодная матрица		
Силовой блок инверторного модуля морских ветроэлектростанций и двигателей электропоездов		

Примечание: D (diamond) – алмаз.

- создание гибридных теплоотводящих конструкций нового поколения, сочетающих теплодиссипирующие, термоэлектропреобразующие и сенсорно-информационные свойства.

Детализируя функциональные особенности электронной аппаратуры, на которые будет непосредственно влиять теплоотвод, выделим:

- миниатюризацию, то есть повышение плотности тепловыделяющих элементов в сборке, использование бескорпусной элементной базы и уменьшение массогабаритных показателей;
- генерацию, коммутацию, преобразование большей мощности, то есть расширение диапазона достигаемых выходных параметров за счет повышения эффективности теплоотдачи;
- стабилизацию функциональных параметров, миниатюризацию тепловых шумов за счет снижения температур работы устройства;
- достижение высоких температур эксплуатации за счет повышения эффективности теплоотдачи от рабочей зоны компонентов;
- механическую устойчивость конструкции за счет использования материалов с низкими коэффициентами линейного расширения;
- радиационную устойчивость конструкций за счет сочетания теплоотводящих, электроизоляционных и механических свойств конструктивных материалов;

Таблица 4. Традиционные и перспективные виды теплоотводящих конструкций

Виды теплоотводящих конструкций	Технические решения
Пассивные	<ul style="list-style-type: none"> • плоские (2D); • профилированные (2, 5D, 3D); • металлизированные; • графитизированные
Теплоактивные	Принудительно теплодиссипирующие: <ul style="list-style-type: none"> • встроенное электронное термоохлаждение; • микрофлюидное охлаждение
Термоадаптивные	<ul style="list-style-type: none"> • термомеханоактивируемые
Функционально адаптивные	<ul style="list-style-type: none"> • термомеханорекуперирющие; • теплоэнергопередающие; • теплоэлектроаккумулирующие
Интеллектуальные	<ul style="list-style-type: none"> • сенсорные; • инфокоммуникационные; • процессорно-управляемые

- обеспечение электрической стабильности и низких диэлектрических потерь теплоотводящей среды за счет использования материалов с уникальными электрофизическими свойствами.

Комплекс тепловых и сопутствующих им контролируемых и исполнительных процессов и эффектов, используемых в современных теплоотводах (табл. 4), включает:

- рассеяние – диссипацию тепла (газ, жидкость, металл);
- конструктивное обеспечение однородности теплового поля – «выравнивание» температуры;
- тепловую и конструктивную компенсацию термомеханических напряжений;
- тепловую генерацию электрических токов (эффект Зеебека);
- термоохлаждение электрическим током (эффект Пельтье);
- сенсорную температурного поля.

Для реализации рассмотренных выше особенностей теплоотводов, особенно классических и ряда перспективных направлений, безусловно, может послужить алмаз, поскольку он обладает совокупностью рекордных физических свойств, которые принципиальны для данных конструкций (табл. 5).

Алмазные теплоотводы позволяют обеспечивать потребности различных электронных устройств [8, 9, 10, 11], что во многом определяется именно экстремальным сочетанием свойств (механических, электрических и тепловых) этого материала.

РЫНОК СИНТЕТИЧЕСКИХ АЛМАЗОВ ДЛЯ ТЕПЛОТВОДОВ

Экономическая целесообразность алмазных теплоотводов определяется в первую очередь геометрическими параметрами монокристаллических и поликристаллических алмазных пластин. В составе больших электронных устройств алмазные теплоотводы малой площади применимы для отдельных компактных и субкомпактных

Таблица 5. Рекордные характеристики алмаза как материала теплоотводов

Характеристика	Численное значение параметра
Теплопроводность	2 000 Вт / (м·К)
Механическая твердость	10 000 кг / мм ²
Критическая напряженность электрического поля	10 ⁷ В / см
Коэффициент линейного расширения	10 ⁻⁶ К ⁻¹

электронных чипов и модулей, алмазные теплоотводы большой площади – для совокупности нескольких компактных и субкомпактных устройств. Существующее сегодня соотношение цены и качества алмазных теплоотводов определяет практический интерес также к алмазным композитным теплоотводам (теплоотводам из алмазных композитных материалов).

Ведущие мировые и российские производители алмазных теплоотводов представлены в табл. 6 (в алфавитном порядке).

Распределение ведущих мировых производителей по странам (США – 25,0%; Китай – 25,0%; Япония – 18,8%; Великобритания – 12,5%; Россия – 6,3%; Германия – 6,3%; Индия – 6,3%) отражает потребности рынков

Таблица 6. Производители алмазных теплоотводов

Фирма	Страна	Алмазные пластины			Алмазные теплоотводы
		Монокристаллические НТРП	Монокристаллические CVD	Поликристаллические CVD	
Ведущие мировые производители					
Applied Diamond	США	–	★	★	★
Beijing Worldia Diamond Tools	Китай	–	–	★	★
Delaware Diamond Knives	США	★	–	–	–
Diamond Foundry	США	–	★	–	–
Diamond Materials	ФРГ	–	–	★	★
Element Six	Великобритания	★	★	★	★
Excellent Diamond Products	Япония	–	★	–	–
Hebei Plasma Diamond Technology	Китай	–	★	★	–
Heyaru Group	Индия	–	★	★	★
New Diamond Technology	Россия	★	–	–	–
Sumitomo Electric Industries	Япония	–	★	★	★
Tomei Diamond	Япония	–	★	★	–
UniDiamond Superabrasives	Великобритания	–	–	★	–
Washington Diamonds Corporation	США	–	–	★	–
Xiamen Powerway Advanced Material	Китай	–	–	★	★
Zhengzhou Sino-Crystal Diamond	Китай	–	★	–	–
Российские производители					
«Синтез Технолоджи»	Россия	★	–	–	★
«ТВИНН»	Россия	–	–	★	★
«Терекалмаз»	Россия	–	–	★	–
«ТИСНУМ»	Россия	★	–	–	–
CVD.Spark	Россия	–	★	★	★
Frezart	Россия	–	★	★	–
Wonder Technologies	Россия	–	★	★	–

Таблица 7. Характеристические особенности продукции мировых и российских производителей алмазных теплоотводов

Характеристика продукции	Доля от общего числа мировых производителей, %	Доля от общего числа российских производителей, %
Технологии производства		
Монокристаллические HPHT-пластины	18,8	37,5
Монокристаллические CVD-пластины	56,3	37,5
Поликристаллические CVD-пластины	68,8	62,5
Функциональное назначение		
«Термические»* алмазные пластины	87,5	75,0
«Оптические»* алмазные пластины	68,8	62,5
«Механические»* алмазные пластины	68,8	25,0
Физические параметры		
Высокочистые алмазные пластины совершенной кристаллографической структуры	100,0	87,5
Легированные алмазные пластины	43,8	37,5
Размеры		
Монокристаллические пластины менее 5 × 5 мм	43,8	37,5
Монокристаллические пластины менее 12 × 12 мм	25,0	62,5
Монокристаллические пластины более 12 × 12 мм	12,5	25,0
Поликристаллические пластины диаметром менее 50 мм	56,3	50,0
Поликристаллические пластины диаметром менее 120 мм	37,5	25,0
Поликристаллические пластины диаметром более 120 мм	18,8	12,5
Толщина		
Монокристаллические пластины менее 1 мм	43,8	62,5
Монокристаллические пластины менее 2 мм	31,3	25,0
Монокристаллические пластины менее 3 мм	12,5	–
Поликристаллические пластины менее 1 мм	50,0	37,5
Поликристаллические пластины менее 2 мм	43,8	25,0
Поликристаллические пластины менее 3 мм	6,3	–
Теплоотводы		
Алмазные теплоотводы	87,5	87,5
Алмазные композитные теплоотводы	18,8	–
Алмазные теплоотводы на подложках	12,5	12,5
Алмазные теплоотводы по индивидуальному заказу	43,8	–
Теплоотводы из иных материалов	18,8	–

Примечания: Прочерк означает, что данная продукция не производится.

* Термины «термический», «оптический», «механический» применительно к алмазу используются рядом ведущих мировых производителей.

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 в табл. 7.

Распределение по технологии производства отражает преобладающий интерес к производству поликристаллических алмазных CVD-теплоотводов. Компетенции производства монокристаллических алмазных НТРП-теплоотводов освоены в большей степени российскими производителями, монокристаллических алмазных CVD-теплоотводов – на международном рынке.

Распределение по функциональному назначению характеризует рынок как сегментированный по разновидностям продукта в соответствии со сферами применения, имеющий выраженный акцент на производство теплоотводов. При этом большинство производителей на международном и российском рынках характеризуются развитой номенклатурой и насыщенностью производственного портфеля.

Важным аспектом применительно к теплоотводам, в структуру которых могут быть интегрированы сервисные (например, сенсорные и управляющие температурными режимами) устройства, является легирование алмазных пластин. Если алмазные пластины высокой степени химической чистоты и совершенства кристаллографической структуры представлены в продукции всех ведущих производителей, то легированные алмазные пластины (включая как легирование всей пластины, так и отдельных ее областей) предлагают менее половины компаний. Недостижение этим показателем медианного уровня и отсутствие предлагаемых коммерческих решений характеризуют рынок как ненасыщенный и имеющий разрыв между потенциальным спросом и возможностью адекватного предложения.

Для эффективного развития и обеспечения эффективной конкуренции алмазных и алмазных композитных теплоотводов с альтернативными решениями критичны геометрические размеры и толщина производимых алмазных пластин. Существующая в настоящее время типология алмазных и алмазных композитных теплоотводов может быть представлена следующим образом:

- 1D – алмазные пленочные покрытия теплоотводов;
- 2D – теплоотводы-пластины и (или) подложки;
- 2,5D – микроканальные теплоотводы;
- 3D-теплоотводы.

Освоенные геометрические параметры производимых алмазных пластин характеризуют в большей степени

существующий уровень требований рынка электронной продукции. Этот факт подтверждает и распределение по разновидностям теплоотводов, которое характеризует наличие диверсификации рынка и внутренней конкуренции продуктовых портфелей производителей исходя из соотношения цены и качества различных линеек продукции сходного функционального назначения. Сложившиеся распределения характеризуют рынок как ненасыщенный, имеющий потенциал расширения в разрезе конечных коммерческих решений теплоотводов, но при этом ориентированный как на производство стандартной номенклатуры, так и на индивидуальное производство под заказ. Существенным является факт наличия разрыва между перспективными потребностями в 2,5D- и 3D-теплоотводах и тем, что в настоящее время производители ориентированы преимущественно на 1D- и 2D-теплоотводы.

Таким образом, анализ показывает, что в настоящее время алмазные и алмазные композитные теплоотводы рассматриваются как решение, актуальность которого обусловлена необходимостью перераспределения мощных тепловых потоков электронных и фотонных устройств в наиболее неблагоприятных условиях, когда теплоотводы из альтернативных материалов не обеспечивают требуемые рабочие характеристики и надежность эксплуатации. В открытом сегменте рынка алмазных теплоотводов преобладают 2D-теплоотводы, в то время как 2,5D-, 3D-теплоотводы, а также теплоотводы, в которые интегрирован расширенный функционал, обеспечивающие комплексное решение проблемы (а в ряде случаев – позволяющие упростить конструктивное решение отдельных электронных модулей и устройств), практически отсутствуют. Это касается как алмазных теплоотводов, так и теплоотводов на основе конкурентных материалов с наиболее высокими характеристиками.

АНАЛИЗ ИННОВАЦИОННОГО ПОТЕНЦИАЛА АЛМАЗНЫХ ТЕПЛОТВОДОВ. ПУБЛИКАЦИИ И ПАТЕНТЫ

Обратимся к результатам анализа актуальных мировых и российских научных исследований, включавшего:

- анализ научных публикаций в базе Scopus и семантический анализ (по ключевым словам «алмазный терморегулятор», «алмазный теплоотвод» и «алмазный теплоотвод»);
- анализ патентов в базе Espacenet (по ключевым словам «алмазный теплоотвод»).

Распределение научных публикаций и патентов по странам представлено в табл. 8.

Анализ научных публикаций за последние 10 лет указывает на устойчиво воспроизводимый интерес к этой тематике, причем количественное распределение публикаций

Таблица 8. Распределение научных публикаций и патентов по странам

Страна	Публикации (доля в %)*	Патенты (доля в %)
США	27,4	8,2
Китай	26,7	54,8
Западная Европа	7,0	5,6
Россия	1,8	21,9
Япония	5,2	6,8
Индия	4,2	–
Сингапур	3,9	–
Южная Корея	–	2,7

* Доля публикаций дана усредненно по ключевым словам поиска.

характеризует, скорее, нишевый характер этой области исследований.

Как и в отношении мирового рынка, в сфере научных исследований алмазных и алмазных композитных теплоотводов доминирующие позиции принадлежат США и Китаю; в китайских исследованиях в большей степени превалирует прикладная направленность. Вместе с тем по объему и географии участия европейские исследования представлены шире, нежели европейские производители (в особенности для ключевых слов «алмазный теплоотвод»), что характеризует рост актуальности этой тематики для развития европейского рынка производства электроники.

Относительно невысокая доля публикаций российских исследований может не в полной мере отражать реальный объем и значимость исследований российских ученых в этой области, поскольку имеют место определенные (в том числе финансовые) сложности публикации результатов российских исследований в международных изданиях, входящих в 1-й и 2-й квантили.

Патентный анализ за последние 12 лет также показывает устойчивый практический интерес к этой тематике. Количественное распределение патентов характеризует, скорее, нишевый характер этой области, временное распределение демонстрирует устойчивый рост количества патентов в 2020–2021 годах (11,0% в 2020 году и 28,8% в 2021 году от общего количества патентов за указанный период).

Доля российских патентов заметно выше, нежели доля российских публикаций, однако стоит отметить тот факт, что российские патенты содержат преимущественно решения для мощных силовых и СВЧ-устройств, что отвечает возможностям российских производителей и направленности российских производств.

Таблица 9. Распределение публикаций по предметным областям

Предметная область	Публикации (доля в %)*
Практические решения в технической сфере	32,2
Материаловедческие исследования	25,3
Исследования физических объектов и процессов	20,8
Прочие	21,7

* Доля публикаций дана усредненно по ключевым словам поиска.

Распределение публикаций по предметным областям (табл. 9) показывает наличие в равной степени теоретических исследований и прикладных разработок. Приоритетная тематика для всех предметных областей – «тепловой режим электронных компонентов и (или) устройств».

Анализ матрицы взаимосвязанных с ключевыми словами понятий показывает, что наиболее явно выраженная положительная динамика имеет место для следующих понятий: «микросканал», «теплопроводность», «наноалмазный теплоотвод», «транзисторы с высокой подвижностью электронов», «алмазные пленки», «композит», что характеризует опережающий запрос на более сложные и функционально насыщенные решения алмазных и алмазных композитных теплоотводов.

Выделенные в результате анализа характеристические особенности запатентованных алмазных и алмазных композитных теплоотводов представлены в табл. 10.

Соотношение патентов по материалам демонстрирует сопоставимо устойчивый интерес как к обеим разновидностям алмазных теплоотводов, так и к минимизации их стоимости без ущерба для работоспособности электронных устройств.

Соотношение патентов по целевому назначению иллюстрирует, что существующие функциональные характеристики алмазных и алмазных композитных теплоотводов в настоящее время обеспечивают их интеграцию в электронные приборы, модули и устройства, обладающие архитектурой различной степени сложности.

Сказанное выше подтверждает распределение патентов по разновидностям алмазных и алмазных композитных теплоотводов. При этом 1D-теплоотводы (в большей степени функционирующие как теплораспределители) рассматриваются преимущественно для рабочих подложек полупроводниковых устройств, а у 2D-теплоотводов (в том числе волоконных и гибких) как традиционных

Таблица 10. Характеристические особенности запатентованных алмазных и алмазных композитных теплоотводов

Характеристики продукции	Патенты (доля в %)
Материал теплоотвода	
Алмазные теплоотводы	56,2
Алмазные композитные теплоотводы	43,8
Целевое назначение	
Корпусированные электронные устройства и микрочипы	74,0
Рабочие подложки электронных устройств	26,0
Разновидности теплоотводов	
1D	17,8
2D	60,2
2,5D	11,0
3D	11,0

универсальных решений имеет место активная конкуренция с 2,5D- и 3D-теплоотводами.

Дополнить анализ научных публикаций позволил семантический анализ – метод обработки информации, в котором наиболее часто встречающиеся в научных публикациях ключевые слова или словосочетания систематизируются и взаимосвязываются по частоте повторов.

Совокупность результатов анализа научных публикаций, семантического анализа и патентного анализа выявили значимые на временном горизонте рассмотрения ключевые тренды инновационного развития алмазных и алмазных композитных теплоотводов:

- целевые электронные устройства: «транзистор с высокой подвижностью электронов», «лазер»;
- технические характеристики: «эффективная теплопроводность», «теплоотводы высокой мощности»;
- конструктивные решения: «микрочанальный теплоотвод», «наножидкости», «алмазные покрытия»;
- материалы: «CVD-алмаз», «алмазные пленки», «алмазно-медный композит», «алмазно-алюминиевый композит», «матричные композиты», «металломатричные композиты».

Указанные тренды наглядно иллюстрируют научные разработки и запатентованные решения (табл. 11), появившиеся преимущественно в течение последних нескольких лет.

Результаты представленного выше анализа позволяют определить инновационный потенциал развития алмазных теплоотводов следующим образом:

- производство алмазных CVD-пластин, сопоставимых по площади с промышленными подложками из кремния или сапфира для коммерческого производства полупроводниковых микрочипов групповыми методами;
- разработка и производство композитных алмазных материалов и теплоотводов на их основе;
- разработка и производство 2,5D- и 3D-алмазных и алмазных композитных теплоотводов для всех уровней архитектуры (подложки, микрочипы, модули, устройства) экстремальной электроники;
- разработка и создание «интеллектуальных» алмазных и алмазных композитных теплоотводов, обладающих сенсорными, управляющими и преобразующими функциями в составе устройств экстремальной электроники.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ современного состояния и инновационного потенциала развития алмазных и алмазных композитных теплоотводов позволяет заключить следующее:

- ожидаемый спрос на алмазные и алмазные композитные теплоотводы для электронных устройств всех уровней архитектуры представляет собой окно возможностей для развития и устойчивого функционирования рынка;
- рынок производителей (как международный, так и российский) алмазных и алмазных композитных теплоотводов находится в стадии активного формирования и подъема;
- ассортимент выпускаемых на мировом и российском рынках алмазных и алмазных композитных теплоотводов в настоящее время не в полной мере отвечает потребностям развития электроники;
- перспективные разработки теплоотводящих конструкций (табл. 11) в требуемой степени коммерчески не реализованы.

Имеющийся в России научно-инженерный, индустриальный и образовательный потенциалы, а также сформировавшиеся компетенции, международное признание и превосходство в области синтеза крупных монокристаллов искусственных алмазов достаточно высокого структурного совершенства позволяют сформировать российскую инновационную технологическую нишу в области инженерии алмаза с широким и длительным горизонтом конкурентоспособной экономически эффективной реализации [12, 13]. Алмазная продукция, исходя из совокупности рекордных базовых функциональных возможностей материала, создает предпосылки к альтернативному, с элементами отечественного превосходства, выполнению программ

Таблица 11. Перспективные научные разработки и запатентованные решения алмазных и алмазных композитных теплоотводов

Тип теплоотвода	Конструкция теплоотвода	Источник
Алмазный 1D-теплоотвод	Алмазный пленочный теплорассеиватель GaN-LED	High bandwidth GaN-based blue LEDs using Ag-grating and diamond heat sink. / Ruijie Xie, Zhiquan Li, Shiliang Guo et al // Photonics and Nanostructures – Fundamentals and Applications. – 2020. – Vol. 42. 100856.
	Пленочный алмазный теплоотвод HEMT на Si-подложке	Китай, патент № 107731903, 2017
Алмазный композитный 1D-теплоотвод	Планарный медный теплоотвод с пленочным покрытием из наночастиц алмаза	Китай, патент № 110670035, 2020
	Планарный медный теплоотвод с композитным согласующим металлическим пленочным покрытием и алмазным покрытием	Китай, патент № 113084176, 2021
Алмазный 2D-теплоотвод	Алмазный планарный теплоотвод мощного СВЧ-транзистора	Heatsink diamond nanostructures for microwave semiconductor electronics. / P. P. Maltsev, S. V. Redkin, I. A. Glinskiy et al // Nanotechnologies in Russia. – 2016. – Vol. 1, № 7–8. – PP. 480–490.
	Алмазный монокристаллический планарный теплоотвод	Россия, патент № 2757042, 2021
Алмазный композитный 2D-теплоотвод	Планарный гибкий композитный теплоотвод (микрочастицы алмаза в композитной медно-графеновой матрице)	Китай, патент № 113233875, 2021
	Алмазный композитный теплоотвод (микрочастицы алмаза в медно-никелевой матрице)	Китай, патент № 111676382, 2020
	Планарный композитный теплоотвод (трехслойный алмазный наполнитель из микрочастиц алмаза различного размера в металлической матрице)	Китай, патент № 112981163, 2021
Алмазный 2,5D-теплоотвод	Алмазный микроканальный теплоотвод, собранный из двух пластин, проточного типа	Китай, патент № 111223929, 2020
	Планарный алмазный микроканальный теплоотвод для полупроводникового лазера	Китай, патент № 113337806, 2021
	Планарный алмазный микроканальный теплоотвод с продольными внутренними микроканалами	Китай, патент № 113161307, 2021
Алмазный композитный 2,5D-теплоотвод	Алмазно-медный микроканальный теплоотвод проточного типа	Китай, патент № 212666860, 2020
	Алмазно-медный микроканальный теплоотвод замкнутого типа с внутренней паровой полостью	Китай, патент № 105682428, 2016

Таблица 11. Продолжение

Тип теплоотвода	Конструкция теплоотвода	Источник
Алмазный 3D-теплоотвод	Алмазный 3D-теплоотвод, интегрированный в корпус мультичипового электронного устройства	США, патент № 2021257272, 2021
	Алмазный 3D-теплоотвод (планарный алмазный теплораспределитель с припаянными к нему алмазными ребрами жесткости) с прямым жидкостным охлаждением	США, патент № 2020088482, 2020
	Алмазный теплоотвод-корпус (основание и крышка) СВЧ-прибора	Россия, патент № 2749572, 2020
Алмазный композитный 3D-теплоотвод	3D-теплоотвод, все конструктивные элементы которого (каркас, охлаждающие ребра и отражатель) выполнены из алмазно-металлического композитного материала	Китай, патент № 12786456, 2021
	Медный микроканальный теплоотвод с алмазным пленочным покрытием внутренней поверхности микроканалов	Китай, патент № 110690186, 2020

импортозамещения и импортнезависимости, открывая возможность обеспечения технологического суверенитета при решении задач в оборонно-промышленном, атомно-энергетическом и ракетно-космическом комплексах, а также в гражданском секторе.

Работа выполнена в рамках проекта Минпромторга России № 020-11-2021-1439 «Разработка технологии и оборудования синтеза алмазов для электроники в широком ассортименте».

ЛИТЕРАТУРА

1. **Афанасьев А. В., Бохов О. С., Ильин В. А., Лучинин В. В.** Технология синтеринга в силовой и импульсной электронике на основе карбида кремния // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2022. № 2 (00213). С. 98–105.
2. **Лучинин В. В.** Национальные технологические приоритеты. Алмазная экстремальная электроника // НАНОИНДУСТРИЯ. 2018. Т. 11. № 2. С. 156–169.
3. **Ланин В. Л., Телеш Е. В.** Алмазные теплоотводы для изделий электроники повышенной мощности // Силовая электроника. 2008. № 3. С. 120–124.
4. **Maltsev P. P., Redkin S. V., Glinskiy I. A., Poboikina N. V., Duknovskiy M. P., Fedorov Yu. Yu., Smirnova A. K., Kulikov E. N., Shcherbakov S. V., Leontiev I. A., Kudryashov O. Yu., Skripnichenko A. S.** Heatsink diamond nanostructures for microwave semiconductor electronics // Nanotechnologies in Russia. 2016. Vol. 11. № 7–8. PP. 480–490.
5. **Роголин В. Е., Крымский М. И., Крымский К. М.** О некоторых применениях алмазов в силовой оптике и электронике // Радиотехника и электроника. 2018. Т. 63. № 11. С. 1188–1196.
6. **Лучинин В. В., Колядин А. В., Машинский К. А.** Алмазная индустрия – российский инновационный вызов // Инновации. 2020. № 4 (258). С. 3–9.
7. Официальный сайт A.L.M.T Corp. <https://www.allied-material.co.jp/en/products/heatspreader.html>.
8. **Вяхирев В. Б., Духновский М. П., Ратникова А. К., Федоров Ю. Ю.** Изолирующие теплоотводы на основе CVD-алмаза для силовой электроники // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. 2009. Вып. 3 (502). С. 36–40.
9. **Мелешкевич П. М., Вашингтон С. А., Духновский М. П., Куликов Е. Н.** О возможности применения пластин CVD-алмаза в качестве конструктивных элементов в приборах СВЧ // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. 2020. Вып. 3 (546). С. 91–100.
10. **Мartiнович В. А., Хорунжий И. А., Русецкий М. С., Казючиц Н. М.** Исследование алмазного теплоотвода со встроенным датчиком температуры // Физико-математические науки: тезисы докладов 78-й научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов (с международным участием). Минск: БГТУ. 2014. С. 22–24.
11. **Ратникова А. К.** Теплоотводящие подложки на основе поликристаллического CVD-алмаза // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. 2011. Вып. 3 (510). С. 76–86.
12. **Вихарев А. Л., Лучинин В. В.** CVD алмаз – материал для нового поколения электронных приборов. Выращивание, характеристики и некоторые применения // Электроника и микроэлектроника СВЧ. 2015. Т. 1. С. 29–33.
13. **Muchnikov A. B., Viharev A. L., Radishev D. B., Isaev V. A., Ivanov O. A., Gorbachev A. M.** A wafer of combined single-crystalline and polycrystalline CVD diamond // Materials Letters. 2015. Vol. 139. PP. 1–3.