

Алмазная индустрия — российский инновационный вызов

Diamond industry - challenge from Russian innovation

doi 10.26310/2071-3010.2020.258.4.001



В. В. Лучинин,

д. т. н., профессор, зав. кафедрой микро- и наноэлектроники, директор Центра микротехнологии и диагностики, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
✉ cmid_leti@mail.ru

V. V. Luchinin,

doctor of technical sciences, professor, head of the department of micro- and nanoelectronics, director of the Center for microtechnology and diagnostics, Saint Petersburg electrotechnical university «LETI»



А. В. Колядин,

к. т. н., доцент, генеральный директор, ООО Индустриал Даймонд, ООО ИНРЕАЛ
✉ avkoliadin@gmail.com

A. V. Koliadin,

CEO, Industrial Diamond, LLC, INREAL, Ltd.



К. А. Машинский,

магистр международного права, зам. генерального директора, АК «АЛРОСА» (ПАО)
✉ mashinskiyka@alrosa.ru

K. A. Mashinskiy,

LLM, VP, «ALROSA» PJSC

Представлен технологический форсайт алмаза, как материала с критической миссией при создании техники нового поколения с ранее недостижимыми функциональными возможностями, режимами и условиями эксплуатации. Отечественная алмазная индустрия характеризуется технологической независимостью и имеет высокий экспортный потенциал.

This paper presents technology foresight for diamonds as emerging materials for the next generation device to realize functional goals and operating conditions that were previously unattainable. Domestic diamond industry is characterized by the technological autonomy with high export potential.

Ключевые слова: синтетический алмаз, форсайт, российская индустрия, импортнезависимость, экспортный потенциал.

Keywords: synthetic diamond, foresight, Russian industry, import independence, export potential.

Введение

Углерод (от лат. *carboneum* — уголь) является достаточно широко распространенным в природе химическим элементом (содержание углерода в теле человека — 21% (масс.), а в земной коре — 0,16% (масс.)), которому присущ атомно-молекулярный энергетический конформизм, определяющий структурно-функциональное и физико-химическое разнообразие углеродосодержащих материалов, в также их органо-неорганическую конвергенцию.

Наиболее яркий представитель «углеродного сообщества» — алмаз (от греч. *adamas* — несокрушимый), углеродная природа которого была разгадана лишь в конце XVIII века, — остается уникальным дорогостоящим материалом, востребованным много веков в ювелирной, а последнее столетие и в инженерной среде. Наиболее широко алмаз известен как драгоценный камень — бриллиант (от фр. *brilliant* — блестящий) и уникальный абразив.

Синтетический алмаз — рукотворный аналог природного минерала — занял устойчивые позиции на алмазном рынке. Наряду с ювелирным и абразивным алмазом — значительный интерес вызывает получение и применение крупных синтетических

монокристаллов высокого структурного совершенства и чистоты, а также микро- и наноразмерных управляемо легированных слоев алмаза для решения экстремальных инженерно-технических задач.

В условиях известных ограничений в поставках на российский рынок критически важных инновационных материалов и технологий, формирование высокоинтеллектуальных отечественных технологических ниш для обеспечения независимости, конкурентоспособности и безопасности государства является безусловным приоритетом.

Целью данной статьи является введение в технологический форсайт для построения дорожной карты проекта по формированию полностью независимой отечественной инновационной алмазной индустрии, которая может рассматриваться как российский вызов в достижении превосходства в высокоинтеллектуальной наукоемкой сфере с длительным горизонтом конкурентоспособной экономически эффективной реализации.

Алмаз — материал с «критической» миссией

Обладая совокупностью уникальных электрофизических, теплофизических, оптических и механических свойств (рис. 1) алмаз становится



Рис. 1. Сопоставительный анализ материалов для решения экстремальных инженерно-технических задач

научно-индустриальным конструкторско-технологическим приоритетом при создании техники нового поколения с ранее недостижимыми функциональными возможностями, режимами и условиями эксплуатации.

Перспективы доминирования алмаза в технических системах с критической миссией систематизированы в рамках таблиц (табл. 1-3), отражающих «рекордные» характеристики алмаза и области их эффективного использования [4-6]. Приоритетными рекордными свойствами алмаза безусловно являются механическая твердость, теплопроводность [7], критическая напряженность электрического поля [8], скорость распространения звука и как обобщающий фактор, характе-

ризующий «сопротивляемость» материала к внешним воздействиям — высокая температура Дебая.

Несмотря на разгадку в конце XVIII века углеродной природы алмаза, прошло более полутора веков, прежде чем в Швеции, СССР и США в начале 1950-х гг. были выращены синтетические алмазы с использованием двух видов технологий: CVD (Chemical Vapor Deposition) — химическим осаждением из газовой фазы [1, 3] и термобарическим методом НРНТ (High Pressure, High Temperature) — кристаллизацией алмаза из расплава углерода при высоких температуре и давлении в присутствии металлических катализаторов [2], К сожалению, на современном уровне развития технологий получения

Таблица 1

Использование рекордных характеристик алмаза

Приоритетные (рекордные) свойства алмаза	Направления. Области применения					
	СВЧ-электроника	Силовая электроника	Фотоэлектроника	Микро-системная техника	Информационные технологии	Механо-обработка
Механическая твердость 10000 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*	×	×	×	×	×	×
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 4500 см ² /В·с; дырок 2100 см ² /В·с	×	×			×	
Удельное сопротивление при 20°С 10 ¹³ Ом·см	×	×		×		
Относительная диэлектрическая проницаемость 5,5	×	×	×	×	×	
Химическая стойкость				×		×
Радиационная стойкость	×	×	×	×	×	

Примечание: * — рекордные значения. Рекордная температура Дебая равна 1860 К — интегральная характеристика материала, определяющая его устойчивость к термическому, энергетическому, радиационному и химическому воздействиям.

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	×		×			

искусственного синтетического алмаза не обеспечивается возможность организации интегрально-группового промышленного производства широкой номенклатуры наукоемкой продукции.

Ограничения по организации промышленного производства приборов на основе алмаза:

- отсутствие монокристаллических подложек алмаза больших размеров (20 мм и более);
- высокое удельное сопротивление монокристаллов алмаза (более 10^{13} Ом·см) и отсутствие эффективных способов легирования материала с достижением необходимого уровня концентрации носителей заряда при комнатной температуре из-за значительной энергетической глубины залегания электрически активных примесей;
- достаточно высокий фон (10^{16} см⁻³) неконтролируемых примесей в выращенных монокристаллах синтетического алмаза;

- ярко выраженное секториальное распределение примесей в легированных монокристаллах синтетического алмаза в процессе роста;
- отсутствие структурно совершенных (с плотностью дислокаций менее 10^3 см⁻²) объемных монокристаллов и эпитаксиальных слоев алмаза.

Комплекс современных ограничений на развитие промышленного микроприборостроения на алмазе отражает табл. 4.

Прогрессивные материаловедческие тенденции в технологии алмаза обобщены на рис. 2.

Российский алмазный вызов — проект «Алмазная индустрия»

Отечественная научно-технологическая школа алмаза сохраняет определенный международный паритет, а по технологии выращивания крупных

Таблица 3

Экстремальные характеристики, достигаемые при использовании алмаза

Направление	Экстремальные характеристики
СВЧ-электроника	Произведение «мощность–частота». Прозрачность для электромагнитного излучения в широком частотном диапазоне. Работа при повышенных температуре и радиации
Силовая электроника	Высокие рабочие напряжения и плотности тока. Высокая импульсная коммутируемая мощность. Работа при повышенных температурах и радиации
Фотоника	Чрезвычайно широкий спектральный рабочий диапазон от СВЧ до рентгеновского излучения. Возможность функциональной интеграции СВЧ и оптического излучений. Работа при высоких уровнях энергетических воздействий
Микросистемная техника	Повышенные механические характеристики в отношении механической прочности, истираемости, разрушения. Устойчивость к воздействию повышенных температур и локальному энерговыделению. Инертность в химически активных и биологических средах
Информационные технологии	Ранее недостижимые скорости обработки и обмена информацией. Использование УФ и рентгеновских диапазонов частот для обмена информацией. Устойчивость к радиационным воздействиям
Механообработка	Высокая скорость механообработки. Высокое качество поверхности: шероховатость, нарушенный слой. Возможность сверхлокальной микро- и наноразмерной обработки. Устойчивость микроинструмента к разрушению, истиранию. Неограниченные возможности по виду обрабатываемых материалов

Современные ограничения для развития промышленного микроприборостроения на алмазе

№	Характеристики, особенности материала	Ограничения для промышленного использования
1	Малая площадь монокристаллов подложек	Низкая эффективность использования традиционного оборудования для интегрально-групповой технологии
2	Низкое структурное совершенство монокристаллов и эпитаксиальных слоев	Ограничение на достижение конкурентоспособных и рекордных параметров приборов
3	Очень низкое структурное совершенство составных и мозаичных подложек большой площади	Ограничение на использование композиционных подложек для силовой, высокочастотной и информационной электроники
4	Низкое структурное совершенство гетероэпитаксиальных алмазных структур из-за значительного рассогласования кристаллических решеток	Ограничение на использование гетероструктур для силовой, высокочастотной и информационной электроники
5	Наличие существенного уровня фоновой примеси – азота	Ограничения на оптические и электрические характеристики базового материала
6	Низкая эффективность легирующих примесей из-за значительных глубин ее залегания	Требуются высокие уровни легирования для обеспечения необходимой концентрации носителей заряда, что отрицательно сказывается на их подвижности
7	Наличие фактически единственного эффективного акцептора – бора	Ограниченные возможности по созданию твердотельных приборов с р-п переходом или проводящим каналом, только р-тип
8	Сильная температурная зависимость подвижности носителей заряда	Снижение эффективности прогнозируемых возможностей работы приборов при высоких температурах
9	Отсутствие собственного окисла	Необходимость использования инородных диэлектриков или собственного нелегированного алмаза

структурно-совершенных монокристаллов превосходят в этой инновационной наукоемкой сфере.

Разработка и внедрение в промышленное производство микротехники нового поколения на основе синтетического алмаза требует системной кооперации производителя микроприборов с изготовителем базового материала и производных алмазных композиций, поэтому конкурентными преимуществами будут обладать консорциумы, имеющие полный сквозной замкнутый цикл производства и обладающие компетенциями от роста кристаллов и синтеза эпитаксиаль-

ных структур до базовых процессов проектирования алмазных изделий и их технологической реализации интегрально-групповыми методами.

Ниже представлены базовые положения системного анализа проекта «Алмазная индустрия» с использованием ключевых представлений дорожной карты: ожидание от цели, миссия продукта, риск и ограничения, средства достижения цели.

Проект формировался на основе интеграции научно-инженерного, индустриального и образовательного потенциалов нескольких российских организаций, кадровый потенциал которых, имеющиеся ком-



Рис. 2. Современные тенденции в технологиях синтетических алмазов

Таблица 5

Ожидание от цели — зачем мы это делаем?

Сильные стороны Достоинства и возможности	Слабые стороны Особенности и неопределенности
Решается национальная задача – создание отечественной наукоемкой конкурентоспособной технологии превосходства. Имеются обоснованные финансово подкрепленные «алмазные» амбиции – желание их сохранить, преумножить и быть лидером. Наличие базовых элементов современной инфраструктуры, обеспечивающих производство определенной продукции, ее востребованность и финансовую устойчивость. Наличие компетенций, консорциума организаций и команды профессионалов для развития производства и формирования рынка продукции. Имеющийся инженерный задел по отдельным видам алмазной продукции и технологии позволяет монополизировать некоторые сектора рынка	Имеет место международная конкуренция с возможной потерей имеющегося рынка. Необходимы значительные финансовые инвестиции для получения корпоративного синергетического эффекта и освоения новых рынков. Отсутствует явная индустриальная востребованность широкой номенклатуры современного алмазного продукта. Ограниченные возможности использования государственных источников финансирования развития инфраструктуры, исходя из значительных сроков окупаемости

Таблица 6

Характеристика и миссия продукта. Прогноз рынка и эффективность товара

Достоинства	Особенности
Бренд продукта как уникального и престижного. Нет альтернативы данному продукту в ближайшей перспективе. Отсутствие индустриального зарубежного и отечественного производства аналогичной уникальной высокотехнологичной продукции	Рекордные, но слабо используемые характеристики продукта. Недостаточное понимание заказчиками возможностей продукта. Неопределенность в ценообразовании из-за высокой интеллектуально добавленной стоимости продукта и его новизне. Слабая государственная поддержка новой продукции в рамках госзаказа

петенции и инфраструктура позволяют сформировать российскую инновационную технологическую нишу в области инженерии алмаза с длительным сроком конкурентоспособной реализации.

Следует особо отметить, что наукоемкой инновационной научно-индустриальной основой консорциума является материаловедческий базис с совокупностью базовых технологий синтеза и модифицирования алмаза:

- крупные монокристаллы для подложки больших размеров;
- объемные легированные и чистые эпитаксиальные слои;
- дельта-легированные эпитаксиальные структуры;
- алмазные структуры с поверхностно-модифицированными слоями;
- гетероэпитаксиальные структуры алмаза на ино-родной подложке;

- ионно-легированные анизотипные структуры. Ключевые параметры для нового поколения создаваемых алмазных материалов определены в рамках следующих требований:

- максимальные размеры монокристаллических подложек (>25 мм);
- минимальная плотность дислокаций (10^2 см^{-2});
- минимальный фон неконтролируемых примесей ($<10^{16} \text{ см}^{-3}$);
- диапазон уровней легирования донорами и акцепторами ($10^{16}-10^{21} \text{ см}^{-3}$).

Результат выполненного анализа проекта системно упорядочены в рамках совокупности таблиц (табл. 5-8), отражающих сильные и слабые стороны проекта, возможности и неопределенности.

Обобщенный анализ «алмазной ситуации» в России представлен в табл. 9.

Таблица 7

Риски, ограничения и конкуренция

Достоинства	Особенности
Нарастает потребность у заказчиков иметь уникальную продукцию как комплектующие изделия для обеспечения конкурентоспособности более сложных функциональных систем. Имеется востребованность продукции за рубежом. Нет конкурентов по определенному виду, уникальной, востребованной продукции в России и за рубежом. Имеются компании заинтересованные в оказании маркетинговых посреднических услуг для продажи продукции за рубежом	Отсутствуют устойчивые отечественные заказчики на продукцию. Ограничена возможная номенклатура поставляемой продукции. Требуются значительные маркетинговые исследования, интеллектуальные и финансовые затраты для формирования рынка продукции. Неоднократно более раннее обращение к алмазной продукции не достигло необходимого эффекта

Таблица 8

Средства достижения цели

Достоинства и возможности	Особенности и неопределенности
Достигнута договоренность об интеграции имеющегося интеллектуального и кадрового потенциалов в рамках консорциума с корпоративным взаимодействием организаций и специалистов с учетом предыдущего опыта. Имеется возможность вхождения в государственные и отраслевые программы с наукоемкой инновационной продукцией с экспортным потенциалом. Имеются предложения по кооперации с зарубежными организациями для выхода на зарубежные рынки с высокоинтеллектуальной уникальной продукции. Определены возможные отечественные инвесторы в для развития индустриальной инфраструктуры	Имеет место целенаправленные финансовые вложения в инфраструктуру и кадровый потенциал с высоким уровнем компетенций со стороны зарубежных конкурентов. Отсутствует целенаправленная информационная политика в области формирования имиджа отечественной наукоемкой конкурентоспособной продукции нового поколения. Отсутствует специализированная подготовка и повышение квалификации кадров для развития алмазной индустриальной ниши с учетом мультидисциплинарности продукции

Индустрия синтетического алмаза в России

Сильные стороны	Слабые стороны
Наличие базовых конкурентоспособных технологий и оборудования. Имеется мелкосерийное контрактное производство уникальной конкурентоспособной продукции. Сформирован бренд России как поставщика уникальной конкурентоспособной продукции. Имеет место конкретная заинтересованность и спрос на отечественную продукцию у известных зарубежных организаций. Формируются новые наукоемкие ниши, где уникальная продукция выступает как полуфабрикат в виде уникального комплектующего изделия. Формируется отечественный консорциум с возможностью реализации производства продукции в рамках внутривоспитательской кооперации	Абразивный и бриллиантовый рынки алмаза сформированы, инженерно-технический рынок синтетического алмаза находится на стадии формирования. Специализированная целенаправленная «алмазная программа» с длительным конкурентоспособным горизонтом реализации в России отсутствует. Инженерный имидж алмаза для большинства возможных потребителей-заказчиков не ясен и требует реализации информационно-образовательных и маркетинговых мероприятий. Конкуренция со стороны зарубежных стран на рынке алмаза нарастает и требуется системный анализ и диверсификация продукции при значительных финансовых вложениях в развитие инфраструктуры, научно-инженерных разработок и кадрового потенциала

Вывод

«Индустриальное» время технологий синтетического алмаза для решения экстремальных инженерно-технических задач (рис. 3) — настало и ряд из них, без данного материала эффективно и конкурентоспособно решены быть не могут.

«Алмазный проект» — успех или стагнация

Ключевые факторы успеха «алмазного проекта»:

- Наличие концепции и плана развития проекта, учитывающих состояние и перспективы мирового рынка алмазной продукции и возможные запросы российских потребителей.
- Развитая научно-технологическая и реальная производственная база участников проекта, научно-практический задел и профессионально отобранный кадровый потенциал, что определяет перспективы достижения поставленных задач по параметрам создаваемой продукции в ограниченном временном интервале с минимальными затратами.

- Наличие опыта в реализации опытно-конструкторских разработок устройств аналогичного функционального назначения на других материалах и элементной базе, знание их заказчиков и базовых технических требований к аналогам, что обеспечивает ускорение процесса трансфера и внедрения наукоемкой продукции нового поколения в промышленное производство и востребованность изделий на основе алмаза.
- Основные риски и угрозы при развитии индустрии синтетического алмаза:
- Отсутствие в настоящее время в России системных потребителей продукции в промышленных масштабах.
 - Отсутствие со стороны государства эффективных действий по избирательной поддержке наукоемких производств с реально конкурентоспособной отечественной высокотехнологичной инновационной продукцией, определяющей экспортный потенциал России и ее технологический суверенитет.
 - Выход на российский рынок мировых лидеров аналогичной продукции с одновременной реализацией агрессивной маркетинговой политики.



Рис. 3. Приоритеты алмазной электроники, фотоники, микросистемной техники

Заключение

- Синтетический алмаз как яркая рукотворная инновационная звезда с рекордными параметрами и функциональными возможностями станет востребованным инженерно-технологическим бриллиантом при синтезе материала экстремального высокого качества по структурному совершенству и чистоте, промышленно востребованным геометрическим размерам и стоимостью.
- Разработка и внедрение в промышленное производство микротехники нового поколения на основе алмаза требует системной кооперации производителя микроприборов с изготовителем базового материала и производных алмазных композиций.
- Алмазная продукция, исходя из широких базовых функциональных возможностей материала, создает предпосылки к альтернативному с элементами превосходства выполнению программы импортозамещения и импортонезависимости, предопределяя высокий экспортный потенциал отечественной продукции.
- Экспортный потенциал алмазных материалов и приборов находится на высоком уровне и успех реализации продукции на мировом рынке, наряду с его уникальностью, стабильностью качества и ценовых критериев во многом зависит от маркетинговых усилий, наличия зарубежных партнеров, научно-технологической и индустриально-экономической политики государства.

Список использованных источников

1. Б. Ф. Дерягин, Д. В. Федосеев. Рост алмазов и графита из газовой фазы. М.: Недра, 1978. С. 200.
2. В. Д. Бланк, Э. И. Эстрин. Фазовые превращения в твердых телах при высоком давлении. М.: Физматлит, 2011. С. 412.
3. A. L. Vikharev, A. M. Gorbachev, M. A. Lobaev et al. Novel microwave plasma assisted CVD reactor for diamond delta doping//Physica Status Solidi RRL, 10 (2016), 324.
4. Р. А. Хмельницкий, Н. Х. Талипов, Г. В. Чулева. Синтетический алмаз для электроники и оптики. М.: Икар, 2017. С. 228.
5. В. В. Лучинин. Национальные технологические приоритеты. Алмазная экстремальная электроника//Наноиндустрия. Т. 11. № 2 (81). 2018. С. 156-169.
6. Н. И. Алексеев, В. В. Лучинин. Электроника алмаза. СПб.: издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2019. С. 143.
7. А. Л. Вихарев, А. М. Горбачев, М. П. Духновский и др. Комбинированные подложки из поли- и монокристаллического CVD-алмаза для алмазной электроники//Физика и техника полупроводников. 2012. Т. 46. Вып. 2. С. 274-277.
8. N. Donato, N. Rouger, J. Pernot et al. Diamond power devices: state of the art, modeling, figures of merit and future perspective//J. Physics: Applied Physics. 2020. № 53. P. 093001-093039.

References

1. B. F. Deryagin, D. V. Fedoseev. Diamonds and graphite growth from gas phase. M.: Nedra, 1978. P. 200.
2. V. D. Blank, E. I. Estrin. Phase transformations in solids at high pressure. M.: Fizmatlit, 2011. P. 412.
3. A. L. Vikharev, A. M. Gorbachev, M. A. Lobaev et al. Novel microwave plasma assisted CVD reactor for diamond delta doping//Physica Status Solidi RRL, 10 (2016), 324.
4. R. A. Khmelitsky, N. Kh. Talipov, G. V. Chuneva. Synthetic diamonds for electronics and optics. M.: Icarus, 2017. P. 228.
5. V. V. Luchinin. National Technology Priorities. Diamond Extreme Electronics//Nanoindustry. Vol. 11. № 2 (81). 2018. P. 156-169.
6. N. I. Alekseev, V. V. Luchinin. Diamond electronics. SPb.: publishing house ETU «LETI», 2019. P. 143.
7. A. L. Vikharev, A. M. Gorbachev, M. P. Dukhnovsky et al., Combined substrates of poly- and single-crystal CVD Diamond for Diamond Electronics//Physics and Technology of Semiconductors. 2012. Vol. 46. № 2. P. 274-277.
8. N. Donato, N. Rouger, J. Pernot et al. Diamond power devices: state of the art, modeling, figures of merit and future perspective//J. Physics: Applied Physics. 2020. № 53. P. 093001-093039.