

УДК 621.382

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ И СИНТЕТИЧЕСКИХ АЛМАЗОВ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

Е. Б. ШЕРШНЕВ<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины,  
ул. Советская, 104, 246019, г. Гомель, Беларусь

**Аннотация.** Проведен анализ зависимостей тепло- и электрофизических характеристик природных и синтетических алмазов типов Ia, Ib, Па и Пб от специфики строения их кристаллической решетки. Описаны физико-химические и технологические особенности обработки алмаза импульсным лазерным излучением при использовании коротких и ультракоротких лазерных импульсов в широком диапазоне длин волн и интенсивностей лазерного излучения. Показано, что при варьировании параметров лазерного излучения, таких как длительность импульса, частота следования импульсов и интенсивность лазерного излучения, могут быть реализованы различные механизмы управляемого удаления материала для формирования объемных микроструктур. Представлены основные перспективные области применения алмазных и алмазосодержащих компонентов в производстве изделий электронной техники.

**Ключевые слова:** применение алмазов в микроэлектронике; теплофизические характеристики алмаза; хрупкое разделение алмаза лазерным излучением; ультракороткие лазерные импульсы.

---

### Образец цитирования:

Шершнев ЕБ. Использование природных и синтетических алмазов при проектировании изделий электронной техники. *Журнал Белорусского государственного университета. Физика*. 2025;2:49–59.  
EDN: HZQOYZ

### For citation:

Shershnev EB. Use of natural and synthetic diamonds in the design of electronic equipment products. *Journal of the Belarusian State University. Physics*. 2025;2:49–59. Russian.  
EDN: HZQOYZ

---

### Автор:

**Евгений Борисович Шершнев** – доктор технических наук, доцент; заведующий кафедрой общей физики факультета физики и информационных технологий.

### Author:

**Evgeniy B. Shershnev**, doctor of science (engineering), docent; head of the department of general physics, faculty of physics and information technologies.  
[eshershnev@gsu.by](mailto:eshershnev@gsu.by)  
<https://orcid.org/0000-0002-9783-1008>

## USE OF NATURAL AND SYNTHETIC DIAMONDS IN THE DESIGN OF ELECTRONIC EQUIPMENT PRODUCTS

E. B. SHERSHNEV<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Francisk Skorina Gomel State University, 104 Savieckaja Street, Gomel 246019, Belarus

**Abstract.** An analysis of the dependencies of the thermal and electrophysical characteristics of natural and synthetic diamonds of types Ia, Ib, IIa and IIb on the specifics of their crystal lattice structure was conducted. The physicochemical and technological features of diamond processing by pulsed laser radiation using short and ultrashort laser pulses in a wide range of wavelengths and intensities of laser radiation are described. It is shown that by varying laser radiation parameters such as pulse duration, pulse repetition frequency and intensity of laser radiation, various mechanisms of controlled material removal can be implemented to form volumetric microstructures. The main promising areas of application of diamond and diamond-containing components in the manufacturing of electronic products are presented.

**Keywords:** application of diamonds in microelectronics; thermophysical characteristics of diamond; brittle separation of diamond by laser radiation; ultrashort laser pulses.

### Введение

По сочетанию важнейших параметров, необходимых для создания электронных приборов, самым перспективным материалом можно считать алмаз [1]. Специфика кристаллической решетки алмаза с ее ковалентными связями предопределяет ряд особенностей этого материала. При ширине запрещенной зоны 5,45 эВ удельное сопротивление нелегированного алмаза составляет  $10^{13}$ – $10^{14}$  Ом · см, напряженность электрического поля, при котором возникает его пробой, достигает  $10^7$  В/см. Алмаз является чрезвычайно химически устойчивым материалом. В присутствии кислорода он окисляется при температурах выше 900 К, в условиях высокого вакуума его поверхностная графитизация наблюдается при температуре около 1700 К. Алмаз имеет наивысшую теплопроводность (20–24 Вт/(см · К) при температуре 300 К), что связано с его рекордно высокой температурой Дебая (1860 К), по сравнению с которой комнатная температура является относительно низкой. Следовательно, алмаз выступает оптимальной теплоотводящей диэлектрической подложкой. Более того, в очищенном от изотопов алмазе теплопроводность может достигать 33 Вт/(см · К) [2].

Также алмаз представляет собой радиационно стойкий материал. Он является прозрачным в широком диапазоне спектра (от ультрафиолетового до радиоволнового), имеет высокую твердость (81–100 ГПа), рекордно высокую скорость распространения звука (18 км/с), низкую диэлектрическую проницаемость (5,7). Благодаря таким уникальным свойствам алмазы используются в качестве теплоотводящих пластин в СВЧ-транзисторах, мощных мультичиповых модулях и линейках полупроводниковых лазеров. Кроме того, алмазы могут широко применяться для изготовления окон мощных гиротронов, клистронов, CO<sub>2</sub>-лазеров, микроэлектромеханических систем, акустоэлектронных устройств (фильтров на поверхностных акустических волнах гигагерцевого диапазона) и детекторов ионизирующего излучения [1]. Технологии химического осаждения из газовой фазы (*chemical vapour deposition*, CVD) расширили возможности создания на основе алмазных пленок СВЧ-приборов, теплопроводящих подложек для электроники, элементов конструкций в лампах бегущей волны, приборов акустоэлектроники, лазерных диодов, прототипов квантовых компьютеров, оборудования для астрономии, призм, линз, терагерцевых излучателей и радаров, проводящих наноалмазов для терапии и доставки лекарств к поврежденным органам, нанокристаллических алмазных покрытий с контролируемой проводимостью, радиационно стойких детекторов<sup>1</sup>.

### Особенности теплопроводности различных типов алмазов

Образцы природных алмазных монокристаллов средних размеров (несколько миллиметров) и синтетических алмазов размером до 1 мм представляют собой сложный объект для измерения теплопроводности. Для достижения этой цели используются особые методики. Теплопроводность крупных образцов (4–10 мм) правильной формы в виде прямого параллелепипеда в интервале температур 3–300 К измеряется с помощью классического абсолютного стационарного метода продольного теплового потока [3]. У таких же образцов при температурах 320–450 К эта характеристика может быть определена с помощью

<sup>1</sup>Алмазные традиции меняют свою структуру: пять причин для новых инвестиций // Российский форум «Микроэлектроника»: сайт. URL: [https://microelectronica.pro/news/round\\_table\\_20231008](https://microelectronica.pro/news/round_table_20231008) (дата обращения: 27.11.2024).

относительного варианта стационарного метода продольного теплового потока с использованием радиационной термометрии [4]. Измерение теплопроводности природных и синтетических алмазов размером до 1 мм произвольной формы осуществляется в интервале температур 300–650 К методом стягивания теплового потока [5].

В основу физической классификации алмазов положены их спектральные особенности. В соответствии со спектрами поглощения выделяют алмазы типов I и II, в структуре кристаллов которых присутствуют примеси азота<sup>2</sup>. Развитие исследований в этом направлении позволило расширить классификацию. Алмазы типа I были подразделены на алмазы типа Ia (содержат непарамагнитные азотные дефекты) и типа Ib (содержат парамагнитный дефект). Среди алмазов типа II были выделены алмазы типа IIa (изоляторы, концентрация А-дефектов не более  $10^{18} \text{ см}^{-3}$ ,  $\rho = 10^{10} - 10^{16} \text{ Ом} \cdot \text{см}$ ) и типа IIb (полупроводники, легированные бором до концентрации  $510 \text{ см}^{-3}$ ,  $\rho = 10^1 - 10^4 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ ). Алмазы, в которых преобладают дислокационные дефекты, приводящие к росту проводимости, иногда относят к типу Ic. В зависимости от содержания примесей синтетические кристаллы относят к типу Ib (парамагнитный азот) и типу IIb (бор). Различная форма роста кристалла, определенный набор структурных дефектов и особенности их распределения в объеме кристалла послужили физическим обоснованием для выделения десяти разновидностей моно- и поликристаллических алмазов [6].

Теплофизические свойства, в частности теплопроводность и теплоемкость, позволяют квалифицировать алмаз как материал, обладающий самой высокой теплопроводностью (70–1000 К). В определенном интервале температур алмазы проводят тепло в пять раз лучше, чем, например, медь (рис. 1).

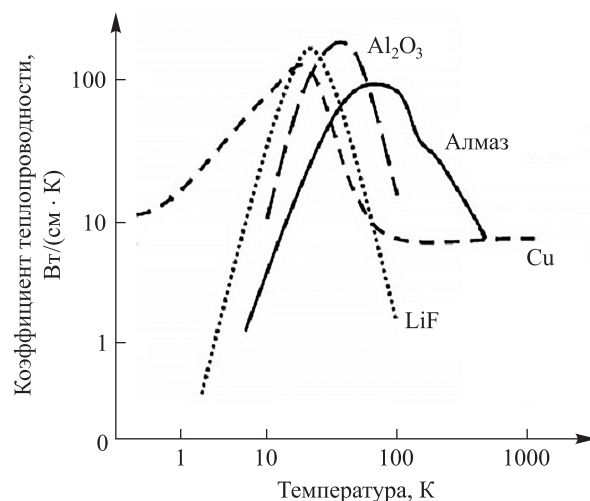


Рис. 1. Зависимость коэффициента теплопроводности различных материалов электронной техники от температуры

Fig. 1. Dependence of the thermal conductivity coefficient of various materials of electronic equipment on temperature

### Физические свойства различных типов алмазов

Коэффициент теплового линейного расширения алмазов рассчитывается на основе показателей постоянной решетки при нагревании и другими способами. У алмазов типа II данный показатель при температуре 800 °С равен  $4,7 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ , при температуре 1700 °С он составляет  $5,5 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ . По данным рентгеновских исследований, линейное расширение алмазов указанного типа при нагреве от 0 до 1400 °С равно 0,58 %, значения указанного выше коэффициента при температурах 25 и 1400 °С составляют  $1,3 \cdot 10^{-6}$  и  $7,0 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$  соответственно<sup>3</sup>.

Типичные значения теплопроводности алмазов типа Ia и типа II при температуре 293 К равны 600–1000 и 2000–2100 Вт/(м · К) соответственно [6]. Максимальные значения теплопроводности алмазов названных типов при температуре около 80 К составляют 2000–4000 и 15 000 Вт/(м · К) соответственно [6].

Высокая теплоемкость алмазов способствует поглощению ими тепловой энергии без существенного увеличения температуры, а высокая теплопроводность – хорошему теплоотводу, что особенно важно для компонентов высокотемпературной электроники.

<sup>2</sup>Алмаз : справочник / Д. В. Федосеев [и др.]. Киев : Наук. думка, 1981. 61 с.

<sup>3</sup>Там же.

Наличие разных типов алмазов связано с многообразием их зонной структуры. При температуре 0 К (для алмазов с идеальной решеткой при температуре 300 К) все разрешенные уровни энергии в валентной зоне заполнены, а зона проводимости является пустой. Обе зоны разделены запрещенной зоной шириной 6 эВ. В реальном кристалле алмаза запрещенная зона оказывается густо заселенной энергетическими уровнями, наличие которых обусловлено примесями и дефектами решетки. К наиболее важным энергетическим уровням следует отнести ближние акцепторные уровни, расположенные на расстоянии 0,1–0,3 эВ от верхней границы валентной зоны проводимости и на том же расстоянии от дна зоны проводимости, и дальние акцепторные энергетические уровни, находящиеся в середине запрещенной зоны [7].

Согласно современным представлениям различия алмазов определяются только примесями и дефектами решетки. Например, алмазы типа I содержат сравнительно большое количество азота, а следовательно, и соответствующее количество энергетических уровней внутри запрещенной зоны, но имеют высокое удельное сопротивление (около  $10^6$  Ом · см). Между тем высокая электропроводность таких полупроводников, как кремний и германий, обуславливается именно этими примесями. Данный контраст объясняется тем, что при формировании полупроводников в них вводится строго контролируемое количество примесей с определенными условиями закрепления в решетке.

В природных алмазах примеси располагаются хаотично и могут компенсировать друг друга (в случае одинакового количества доноров и акцепторов) или образовывать центры захвата дырок и электронов. До некоторой степени примеси выполняют свою роль. Теоретические расчеты показывают, что удельное сопротивление алмазов с идеальной решеткой должно быть примерно  $10^{70}$  Ом · см, т. е. на несколько десятков порядков больше, чем есть на самом деле.

Алмазы типа IIa содержат относительно небольшое количество примесей, однако удельное сопротивление у них такое же, как и у алмазов типа I. Данное обстоятельство объясняется тем, что количество энергетических уровней внутри запрещенной зоны, наличие которых обусловлено примесями, компенсируется относительно большим количеством энергетических уровней, наличие которых определено дефектами решетки.

Высокая электрическая проводимость алмазов типа IIb связана с преобладающим влиянием акцепторных уровней. В отличие от алмазов типов I и IIa, обладающих диэлектрическими свойствами, алмазы типа IIb имеют полупроводниковые свойства. Таким образом, алмаз можно классифицировать как диэлектрик или широкозонный полупроводник.

Природные алмазы типов Ia и Ib, по сравнению с алмазами типов IIa и IIb, имеют значительную примесь азота, концентрация которой может изменяться в довольно широких пределах. Примесь азота в алмазах этих типов обуславливает поглощение в однофононной области инфракрасного спектра, при этом концентрация азотной примеси может быть определена по измеренному коэффициенту поглощения при полосе  $1282\text{ см}^{-1}$ .

Пластинчатые азотные дефекты (плейтелитс), лежащие в плоскости  $\{100\}$  и видимые с помощью просвечивающей электронной микроскопии, определяют появление дополнительного пика поглощения в области  $1350\text{--}1380\text{ см}^{-1}$ . Размеры этих дефектов превышают величину доминирующей длины волны фононов при комнатной температуре, а сами они, по-видимому, не влияют эффективно на теплопроводность. Их обозначают как B2-центры.

Существенное влияние на теплопроводность при температуре 300 К оказывает примесь азота в виде точечных дефектов, проявляющаяся в A- и B1-системах поглощения инфракрасных спектров алмазов типа Ia. В инфракрасных спектрах алмазов типа Ia дефекты в виде A-центров характеризуются основным пиком поглощения в области  $1282\text{ см}^{-1}$ , а дефекты в виде B1-центров – максимумом поглощения между  $1169$  и  $1175\text{ см}^{-1}$ .

В природных алмазах типа Ib примесь парамагнитного азота существенно уменьшает теплопроводность в максимуме. Однако при температурах около 300 К и выше эта примесь в небольшой концентрации не оказывает существенного влияния на величину теплопроводности.

Большинство синтетических алмазов содержат азот в виде атомарной примеси замещения. Концентрация парамагнитного азота в них может изменяться в широких пределах (примерно в диапазоне  $10^{10}\text{--}10^{20}\text{ см}^{-3}$ ). Теплопроводность синтетических кристаллов в максимуме превосходит значения, полученные для самых чистых природных алмазов типа IIa. В то же время изменение концентрации азота примерно до  $10^{10}\text{ см}^{-3}$  существенно не сказывается на величине теплопроводности при температуре 300 К.

Алмаз, так же как кремний и германий, представляет собой ковалентный кристалл. Указанные элементы кристаллизуются в так называемой алмазной решетке. Высокая прочность межатомных ковалентных связей алмаза, обуславливающая наивысшую твердость и используемая до сих пор преимущественно в сфере механической обработки, оказывается определяющей в плане применения его как полупроводника. Алмаз, как полупроводник, обладает следующими уникальными свойствами: высокой рабочей температурой, радиационной и химической стойкостью, высокой теплопроводностью и электрической прочностью.

Переход от использования кремния к применению алмаза и других типов широкозонных полупроводников (SiC, GaP и др.) обеспечивает повышение рабочих температур, допустимого обратного напряжения  $p-n$ -переходов и т. д., а также увеличение полезной мощности, коэффициента полезного действия и предельной рабочей частоты (для СВЧ-приборов). Эти свойства определяются параметрами полупроводников материалов: шириной запрещенной зоны, максимальной скоростью дрейфа носителей тока, напряжением лавинного пробоя, подвижностью электронов и дырок, теплопроводностью и температурой Дебая, которая в отношении алмаза довольно близка к предельной рабочей температуре. Можно считать, что для алмаза более точной границей термической стойкости является температура поверхностной графитизации (около 1700 К в вакууме), поскольку в этом случае в результате фазового перехода происходит принципиальное изменение физических свойств объекта обработки.

Алмаз имеет существенные преимущества перед кремнием и арсенидом галлия как материал оптоэлектроники. В приборах пикосекундной оптоэлектроники используется плазма носителей тока, генерируемая мощным оптическим излучением. Более высокая теплопроводность и электрическая прочность алмаза определяют большую стойкость к электрическому напряжению и импульсному току, т. е. они позволяют создать более высоковольтные и мощные приборы.

Кроме того, уникальность алмаза определяется его оптическими свойствами. Показатель преломления алмаза ( $n$ ) сильно изменяется в зависимости от длины волны (например, от 2,4024 при длине волны 0,762 мкм до 2,4653 при длине волны 0,397 мкм). Среднее значение коэффициента отражения ( $R$ ) при нормальном падении лучей света на кристалл составляет 0,17. Более точное значение можно вычислить по формуле Френеля

$$R = \frac{(n-1)^2}{(n+1)^2}.$$

Оптическое поглощение в видимой зоне спектра может усиливаться за счет дефектов так называемых цветовых центров, которые изучаются методом оптической спектроскопии. В частности, установлено, что включения азота придают природным алмазам желтоватую окраску, а включения бора – голубую окраску. В общем случае наличие дефектов в кристалле алмаза обуславливает важное в практическом отношении свойство – люминесценцию. Алмазы люминесцируют в ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах, а также при облучении ядерными частицами и электронами.

Разнообразие картин двойного лучепреломления алмазов определяется отличием внутреннего строения кристаллов, неодинаковым распределением в них дислокаций, включений, разного рода дефектов, связанных с пластической деформацией и механическими ударами. В наиболее чистых алмазах типов Па и Пб наблюдается край полосы собственного оптического поглощения, наличие которого обусловлено непрямыми переходами электронов из валентной зоны в зону проводимости. Непосредственно к краю данной полосы примыкают узкие полосы экситонного поглощения, наиболее отчетливо проявляющиеся в алмазах типа Ia. В алмазах типов Ia, Ia + Ib и Ic, в которых отмечается пониженное содержание А-дефектов, наблюдаются полосы селективного поглощения, связанные с В2-, С- и D-дефектами. Эти полосы маскируются в алмазах типа Ia с повышенным содержанием А-дефектов сплошной полосой поглощения, начинающейся от края полосы вторичного поглощения вблизи 0,330 мкм. Для алмазов смешанных типов характерно наличие полосы поглощения в видимой области, связанной с N3-дефектами. В настоящее время из всех основных дефектов, определяющих тип алмаза, установлена модель только С-дефекта в виде одиночного замещающего атома азота, проявляющего парамагнитные свойства.

Таким образом, приближенно природные кристаллы алмаза можно разделить на малоазотные кристаллы с краем полосы фундаментального поглощения, которому соответствует длина волны 0,225 мкм ( $E_g = 5,5$  эВ), и сильноазотные кристаллы с непрерывной плотностью состояний в запрещенной зоне и краем полосы вторичного поглощения, которому соответствует длина волны 0,310 мкм ( $E_g = 4,0$  эВ). За границу раздела областей поглощения и прозрачности алмазов можно принять длину волны светового излучения, равную 0,225 или 0,310 мкм. Последний случай встречается на практике чаще. Объемное поглощение энергии в кристалле алмаза возможно только при использовании лазеров на длине волны 0,310 мкм.

В настоящее время приборы на основе полупроводниковых алмазов находят все более широкое применение, поскольку стоимость промышленно выпускаемых синтетических алмазов не превышает стоимость прочих полупроводниковых материалов.

### **Особенности обработки кристаллов алмаза импульсным лазерным излучением в технологиях микроэлектроники**

Технологии, в основе которых лежит использование лазерного излучения с его уникальными свойствами, открыли перспективы для совершенствования выпускаемого продукта и нашли применение для сверления, резания, сварки, термообработки и легирования. Одной из важнейших характеристик лазерного излучения выступает его интенсивность. Общеизвестным является тот факт, что лазерный

луч как нельзя лучше подходит для сообщения материалу больших порций энергии при его промышленной обработке. Лазеры используются во многих областях промышленности, а именно при производстве электронных устройств и медицинских инструментов, резании листового материала, высверливании охлаждающих каналов малого диаметра, термообработке деталей в целях улучшения их поверхностных качеств. Применение лазерных устройств позволило повысить производительность этих операций, что привело к уменьшению занимаемой площади и расходов на амортизацию; снизить затраты на закупку материала, его производство и обработку; повысить качество обработки, в частности уменьшить количество деталей, подвергаемых повторной обработке или отбраковке; улучшить эксплуатационные характеристики; обеспечить лучшие условия труда, а также гибкость лазерного производства [8; 9].

Анализ литературных источников позволяет выделить наиболее важные с точки зрения лазерной обработки характеристики материала. Так как лазерное воздействие является управляемым тепловым процессом, к наиболее значимым относятся следующие характеристики материала:

- отражающая способность поверхности на используемой длине волны и коэффициент поглощения в объемном материале (прямо влияют на поглощение света материалом);
- тепловые коэффициенты проводимости и диффузии (определяют поток теплоты в материале);
- температура превращения, плотность, теплоемкость и скрытая теплота (влияют на способ преобразования энергии, необходимой для желаемого фазового перехода, например для плавления или испарения).

Оптические свойства материала будут определять длину волны, которую следует использовать для эффективного преобразования энергии падающего света в теплоту в материале. Тепловые свойства материала обуславливают режим эксплуатации лазерной установки. Чем меньше коэффициент тепловой диффузии материала, тем его труднее расплавить на любую ощутимую глубину без небольшого испарения, происходящего на поверхности. При испарении материала, имеющего относительно высокий коэффициент диффузии, остается небольшое количество конденсированной жидкой фазы, появления которой можно избежать при использовании более коротких импульсов лазерного излучения.

Из множества лазерных технологий обработки материалов, применяемых при производстве компонентов электронной техники, выделяют такие процессы, как резка, абляция и сварка. В случае применения коротких и ультракоротких импульсов лазерного излучения данные процессы могут осуществляться только в определенных условиях (например, толщина и линейный размер элемента находятся главным образом в микрометровом диапазоне). Высокая точность обработки деталей достигается за счет размера лазерного пятна на поверхности более 0,5 мкм и плотности мощности около  $10^9$  Вт/см<sup>2</sup>, что может быть реализовано путем повышения однородности лазерного луча, управления формой импульса, выбора длины волны лазерного излучения.

В случае использования коротких и ультракоротких лазерных импульсов продолжительностью от 100 фс до 100 нс роль абляционных процессов является преобладающей. Вместе с тем скорость удаления материала из зоны воздействия лазерного излучения может быть незначительной, хотя пиковая мощность лазерного излучения может достигать  $10^{12}$  Вт (рис. 2), что приводит к изменению в свойствах абляции от теплового до термального режима, который связан с понижением поглощательной способности.

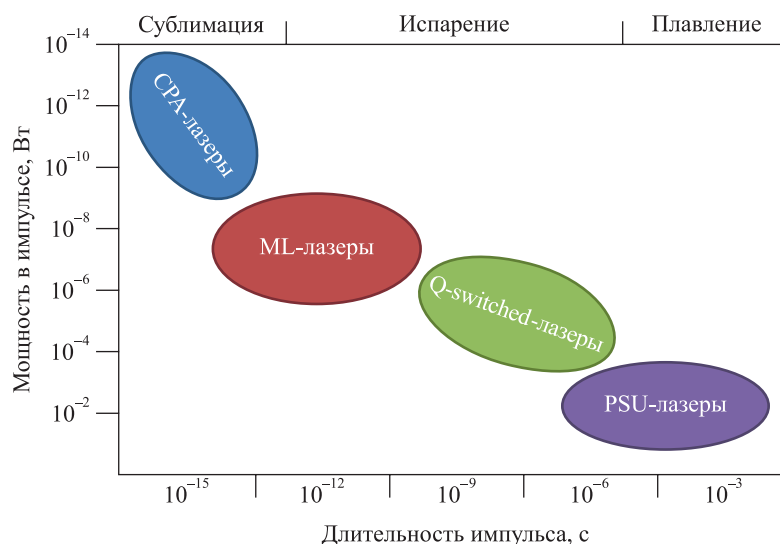


Рис. 2. Режимы работы типовых конструкций лазерных систем, характерные для доминирующих процессов обработки материала

Fig. 2. Operating modes of typical laser system designs, characteristic of dominant material processing processes

На рис. 3 проиллюстрировано то, каким образом меняется механизм воздействия лазерного излучения на материал в зависимости от длительности импульса лазерного излучения, а также то, какие физические эффекты развиваются в металлах и диэлектриках в случае использования ультракороткого лазерного импульса. После лазерного воздействия продолжительностью 1 фс инициирована электронная теплопроводность, что сопровождается релаксацией электронных колебаний в пределах 100 фс. Далее электронная теплопроводность имеет место до времени воздействия 10 пс, что все еще соответствует ультракороткому лазерному импульсу. После примерно 10 пс влияния излучения на материал резко возрастает тепловая нагрузка. В этом случае из-за нелинейного многофотонного поглощения материал становится непрозрачным, даже если он был прозрачным для данной длины волны при больших длительностях импульса. Этот механизм отражен на рис. 4.



Рис. 3. Временные рамки объемного поглощения энергии лазерного импульса материалом

Fig. 3. Time frame of volumetric absorption of laser pulse energy by material

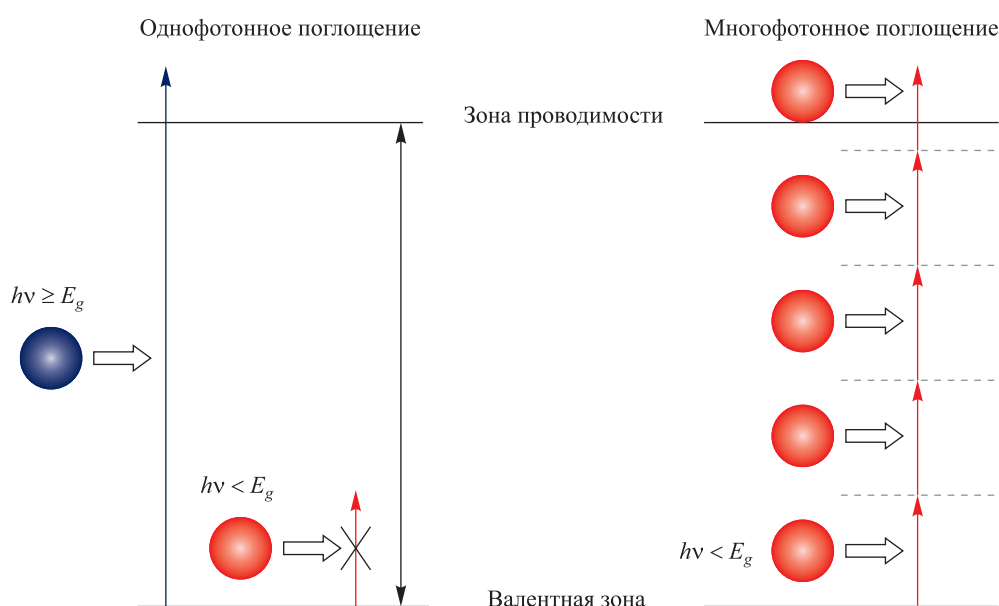


Рис. 4. Механизмы одно- и многофотонного поглощения

Fig. 4. Mechanisms of single- and multiphoton absorption

В прозрачных материалах, особенно в таких диэлектриках, как стеклянные или алмазные структуры, свободные электроны для прямого возбуждения недоступны. Чтобы достичь зоны проводимости, электроны валентной области должны преодолеть ширину запрещенной зоны. Если падающий фотон обладает достаточной энергией, чтобы переместить электрон в зону проводимости, то процесс его поглощения линейен, а энергия фотона может быть поглощена, т. е. каждый поступающий фотон может перевести по крайней мере один электрон в зону проводимости (внутренний фотоэффект). Если же энергия фотона меньше, чем ширина запрещенной зоны, то никакое непосредственное поглощение не может иметь место, но при большой объемной плотности падающих фотонов связанный электрон в диэлектрике может достичь необходимого энергетического уровня, чтобы пересечь запрещенную зону. Однако описанный процесс является нелинейным, для него требуются очень высокая пиковая мощность и соответствующее значение интенсивности (более  $10^{14}$  Вт/м<sup>2</sup>), которая приводит к абляции на таких материалах, как полимеры, металлы и керамика.

Лазерная абляция, особенно на металлических структурах, реализуется при использовании нано-, пико- и фемтосекундных импульсов. Если значения плотности мощности лазерного излучения намного выше, чем пороговая плотность для абляции, обработка происходит при продолжительности импульса менее 150 фс с использованием длин волн в диапазоне 800–1064 нм. Особенность лазерной абляции на металлах, полупроводниках и диэлектриках заключается в уменьшении пороговой плотности потока мощности, если продолжительность импульса сокращена от наносекунды до фемтосекунды. В публикации [10] описаны механизмы разрушения в оптически прозрачных материалах при использовании ультракоротких лазерных импульсов с продолжительностью импульса от 30 до 500 фс. Представлен алгоритм вычисления порога повреждения, основанный на расчете плотности мощности лазерного излучения, а также описаны механизмы накопления энергии в материале, порождающие эффект абляции при более низких пороговых значениях плотности мощности, в случае многократного воздействия импульсов вместо единичного импульса большой мощности. С увеличением количества импульсов растет растягивающее микромеханическое напряжение в материале, которое может привести к изменению оптических свойств, что, в свою очередь, может повлечь за собой уменьшение порога повреждения обрабатываемого лазером материала. Кроме того, представлена зависимость скорости разрушения материала от продолжительности импульса для диэлектриков. В работе [11] исследовано влияние продолжительности импульса на ультрабыструю лазерную обработку кремния и нержавеющей стали. Продолжительность импульса варьируется от 110 фс до 10 пс при длинах волн 400–800 нм. Выполнен анализ кратера абляции при различной продолжительности импульса в установленном интервале. Представлены особенности плавления в зависимости от продолжительности лазерного импульса и поляризации. В исследовании [12] изучена морфология повреждения диэлектриков в широком диапазоне продолжительностей импульса (0,1–1000,0 пс). Выявлено соотношение между ультракороткой импульсной лазерной обработкой (продолжительность импульса менее 10 пс) и характеристиками термоабляции (плавление, кипение, разрушение) при продолжительности импульса более 50 пс. Кроме того, разработаны теоретические модели образования электронов посредством многофотонной ионизации Джоуля, исследованы механизм нагрева и лавинная ионизация. Лазерная обработка материалов импульсными лазерами длительностью до 10 пс может использоваться для получения высокоточных отверстий и канавок в металлах, прозрачных материалах и диэлектриках, таких как алмаз, без существенных тепловых потерь, обусловленных теплопроводностью. Представленные примеры демонстрируют возможность выбирать необходимую длительность импульса для реализации того или иного механизма удаления материала, что позволяет, варьируя характеристики лазерного излучения, создавать в объеме обрабатываемого материала не только отверстия и канавки, но и сложные трехмерные микрогеометрические формы.

Авторы работы [13] рассмотрели характеристики лазерной полировки и абляции, а также обсудили ультракороткоимпульсную обработку алмаза при длине волны 248 нм и продолжительности импульса 500 фс. В качестве методов оценки были использованы рамановская спектроскопия и сканирующая электронная микроскопия. Изучена зависимость скорости удаления материала от длительности импульса в нано- и фемтосекундном диапазонах вместе с такими побочными эффектами, как нагрев плазмы (наносекундные импульсы) и фазовый переход на алмазных материалах. Механизм графитизации свободной поверхности алмаза предложен в исследовании [14]. Рассмотрена лазерно-индуцированная графитизация в объемном алмазном материале (например, возникновение зародышей графитной фазы вызывает в структуре материала растягивающие напряжения). В расчетах оценен максимальный объемный размер графитной фазы. Механическое повреждение происходит в случае, если превышено заданное пороговое значение повреждения.

Необходимо отметить, что ученые исследовали абляцию материалов электронной техники на основной длине волны, а также на 2-й и 3-й гармониках при ультракоротких длительностях лазерного

импульса [15]. Кроме того, были обсуждены производственные аспекты многолучевых лазерных систем и особенности их использования. Также указано, что при применении лазерного импульса около 1 фс наблюдается формирование ряби в кратере абляции.

Анизотропия механических свойств алмаза не влияет на реализацию эффекта кластерного удаления материала и позволяет с использованием лазерного излучения обрабатывать поверхности любой кристаллографической ориентации. Подобный подход обеспечивает формирование параболических, сферических, цилиндрических и конусообразных поверхностей на кристаллах алмаза, что востребовано для использования современных технологий опто- и микроэлектроники. Кроме того, представленные методы позволяют производить алмазные линзы, эффективно работающие в широком диапазоне оптического спектра в оптоэлектронных приборах.

### Особенности применения различных типов алмазов в микроэлектронике

Электронные компоненты на основе алмаза могут быть созданы из монокристаллов алмазов типов Ia, Ib, IIa и IIb, поликристаллов алмазов и алмазоподобных углеродных пленок. Алмазоподобные углеродные пленки (АУП) [16] осаждают из газовой плазмы, возбужденной электрическим СВЧ-разрядом, или химической реакцией горения. Плазма содержит продукты разложения углеводородов. Как рост пленок алмаза из плазмы, содержащей углерод, так и ионная имплантация представляют собой сильно неравновесные процессы.

В электронике наряду с монокристаллом алмаза находит применение поликристаллический алмаз в виде алмазной керамики. Исследования показывают, что керамика имеет основу из сросшихся алмазных зерен, поры между которыми заполнены соединениями щелочноземельных элементов. Электрическая проводимость алмазной керамики во всем практически измеряемом интервале температур обусловлена наличием монокристаллов алмаза. Удельное сопротивление составляет  $10^{12}$ – $10^{14}$  Ом · см. Энергия активации ловушечных уровней равна 0,30–0,40 эВ в диапазоне температур 300–420 К и 0,80–0,95 эВ в диапазоне температур 420–620 К. Первое значение энергии соответствует акцепторному уровню бора, второе значение – акцепторному уровню, обусловленному дефектами кристаллической решетки. Достоинством поликристаллического алмаза является высокая воспроизводимость характеристик при изготовлении изделий микроэлектроники [17].

Некоторые данные о техническом применении алмазов для производства различных изделий микроэлектроники приведены в таблице. В ней содержится информация как о развитых областях микроэлектроники, так и об областях, проведение работы над которыми предвидится в ближайшем или более отдаленном будущем.

#### Применение алмазов для производства различных изделий микроэлектроники

##### The use of diamonds in the manufacture of various microelectronic products

| Изделия                                                      | Типы материала                                                  |
|--------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| Акустоэлектроника                                            | Поликристаллические синтетические алмазы, АУП                   |
| Теплоотводы                                                  | Природные и синтетические алмазы типов IIa и IIb, АУП, керамика |
| Транзисторы (в том числе полевые), диоды, интегральные схемы | Природные и синтетические алмазы типов Ia и Ib, АУП             |
| Детекторы быстрых частиц, дозиметры                          | Природные алмазы типов Ia и Ib                                  |
| Лавинно-пролетные диоды                                      | Однородные природные и синтетические алмазы типа Ia             |
| Фотоэммитеры (область ультрафиолетового излучения)           | Природные и синтетические алмазы типов Ia и Ib, АУП             |

При производстве полупроводниковых приборов важную роль играет изготовление надежных электрических контактов полупроводника с металлическим электродом. Надежность электрических контактов к алмазу обуславливается характером взаимодействия металла с поверхностью алмаза. В качестве электрических контактов к алмазу применяют металлы, интенсивно создающие химические объединения с углеродом до образования прочных карбидов и значительно растворяющие углерод: алюминий, титан, никель, хром и т. д.

При исследовании электрических характеристик алмаза и алмазной керамики часто используют электрические контакты, изготовленные вжиганием серебряной пасты. Для промышленного производства электрических контактов можно применять метод напыления металла в вакууме на разогретый и предварительно химически очищенный образец.

### Перспективы использования алмазных и алмазосодержащих компонентов в микроэлектронике

В настоящее время технология получения алмазов, используемых в электронике, с помощью CVD-метода позволяет изготавливать такие изделия размером десятки миллиметров [18], которые имеют свойства, сравнимые со свойствами алмазов. Применение алмазных структур в качестве теплоотводов значительно улучшит тепловые характеристики СВЧ-транзисторов, полупроводниковых лазеров, диодов Ганна и т. д. [19]. На основе алмаза могут быть получены основные виды радиоэлектронных устройств. По сравнению с аналогичными устройствами, созданными на базе других полупроводников, эти устройства могут работать при температурах до 800–1000 К в химически агрессивных средах и имеют на несколько порядков большую рассеиваемую мощность и радиационную стойкость.

Прогресс в применении алмазов в электронике в значительной степени зависит от решения проблемы получения высококачественных легированных монокристаллов и эпитаксиальных пленок алмаза, а также от изучения взаимодействия лазерного излучения с материалами твердотельной электроники. В частности, перспективным способом для поверхностного формообразования алмаза представляется лазерный термохимический способ обработки алмаза, в основе которого лежит процесс каталитического взаимодействия углерода, входящего в состав алмаза с водородом или смесями водорода с водяным паром и углекислым газом [20].

По совокупности параметров алмаз превосходит такие широко используемые материалы микроэлектроники, как кремний и арсенид галлия. Специалисты фирмы *IBM* (США) придумали показатель качества, отражающий пригодность материала для производства изделий электронной техники (коэффициент Кейнса). Эталоном является кремний, для которого этот показатель равен 1. Для арсенида галлия он составляет 0,46, а для алмаза – 32,0. Специалисты фирмы *RCA* (США) разработали показатель качества для оценки эффективности усиления мощных сигналов (коэффициент Джонсона). Для приборов на основе арсенида галлия этот показатель составляет 6,9, а для приборов на базе кристаллов алмаза он является равным 8206,0 [21].

Сейчас алмаз выступает одним из главных резервов развития микроэлектроники. Именно с его использованием возможен ощутимый прогресс в этой отрасли, который позволит выйти на новые технические рубежи, связанные в первую очередь с увеличением быстродействия и мощности электронных компонентов. Освоение производства крупных высококачественных синтетических кристаллов алмаза и развитие методов их обработки, обеспечивающих высочайшую точность воспроизведения форм и шероховатость на атомарном уровне, создают условия для широкого применения этого уникального материала в микроэлектронике, оптике, ядерной энергетике, космическом приборостроении.

### Библиографические ссылки

1. Ральченко В, Конов В. CVD-алмазы. Применение в электронике. *Электроника: наука, технология, бизнес*. 2007;4:58–67. EDN: NXAPVR.
2. Olson JR, Pohl RO, Vandersande JW, Zoltan A, Anthony TR, Banholzer WF. Thermal conductivity of diamond between 170 and 1200 and the isotope effect. *Physical Review B*. 1993;47(22):14850–14856. DOI: 10.1103/PhysRevB.47.14850.
3. Пелецкий ВЭ. *Высокотемпературные исследования тепло- и электропроводности твердых тел*. Москва: Энергия; 1971. 192 с.
4. Ходунков ВП. Определение теплопроводности электропроводных материалов методами радиационной термометрии. *Известия вузов. Приборостроение*. 2013;56(3):93–98.
5. Оситинская ТД, Подоба АП. Применение метода стягивания теплового потока для определения коэффициента теплопроводности твердых тел. *Промышленная теплотехника*. 1981;3(1):34–48.
6. Клюев ЮА, Дуденков ЮА, Семенова-Тян-Шанская АС, Зубков ВМ. Двулучепреломление и микротвердость природных алмазов разных типов. *Алмазы*. 1970;5:11–13.
7. Николаев АГ. *Ионно-лучевая модификация свойств природных алмазов* [диссертация]. Казань: Казанский (Приволжский) федеральный университет; 2013. 133 с.
8. McLellan CA, Myers BA, Kraemer S, Ohno K, Awschalom DD, Bleszynski Jayich AC. Patterned formation of highly coherent nitrogen-vacancy centers using a focused electron irradiation technique. *Nano Letters*. 2016;16(4):2450–2454. DOI: 10.1021/acs.nanolett.5b05304.
9. Yamamoto H, Tokuyama K, Ueda K, Yamamoto H, Baba K. High-power terahertz radiation emitter with a diamond photoconductive switch array. *Applied Optics*. 2001;40(36):6733–6736. DOI: 10.1364/AO.40.006733.

10. Martin S. *Zerstörmechanismen in optischen Materialien bei Anregung mit ultrakurzen Laserpulsen*. Berlin: Freie Universität Berlin; 2004. 101 S.
11. Chien CY, Gupta MC. Pulse width effect in ultrafast laser processing of materials. *Applied Physics A*. 2005;81:1257–1263. DOI: 10.1007/s00339-004-2989-z.
12. Shirk MD, Molian PA, Malshe AP. Ultrashort pulsed laser ablation of diamond. *Journal of Laser Applications*. 1998;10(2): 64–70. DOI: 10.2351/1.521822.
13. Strekalov VN, Konov VI, Kononenko VV, Pimenov SM. Early stages of laser graphitization of diamond. *Applied Physics A*. 2003;76:603–607. DOI: 10.1007/s00339-002-2014-3.
14. Miotello A, Ossi PM, editors. *Laser-surface interactions for new materials production*. New York: Springer; 2010. XVI, 358 p. (Springer series in materials science; volume 130). DOI: 10.1007/978-3-642-03307-0.
15. Hu W, Shin YuC, King G. Modeling of multi-burst mode pico-second laser ablation for improved material removal rate. *Applied Physics A*. 2010;98:407–415. DOI: 10.1007/s00339-009-5405-x.
16. Белянин АФ, Самойлович МИ. Пленки алмаза и алмазоподобных материалов: формирование, строение и применение в электронике. *Высокие технологии в промышленности России*. Москва: Центральный научно-исследовательский технологический институт «Техномаш»; 2003. 19 с.
17. Казючиц НМ, Русецкий МС, Наумчик ЕВ, Казючиц ВН. Синтетические алмазы СТМ «Алмазот» – результаты исследований и некоторые применения. В: Оджасв ВБ, редактор. *Материалы и структуры современной электроники. Сборник научных трудов VII Международной научной конференции, посвященной 50-летию кафедры физики полупроводников и нанoeлектроники; 12–13 октября 2016 г.; Минск, Беларусь*. Минск: Издательский центр БГУ; 2016. с. 62–67. EDN: ISZVSD.
18. Лучинин В, Колядин А, Ягудаев Ю, Ильин С. Алмаз электронного качества. Инновации. Инвестиции. Креативные проекты. *Электроника: наука, технология, бизнес*. 2023;4:70–89. DOI: 10.22184/1992-4178.2023.225.4.70.89.
19. Диордица ВВ. Теплоотводы на основе алмаза. В: Белорусский национальный технический университет. *Материалы 70-й студенческой научно-технической конференции; 6 марта 2015 г.; Минск, Беларусь*. Минск: Белорусский национальный технический университет; 2015. с. 128–131.
20. Шершнева ЕБ. Термохимическая обработка алмаза движущимся тепловым источником. *Известия Гомельского государственного университета имени Франциска Скорины*. 2023;6:123–129. EDN: BSBEUX.
21. Карасев ВЮ, Крюков ВД, Пинтус СМ, Кузнецов МГ, Лыков АА, Белов БА. Новые перспективы применения кристаллов алмаза в микроэлектронике. *Микроэлектроника*. 2006;35(5):339–346. EDN: HBCNSM.

Получена 14.01.2025 / исправлена 14.02.2025 / принята 18.02.2025.  
Received 14.01.2025 / revised 14.02.2025 / accepted 18.02.2025.