

Научная статья

1.3.8. Физика конденсированного состояния (физико-математические науки)

УДК 539.21+539.234+539.264+539.2:549.211

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2025.04.005

ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕНОСА ТЕПЛА В УГЛЕРОДНЫХ АЛМАЗОПОДОБНЫХ ТОНКИХ ПЛЕНКАХ

**Александр Сергеевич Богданов¹, Денис Григорьевич Богданов²,
Владимир Александрович Плотников³, Сергей Викторович Макаров⁴,
Евгения Владимировна Кустова⁵, Ольга Сергеевна Мельникова⁶**

Алтайский государственный университет, пр. Ленина, 61, 656049, Барнаул, Россия

¹ alexsandr-bogdanov@mail.ru² bogdanov.d.g@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5890-4393>³ plotnikov@phys.asu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7051-1082>⁴ makarov@phys.asu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1323-4343>⁵ kustova@mail.asu.ru⁶ melnikovaos@mail.asu.ru

Аннотация. Считается, что теплопроводность неметаллических, в том числе и алмазных материалов осуществляется в основном фононами. Однако в углеродных алмазоподобных пленках ситуация сложнее. Казалось бы, что в монофазных алмазных пленках фононный механизм теплопроводности очевиден. Однако множественность границ раздела и наличие большой концентрации водорода снижают коэффициент теплопроводности до 0,2 – 3,0 Вт/(мК) в алмазных пленках, то есть на три, четыре порядка по сравнению с теплопроводностью алмазного монокристалла. Лишь в микронных алмазных пленках коэффициент теплопроводности приближается к теплопроводности алмазного монокристалла. Сложность обоснования механизма теплопроводности в углеродных тонких (нанометровых) пленках заключается в особенностях структуры, представляющей собой фактически тонкопленочный композит из алмазоподобных и графитоподобных кластеров, размер которых составляет 0,5 – 1,0 нм. Таким образом, такой композит представляет собой совокупность областей, обладающих разными механизмами теплопроводности – в алмазоподобных кластерах действует фононный механизм, в графитоподобных кластерах преобладает электронный механизм переноса тепла. То есть на границе раздела наблюдается смена переноса тепла с фононного на электронный. Однако в углеродных алмазоподобных пленках границы раздела отсутствуют, алмазоподобные и графитоподобные кластеры связаны sp³- и sp²- связями, что сопровождается появлением локализованных электронных состояний в запрещенной зоне алмазоподобного кластера вплоть до ее полного заполнения. Фактически алмазоподобный кластер становится электропроводящим кластером. Такой эффект значительно усложняет механизм теплопроводности.

Ключевые слова: углеродные пленки, алмазоподобные кластеры, графитоподобные кластеры, sp²-, sp³ -гибридизация.

Для цитирования: Богданов А.С., Богданов Д.Г., Плотников В.А., Макаров С.В., Кустова Е.В., Мельникова О.С. Особенности переноса тепла в углеродных алмазоподобных тонких пленках // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2025. Т. 22, № 4. С. 422-429. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2025.04.005.

Original article

FEATURES OF HEAT TRANSFER IN CARBON DIAMOND-LIKE THIN FILMS

Alexander S. Bogdanov¹, Denis G. Bogdanov², Vladimir A. Plotnikov³, Sergey V. Makarov⁴,
Evgeniya V. Kustova⁵, Olga S. Melnikova⁶

Altai State University, 61 Lenin Ave., 656049, Barnaul, Russia

¹ alexsandr-bogdanov@mail.ru² bogdanov.d.g@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5890-4393>³ plotnikov@phys.asu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7051-1082>⁴ makarov@phys.asu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1323-4343>⁵ kustova@mail.asu.ru⁶ melnikovaos@mail.asu.ru

Abstract. It is believed that the thermal conductivity of non-metallic materials, including diamonds, is carried out mainly by phonons. However, the situation is more complicated in carbon diamond-like films. It would seem that in single-phase diamond films the phonon mechanism of thermal conductivity is obvious. However, the multiplicity of interfaces and the presence of a high concentration of hydrogen reduce the thermal conductivity coefficient to 0.2 - 3.0 W / (mK) in diamond films, that is, by three to four orders of magnitude compared to the thermal conductivity of a diamond single crystal. Only in micron diamond films does the thermal conductivity coefficient approach the thermal conductivity of a diamond single crystal. The complexity of substantiating the mechanism of thermal conductivity in carbon thin (nanometer) films lies in the features of the structure, which is actually a thin-film composite of diamond-like and graphite-like clusters, the size of which is 0.5 - 1.0 nm. Thus, such a composite is a set of regions with different mechanisms of thermal conductivity - in diamond-like clusters, the phonon mechanism operates, in graphite-like clusters, the electronic mechanism of heat transfer prevails. That is, at the interface, a change in heat transfer from phonon to electronic is observed. However, in carbon diamond-like films, there are no interfaces, diamond-like and graphite-like clusters are linked by sp³- and sp²-bonds, which is accompanied by the appearance of localized electronic states in the forbidden zone of the diamond-like cluster until it is completely filled. In fact, the diamond-like cluster becomes an electrically conductive cluster. This effect significantly complicates the mechanism of thermal conductivity.

Keywords: carbon films, diamond-like clusters, graphite-like clusters, sp², sp³-hybridization.

For citation: Bogdanov A. S., Bogdanov D. G., Plotnikov V. A., Makarov S. V., Kustova E.V. & Melnikova O.S. (2025). Features of heat transfer in carbon diamond-like thin films. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 22(4), 422-429. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2025.04.005.

Введение

Теплопроводность углеродных алмазоподобных пленок (DLC-пленок) активно изучается в связи с возможностью их применения в современной электронике. Однако представленные данные о теплопроводности углеродных алмазоподобных пленок толщиной около 70 – 300 нм свидетельствуют о крайне низкой величине коэффициента теплопроводности (0,3-1,0 Вт/мК) [1]. В работе [2] установлено, что теплопроводность углеродных гидрогенизированных аморфных пленок a-C:H самая низкая и составляет 0,2–0,3 Вт/мК, в то время как гидрогенизированные ta-C:H пленки имеют теплопроводность около 1 Вт/мК, а тетрагональные ta-C пленки имеют самую высокую теплопроводность – около 3,5 Вт/мК. В алмазных пленках a-C:H, толщиной от примерно 100 и до 500 нм теплопроводность при комнатной температуре

составляет 0,20 Вт м⁻¹К⁻¹, увеличение доли sp³ связанного углерода увеличивает теплопроводность до 2,2 Вт м⁻¹К⁻¹ [3].

В то же время в микронных алмазных пленках толщиной 18 и 13 мкм [4] и в пленках толщиной 5 мкм [5], выращенных из разбавленной смеси метана в водороде, теплопроводность при комнатной температуре составила около 1000 - 1200 Вт/мК, т. е. столько же, сколько у природных монокристаллических алмазов. Нанокристаллические алмазные пленки толщиной 0,5, 1,0 и 5,6 мкм, теплопроводность варьируется от 100 Вт м⁻¹К⁻¹ до более чем 1300 Вт м⁻¹К⁻¹ [6]. В пленках миллиметровой толщины (толщиной 1,68 мм) теплопроводность 1916 и 1739 Вт м⁻¹К⁻¹ соответственно, то есть близка к теплопроводности монокристалла алмаза при комнатной температуре [2].

Столь большая разница в теплопроводности (фактически на четыре порядка), очевидно,

обусловлена особенностями механизма переноса тепла в нанометровых и микронной толщины пленках. Известно, что в неметаллических кристаллах теплопроводность осуществляется в основном за счет переноса тепла фононами [7]. Отмечается низкая (430-730 К) температура Дебая DLC-пленок по сравнению с температурой Дебая монокристаллического алмаза (2230 К) [1]. Среднее расстояние, на которое фононы проходят между событиями рассеяния в объемной решетке алмаза, очень велико - более 200 нм при комнатной температуре, перенося до 80% тепла, что делает роль границ зерен особенно важной [8]. Показано, что фононы со средним значением свободного пробега около 350 нм обеспечивают около 90% переноса тепла. Подчеркивается преимущественный вклад баллистических фононов в перенос тепла, что имеет важное значение для объяснения высокой теплопроводности алмазных пленок толщиной 5,6 мкм [6]. Характерно, что при увеличении температуры измерения теплопроводности алмазных пленок снижается, демонстрируя обратную зависимость по сравнению с высококачественным монокристаллическим алмазом выше 500 К, где рассеянием фононов на границах зерен и на дефектах можно пренебречь, что может быть связано с влиянием примесей и границ зерен на теплопроводность алмазных пленок при повышении температуры [2].

Известно, что структурное состояние углеродных алмазоподобных пленок, полученных конденсацией углерода из лазерной парогазовой фазы может быть определено как композит из алмазоподобных и графитоподобных кластеров размером 0,5 – 1,0 нм [9]. В этой связи проблема низкой теплопроводности может быть связана с другим механизмом распространения тепла, при котором в самой частице фононы движутся квазibalлистически, а главный вклад в теплосоппротивление дает теплосоппротивление через границу алмазоподобный-графитоподобный кластеры, определяющая теплосоппротивление Капицы [10]. В рассматриваемом случае механизм теплопроводности границы алмазоподобные-графитоподобные кластеры фактически является механизмом теплопроводности границы металл-диэлектрик [10]. При тепловом потоке через границу металла и диэлектрика температуры электронов и фононов различны. Это приводит к дополнительному вкладу в сопротивление Капицы из-за того, что электроны, переносящие тепло в металле, не переносят его через границу, а вовлечены в перенос тепла только на некотором расстоянии от нее, что снижает эффективность переноса тепла вблизи границы.

Разные температуры электронов и фононов имеют место и в углеродных наноструктурах,

состоящих из алмазоподобных областей с sp^3 гибридованными атомами углерода, являющихся диэлектриком, и графитоподобных областей с sp^2 гибридизацией атомов, являющихся полуметаллом [11]. На границах раздела sp^2 - и sp^3 -наночастиц перенос фононов происходит в основном в одном направлении и имеет баллистический характер. [12]. Электроны не могут переходить из области sp^2 (полуметалл) в область sp^3 (диэлектрик), то есть тепло переносится через такую границу лишь в виде потока фононов. В этой связи на sp^2/sp^3 границы существует перепад температуры.

В связи с большим влиянием sp^2/sp^3 границы раздела между областями, с существенно различающимися свойствами (диэлектрик/полуметалл), на теплопроводность композита необходимо провести анализ состояния границы между sp^2 и sp^3 кластерами в углеродных алмазоподобных пленках, полученных лазерным методом.

2. Методика получения углеродных пленок

Для получения углеродных алмазоподобных пленок применялся способ прямого испарения графитовых мишеней при воздействии лазерного излучения с длиной волны 1064 нм от неодимового лазера NTS-300 и последующей конденсацией углерода на аморфные подложки из силикатного стекла. Структурное состояние углеродных алмазоподобных пленок зависит от режима конденсации атомов углерода на подложку. Изменяя режим можно управлять свойствами пленки в широком диапазоне значений.

Лазерный пучок вводился в вакуумную камеру вакуумной установки (остаточное давление не хуже 10^{-5} торр), где располагались графитовые мишени ниже фокусного пятна и подложки из силикатного стекла. На графитовой мишени диаметром 5 мм и толщиной около 2 мм фактически расфокусированный лазерный пучок, энергию которого меняли в интервале 1,1 - 7 Дж, создавал пятно диаметром около 3 мм. Время экспозиции составляло около 5 минут. Полученный поток испаряемого углерода осаждался на стеклянные подложки, которые располагались на расстоянии примерно 10 см от мишени и под углом около 30 градусов к оси паро-газового факела, формируя углеродную пленку.

Структура углеродных алмазоподобных пленок была изучена с помощью высокоразрешающей просвечивающей микроскопии (с помощью просвечивающего электронного микроскопа *Philips CM-30*) в Материаловедческом центре коллективного доступа при Томском государственном университете. Спектры комбинационного рассеяния света (КРС) при ком-

натной температуре получены в Институте геологии и минералогии СО РАН. Использовался конфокальный Рамановский спектрометр *LabRAM HR*; возбуждение в пятне диаметром около 5 микрон производилось He-Cd лазером, излучающем на длине волны 325 нм.

3. Экспериментальные результаты

3.1. Электронная микроскопия углеродных тонких пленок

На рис. 1 приведены светлопольное изображение структуры углеродной алмазоподобной пленки и дифракции электронов от этой структуры, полученные с помощью просвечивающего электронного микроскопа.

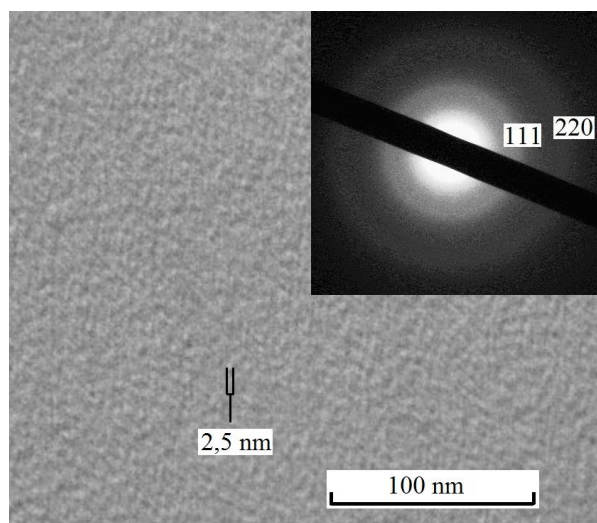


Рис. 1. Светлопольное изображение углеродной алмазоподобной пленки (a) и дифракция электронов (рефлексы (111) и (220)) от этой пленки (b).

Fig. 1. Bright-field image of a diamond-like carbon film (a) and electron diffraction (reflections (111) and (220)) from this film (b).

Отметим, что светлопольное и темнопольное изображения структуры тонкой пленки совпадают, что свидетельствует о высокой однородном в распределении структурных составляющих и наличии преимущественно одной структурной составляющей. Выделенная область размером 2,5 нм содержит цепочку объектов, которые (как ранее было определено [2]) представляют собой кластеры, размер которых составляет около 0,5 нм, а максимальный размер - около 1,0 нм. Электронограмма (вставка на рис. 1) представляет собой сильно уширенные, но четко идентифицируемые дифракционные максимумы, что указывает на кристаллическую структуру материала пленки. Кольцевая форма электронограмм свидетельствует о взаимной кристаллографической разо-

риентации структурных составляющих (кластеров), то есть пленка не является монокристаллической. Радиальное размытие колец связано с малым размером зерен. Расшифровка электронограммы показала, что материал пленки имеет решетку алмаза, кольца соответствуют дифракции от плоскостей (111) и (220). Межплоскостные расстояния имеют значения $d_{111}=0,207$ нм, $d_{220}=0,119$ нм. Полученные величины близки к табличным значениям макроскопических кристаллов алмаза ($d_{111}=0,205$ нм и $d_{220}=0,125$ нм) [1].

Таким образом, электронная микроскопия и дифракция электронов позволяет нам однозначно трактовать структурное состояние углеродной пленки как алмазоподобная. Но сильно размытые рефлексы свидетельствуют о крайне малых размерах алмазных кластеров и сильном искажении межатомных расстояний.

3.2. КРС-спектроскопия алмазоподобных тонких пленок

Спектры КРС, измеренные в 14 точках, расположенных равномерно с интервалом 5 мм вдоль прямой, параллельной длинному ребру стеклянной подложки, приведены на Рис.2

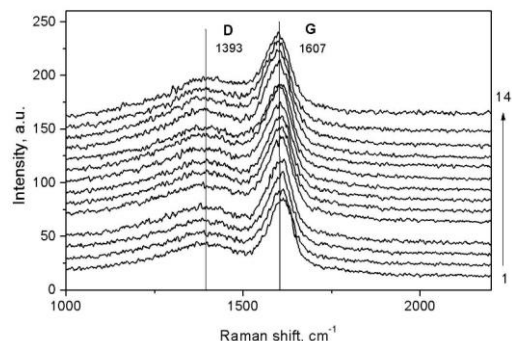


Рис. 2. Спектры КРС, полученные при возбуждении лазерным излучением с длиной волны 325 нм в 14 точках вдоль алмазоподобной тонкой пленки.

Хорошо идентифицируются G- и D-линии с максимумами 1610 и 1393 cm^{-1} .

Fig 2. Raman spectra obtained with excitation by laser radiation with a wavelength of 325 nm at 14 points along a diamond-like thin film. G- and D-lines with maxima at 1610 and 1393 cm^{-1} are well identified.

Как следует из приведенных данных, спектра КРС свидетельствует о наличии как линии D, соответствующей разупорядоченному графиту, так и линия G от бездефектного кристаллического графита. Более того, анализ спектров КРС свидетельствует о равномерном распреде-

лении углеродных неискаженных (линия G) и искаженных (линия D) sp^2 -связей по поверхности алмазоподобной пленки. Линия КРС, характерная для алмаза ($1332,5 \pm 0,5 \text{ см}^{-1}$), отсутствует. Однако считается, что уширенная D-линия (D-полоса) в алмазоподобных ta-C (тетраэдрический аморфный углерод) пленках характеризует наличие sp^3 -связей [13].

Известно, что высокая симметрия решетки алмаза определяют простоту колебательного спектра. В спектре КРС нет колебательной моды первого порядка, но присутствует одно трижды вырожденное фундаментальное колебание, которое для структурно совершенной алмазной решетки при 300 К существует для $1332,5 \pm 0,5 \text{ см}^{-1}$ [14]. При переходе же к нанокристаллическому алмазу ширина данного пика увеличивается, а в тетрагональных и аморфных пленках этот пик не проявляется совсем [14]. Действительно, для нанокристаллов детонационного алмаза в спектре КРС на рис. 3 присутствует уширенная линия 1322 см^{-1} , которая наложена на широкополосный спектр графита с основными максимумами 1317 и 1613 см^{-1} (D и G, соответственно). Положение максимумов этих полос существенно зависит от конфигурации sp^2 углерода [15] и размеров зерен графита.

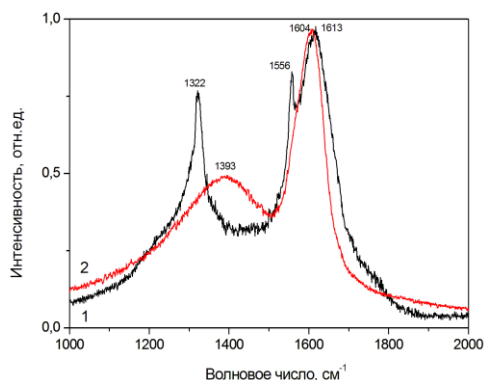


Рис. 3. Спектр КРС для детонационного наноалмаза (1) и алмазоподобной пленки (2).

Fig 3. Raman spectrum for detonation nanodiamond (1) and diamond-like film (2).

Таким образом, данные электронной микроскопии и спектров комбинационного рассеяния света свидетельствуют о равновероятном

распределении алмазоподобных и графитоподобных кластеров в структуре углеродных пленок.

4. Обсуждение

Проблема низкой теплопроводности кластерного композита углеродной алмазоподобной пленки может быть связана с другим механизмом распространения тепла через границу алмазоподобный-графитоподобный кластеры, определяемым теплосоппротивлением Капицы [10]. В рассматриваемом случае механизм теплопроводности границы алмазоподобные-графитоподобные кластеры фактически является механизмом теплопроводности границы металл-диэлектрик [10]. При тепловом потоке через границу металла и диэлектрика температуры электронов и фононов различны. Это приводит к дополнительному вкладу в сопротивление Капицы из-за того, что электроны, переносящие тепло в металле, не переносят его через границу, а вовлечены в перенос тепла только на некотором расстоянии от нее. Поэтому перенос тепла вблизи границы оказывается менее эффективным.

Однако в наших работах было показано, что границы раздела между алмазоподобными и графитоподобными кластерами отсутствует. Связь между кластерами осуществляется как sp^3 -, так и sp^2 -связями [16]. Такая ситуация неминуемо приводит к появлению в запрещенной зоне алмазоподобного кластера локализованных электронных состояний, по которым могут быть распределены π -электроны [17]. Концентрация локализованных электронных состояний в запрещенной зоне алмазоподобного кластера может быть велика, вплоть до ее полного заполнения [18]. Таким образом, алмазоподобный кластер представляет собой не совсем диэлектрик, запрещенная зона которого может быть заполнена электронными состояниями, а электроны из графитоподобной области после распада электрон-фононной пары все-таки проникают в алмазоподобный кластер, еще более уменьшая теплопроводность кластерного композита.

Учтем (добавим) в таблице теплопроводности алмазных материалов [19] теплопроводность углеродных алмазоподобных пленок.

Таблица 1. Теплопроводность алмазных материалов.

Table 1. Thermal conductivity of diamond materials.

Монокристалл алмаза системы Fe-Al-C	Монокристалл алмаза системы Fe-Ni-C	Металлоалмазный композит	Композит на основе детонационного наноалмаза	Алмазоподобный-графитоподобный кластерный композит углеродных пленок [1-3]
2089 Вт/мК	606,7 Вт/мК	485,6 Вт/мК	9 - 18 Вт/мК	0,3 – 1,0 Вт/мК [1] 0,2 – 3,5 Вт/мК [2] 0,2 – 2,2 Вт/мК [3]

Выводы

Приведенные обзорные данные свидетельствуют о существенно низкой теплопроводности углеродных алмазоподобных пленок, достигающей 0,2 – 2,0 Вт/(мК), что на три и даже четыре порядка ниже теплопроводности алмазных монокристаллов. Столь низкая теплопроводность, очевидно, обусловлена особенностями структуры углеродных тонких пленок, представляющей собой фактически композит из алмазоподобных и графитоподобных кластеров размером от 0,5 до 1,0 нм. Сильная связь между кластерами приводит к появлению локализованных электронных состояний в запрещенной зоне алмазоподобного кластера. Наличие локализованных электронных состояний естественно приводит к усложнению механизма теплопроводности в углеродном тонкопленочном композите. Наряду с преимущественно электронной проводимостью графитоподобного кластера, в алмазоподобном кластере фонный механизм усложняется наличием локализованных электронных состояний.

Список литературы

- [1]. Christopher J. Morath and Humphrey J. Maris Jerome J. Cuomo, David L. Pappas, Alfred Grill, Vkhneubhai V. P'atel, James P. Doyle, and Katherine L. Saenger. Picosecond optical studies of amorphous diamond and diamond-like carbon: Thermal conductivity and longitudinal sound velocity. *J. Appl. Phys.* 76, 2636 (1994); doi: 10.1063/1.357560
- [2]. M. Shamsa, W. L. Liu, and A. A. Balandin, C. Casiraghi, W. I. Milne, and A. C. Ferrari. Thermal conductivity of diamond-like carbon films. *Appl. Phys. Lett.* 89, 161921 (2006). DOI: 10.1063/1.2362601
- [3]. Andrew J. Bullen, Keith E. O'Hara, and David G. Cahill. Thermal conductivity of amorphous carbon thin films. *Cond-mat. mtrl-sci* 5 aug. 2000.
- [4]. D. T. Morelli, C. P. Beetz, and T. A. Perry. Thermal conductivity of synthetic diamond films. *Journal of Applied Physics* 64, 3063 (1988); doi: 10.1063/1.341571
- [5]. Kazuhiro Baba, Yumi Aikawa, and Nobuaki Shohata. Thermal conductivity of diamond films. *Journal of Applied Physics* 69, 7313 (1991); (*J. Appl. Phys.*, Vol. 69, No. 10, 15 May (1991). doi: 10.1063/1.347580
- [6]. Elah Bozorg-Grayeli, Aditya Sood, Mehdi Asheghi, Vincent Gambin, Rajinder Sandhu, Tatyana I. Feygelson, Bradford B. Pate, Karl Hobbart, and Kenneth E. Goodson. *Applied Physics Letters* 102, 111907 (2013); doi: 10.1063/1.4796168
- [7]. K.M. Leung, A.C. Cheung, B.C. Liu, H.K. Woo, C. Sun a, X.Q. Shi, S.T. Lee. Measuring thermal conductivity of CVD diamond and diamond-like films on silicon substrates by holographic interferometry. *Diamond and Related Materials* 8 (1999) 1607±1610
- [8]. R.H. Zhua, J.Y. Miaob, J.L. Liua, L.X. Chena, J.C. Guoa, C.Y. Huaa, T. Dingb, H.K. Lianb, C.M. Lia. High temperature thermal conductivity of free-standing diamond films prepared by DC arc plasma jet CVD. *Diamond & Related Materials* (2014), doi: 10.1016/j.diamond.2014.09.007
- [9]. В.А. Плотников, С.В. Макаров, О.О. Еремеевкова, А.А. Шуткин. Распределение кластеров, сформированных sp²- и sp³-связями, в углеродной алмазоподобной тонкой пленке. *Журнал технической физики*, 2021, том 91, вып. 4. DOI: 10.21883/000000000000
- [10]. Ф.М. Шахов, А.П. Мейлахс, Е.Д. Эйдельман. Изменение механизма распространения тепла при переходе от микро к наночастицам. *Письма в ЖТФ*, 2016, том 42, вып. 5
- [11]. А. П. Мейлахс, Е. Д. Эйдельман, Перегрев или переохлаждение электронов в металле из-за влияния границы с диэлектриком, *Письма в ЖЭТФ*, 2014, том 100, выпуск 2, 89–93. DOI: 10.7868/S0370274X14140033
- [12]. Е.В. Эйдельман. Термоэлектрический эффект и термоэлектрический генератор на основе углеродных наноструктур: достижения и перспективы. *УФН*, 2021, т. 191, № 6. DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2020.06.038795>
- [13]. N. Dwivedi, S. Kumar, H.K. Malik, Superhard behaviour, low residual stress, and unique structure in diamond-like carbon films by simple bilayer approach. *J. Appl. Phys.*, 112 (2012) 023518.
- [14]. Hardy J. R., Smith S. D. Two-phonon IR lattice absorption in diamond. *Philos Mag.* N6 (1961) 1163-1172.
- [15]. S. Bhargava, H. D. Bist, S. Sahli, M. Aslam, & H. B. Tripathi, *Appl. Phys. Lett.* 67 (1995) 1706-1709.
- [16]. V.A. Plotnikova, B.F. Dem'yanovb, S.V. Makarov. Atomic structure of carbon clusters laser-produced diamond-like carbon films. *Diamond*

& Related Materials. 114 (2021) 108334. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2021.108334>

[17]. В.А. Плотников, С.В. Макаров, Е.В. Кустова, О.С. Мельникова. Локальные электронные состояния в углеродных алмазоподобных пленках. Письма в ЖТФ, 2025, том 51, вып. 5. С. 33-36. DOI: 10.21883/000000000000).

[18]. J. Robertrson, Phil. Mag. B, 76 (3), 335 (1997). DOI: 10.1080/01418639708241098.

[19]. V. A. Plotnikov, D. G. Bogdanov, A. S. Bogdanov, A. A. Chepurov, S. V. Makarov, A. P. Yelissev, E. I. Zhimulev, V. G. Vins. Heat-conducting properties of thermobarically-sintered detonation nanodiamond. Letters on Materials 12 (4), 2022 pp. 350-353. <https://doi.org/10.22226/2410-3535-2022-4-350-353>

Информация об авторах

Богданов Александр Сергеевич, аспирант кафедры общей и экспериментальной физики Алтайского государственного университета, alexsandr-bogdanov@mail.ru

Богданов Денис Григорьевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей и экспериментальной физики Алтайского государственного университета, bogdanov.d.g@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5890-4393>

Плотников Владимир Александрович, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры общей и экспериментальной физики Алтайского государственного университета, plotnikov@phys.asu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7051-1082>

Макаров Сергей Викторович, доктор физико-математических наук, директор ИЦТЭФ и

заведующий кафедрой общей и экспериментальной физики Алтайского государственного университета, makarov@phys.asu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1323-4343>

Кустова Евгения Владимировна, аспирант кафедры общей и экспериментальной физики Алтайского государственного университета, kustova@mail.asu.ru

Мельникова Ольга Сергеевна, аспирант кафедры общей и экспериментальной физики Алтайского государственного университета, melnikovaos@mail.asu.ru

References

[1]. Christopher J. Morath and Humphrey J. Maris Jerome J. Cuomo, David L. Pappas, Alfred Grill, Vkhneubhai V. P'atel, James P. Doyle, and Katherine L. Saenger. Picosecond optical studies of amorphous diamond and diamond-like carbon: Thermal conductivity and longitudinal sound velocity. J. Appl. Phys. 76, 2636 (1994); doi: 10.1063/1.357560

[2]. M. Shamsa, W. L. Liu, and A. A. Balandin, C. Casiraghi, W. I. Milne, and A. C. Ferrari. Thermal conductivity of diamond-like carbon films. Appl. Phys. Lett. 89, 161921 (2006). DOI: 10.1063/1.2362601

[3]. Andrew J. Bullen, Keith E. O'Hara, and David G. Cahill. Thermal conductivity of amorphous carbon thin films. Cond-mat. mtrl-sci 5 aug. 2000.

[4]. D. T. Morelli, C. P. Beetz, and T. A. Perry. Thermal conductivity of synthetic diamond films. Journal of Applied Physics 64, 3063 (1988); doi: 10.1063/1.341571

[5]. Kazuhiro Baba, Yumi Aikawa, and Nobuaki Shohata. Thermal conductivity of diamond films. Journal of Applied Physics 69, 7313 (1991); (J. Appl. Phys., Vol. 69, No. 10, 15 May (1991). doi: 10.1063/1.347580

[6]. Elah Bozorg-Grayeli, Aditya Sood, Mehdi Asheghi, Vincent Gambin, Rajinder Sandhu, Tatyana I. Feygelson, Bradford B. Pate, Karl Hobart, and Kenneth E. Goodson. Applied Physics Letters 102, 111907 (2013); doi: 10.1063/1.4796168

[7]. K.M. Leung, A.C. Cheung, B.C. Liu, H.K. Woo, C. Sun a, X.Q. Shi, S.T. Lee. Measuring thermal conductivity of CVD diamond and diamond-like films on silicon substrates by holographic interferometry. Diamond and Related Materials 8 (1999) 1607±1610

[8]. R.H. Zhua, J.Y. Miaob, J.L. Liua, L.X. Chena, J.C. Guoa, C.Y. Huaa, T. Dingb, H.K. Lianb, C.M. Lia. High temperature thermal conductivity of free-standing diamond films prepared by DC arc plasma jet CVD. Diamond & Related Materials (2014), doi:10.1016/j.diamond.2014.09.007

[9]. V.A. Plotnikov, S.V. Makarov, O.O. Eremeenkov, A.A. Shutkin. Distribution of clusters formed by sp² and sp³ bonds in a carbon diamond-

like thin film. Journal of Technical Physics, 2021, volume 91, issue 4. DOI: 10.21883/000000000000

[10]. F.M. Shakhov, A.P. Meilakhs, E.D. Eidelman. Changing the mechanism of heat propagation during the transition from micro to nanoparticles. Letters to the Journal of Technical Physics, 2016, volume 42, issue 5

[11]. A. P. Meilakhs, E. D. Eidelman, Overheating or supercooling of electrons in a metal due to the influence of the boundary with a dielectric, Letters to the Journal of Experimental and Theoretical Physics, 2014, volume 100, issue 2, 89-93. DOI:10.7868/S0370274X14140033

[12]. E.V. Eidelman. Thermoelectric effect and thermoelectric generator based on carbon nanostructures: achievements and prospects. Successes of Physical Sciences, 2021, vol. 191, No. 6. DOI:https://doi.org/10.3367/UFNr.2020.06.038795

[13]. N. Dwivedi, S. Kumar, H.K. Malik, Superhard behaviour, low residual stress, and unique structure in diamond-like carbon films by simple bilayer approach. J. Appl. Phys., 112 (2012) 023518.

[14]. Hardy J. R., Smith S. D. Two-phonon IR lattice absorption in diamond. Philos Mag. N6 (1961) 1163-1172.

[15]. S. Bhargava, H. D. Bist, S. Sahli, M. Aslam, & H. B. Tripathi, Appl. Phys. Lett. 67 (1995) 1706-1709.

[16]. V.A. Plotnikova, B.F. Dem'yanovb, S.V. Makarov. Atomic structure of carbon clusters laser-produced diamond-like carbon films. Diamond & Related Materials. 114 (2021) 108334. https://doi.org/10.1016/j.diamond.2021.108334

[17]. V.A. Plotnikov, S.V. Makarov, E.V. Kustova, O.S. Melnikova. Local electronic states in carbon diamond-like films. Letters to the Journal of Technical Physics, 2025, volume 51, issue 5. pp. 33-36. DOI: 10.21883/000000000000).

[18]. J. Robertson, Phil. Mag. B, 76 (3), 335 (1997). DOI: 10.1080/01418639708241098.

[19]. V. A. Plotnikov, D. G. Bogdanov, A. S. Bogdanov, A. A. Chepurov, S. V. Makarov, A. P. Yelisseyev, E.I. Zhimulev, V. G. Vins. Heat-conducting properties of thermobarically-sintered detonation nanodiamond. Letters on Materials 12 (4), 2022 pp. 350-353. https://doi.org/10.22226/2410-3535-2022-4-350-353

Information about the authors

Bogdanov Alexander Sergeevich, Postgraduate student of the Department of General and Experimental Physics Altai State University, alexsandr-bogdanov@mail.ru

Bogdanov Denis Grigorievich, Candidate of Physico-Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of General and Experimental Physics of Altai State University, bogdanov.d.g@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-5890-4393

Plotnikov Vladimir Alexandrovich, Doctor of Physico-Mathematical Sciences, Professor, Professor of the Department of General and Experimental Physics of Altai State University, plotnikov@phys.asu.ru, https://orcid.org/0000-0001-7051-1082

Makarov Sergey Viktorovich, Doctor of Physico-Mathematical Sciences, Director of ICTEF and Head of the Department of General and Experimental Physics of Altai State University, makarov@phys.asu.ru, https://orcid.org/0000-0003-1323-4343

Kustova Evgeniya Vladimirovna, Postgraduate student of the Department of General and Experimental Physics Altai State University, kustova@mail.asu.ru

Melnikova Olga Sergeevna, Postgraduate student of the Department of General and Experimental Physics Altai State University, melnikovaos@mail.asu.ru

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 21.08.2025; одобрена после рецензирования 24.11.2025; принята к публикации 01.12.2025.

The article was received by the editorial board on 21 Aug. 2025; approved after reviewing 24 Nov. 2025; accepted for publication 01 Dec. 2025.