

Поликристаллические алмазные порошки и пленки

В. Д. Бланк, Г. А. Дубицкий, В. А. Кульбачинский, С. Г. Буга, А. В. Кречетов,
Е. Е. Семёнова, В. Г. Кытин

ВЛАДИМИР ДАВИДОВИЧ БЛАНК — доктор физико-математических наук, профессор Технического университета «Московский институт стали и сплавов», директор ФГУ «Технологический институт сверхтвердых и новых углеродных материалов», Федеральное Агентство по науке и инновациям РФ (г. Троицк, Московской обл.). Область научных интересов: физика высоких давлений, углеродные наноструктуры, синтез алмазных материалов.

ГЕННАДИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ ДУБИЦКИЙ — кандидат химических наук, заведующий отделом синтеза новых сверхтвердых материалов ФГУ «Технологический институт сверхтвердых и новых углеродных материалов», Федеральное Агентство по науке и инновациям РФ (г. Троицк, Московской обл.). Область научных интересов: физика высоких давлений, углеродные наноструктуры, синтез алмазных материалов.

ВЛАДИМИР АНАТОЛЬЕВИЧ КУЛЬБАЧИНСКИЙ — доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики низких температур и сверхпроводимости Физического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова. Область научных интересов: физика низких температур, сверхпроводимость, фуллерены, углеродные низкоразмерные структуры, физика высоких давлений.

СЕРГЕЙ ГЕННАДЬЕВИЧ БУГА — кандидат физико-математических наук, заместитель директора, заведующий отделом наноэлектроники ФГУ «Технологический институт сверхтвердых и новых углеродных материалов», Федеральное Агентство по науке и инновациям РФ (г. Троицк, Московской обл.). Область научных интересов: физика высоких давлений, углеродные наноструктуры, электронные свойства.

АЛЕКСЕЙ ВИКТОРОВИЧ КРЕЧЕТОВ — аспирант кафедры физики низких температур и сверхпроводимости Физического факультета Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова. Область научных интересов: физика низких температур, сверхпроводимость, фуллерены, углеродные структуры.

ЕЛЕНА ЕГОРОВНА СЕМЁНОВА — научный сотрудник отдела синтеза новых сверхтвердых материалов ФГУ «Технологический институт сверхтвердых и новых углеродных материалов», Федеральное Агентство по науке и инновациям РФ (г. Троицк, Московской обл.). Область научных интересов: физика высоких давлений, углеродные наноструктуры, синтез алмазных материалов.

ВЛАДИМИР ГЕННАДЬЕВИЧ КЫТИН — доцент кафедры физики низких температур и сверхпроводимости Физического факультета Московского государственного университета им. Ломоносова. Область научных интересов: физика низких температур, физика диэлектриков, фуллерены, электронный парамагнитный резонанс, физика высоких давлений.

119992 Москва, ГСП-2, Ленинские горы, МГУ им. М.В. Ломоносова, E-mail kulb@mig.phys.msu.ru

Благодаря ряду уникальных физико-механических свойств алмаз представляет большой интерес как с научной, так и с практической точки зрения. Алмаз имеет высокую теплопроводность при комнатной температуре, одну из самых высоких твердостей, высокий модуль Юнга и широкий оптический диапазон пропускания. Является изолятором, его запрещенная энергетическая зона равна 5,5 эВ. Легирование алмаза донорной или акцепторной примесью приводит к получению хорошо проводящего материала, весьма перспективного благодаря уникальной комбинации физических и электронных свойств. Кроме того, алмаз — химически инертный и радиационноустойчивый материал.

Сравнительно недавно алмазы нашли широкое применение в электронной технике. Они незаменимы в качестве деталей электронных приборов, работающих в экстремальных условиях: при низких и высоких температурах, в сильных электромагнитных полях, в потоках ионизирующих излучений, в агрессивных средах и т.п.

В частности, алмазы широко используются как детекторы ядерных излучений, как полупроводниковые термометры, работающие при высоких температурах и облучении нейтронными потоками, как теплоотводы, полупроводниковые диоды и транзисторы и т.п.

Основным методом производства синтетических алмазов и алмазных порошков остается преобразование графита в алмаз при температурах до 1600 °С, давлениях около 6 ГПа в присутствии катализаторов — high-pressure-high-temperature, HPHT-метод. Альтернативными методами получения синтетических алмазов являются детонационный синтез из взрывчатых веществ (ультрадисперсные алмазы) и химическое осаждение из паровой (газовой) фазы — Chemical Vapour Deposition, CVD-метод.

В мире ежегодно производится примерно 80 тонн синтетических алмазов, но потребность в них возрастает, в связи с чем сохраняется повышенный интерес к высоким технологиям их производства.

В настоящее время актуальными направлениями работ в области синтетических алмазов являются выращивание поликристаллических алмазных пленок и алмазных порошков и исследование сверхпроводимости сильнолегированных поликристаллических синтетических алмазов.

Сверхпроводимость обнаружена в образцах, полученных как методом высокотемпературной обработки графита под давлением [1], так и методом химического осаждения из газовой фазы [2]. Отметим, что проблеме получения сверхпрочных сверхпроводящих композиционных материалов на основе порошковых алмазов, применяемых в технике высокого давления, посвящена более ранняя работа [3]. В настоящем обзоре кратко рассмотрены передовые технологии получения синтетических алмазов и основные достижения в различных областях их применения.

Химическое осаждение алмазов из газовой фазы (CVD-метод)

Прежде всего отметим, что основоположниками методов химического осаждения алмазов из газовой фазы являются Б.В. Спицын, Б.В. Дерягин и В.М. Федосеев [см. 4, 5 и ссылки в них]. В настоящее время наиболее распространены две разновидности CVD-технологии: процесс осаждения с использованием горячей металлической нити [6] и процесс осаждения из плазмы, облучаемой микроволнами [7]. Первый метод отличается своей простотой, а второй позволяет получать поликристаллические алмазы лучшего качества.

CVD-метод с нитью накала

На рис. 1 изображена схема CVD-установки с нитью накала для синтеза искусственных алмазов. В рабочей камере вблизи кремниевой подложки (для алмазного осадка) устанавливается вольфрамовая нить, через которую пропускается ток, при этом она нагревается до ~ 2000 °С. Температура в камере и температура держателя подложки составляет от 700 до 1000 °С (измеряется термопарой). Через камеру пропускается поток газа — метан (1% об.), растворенный в водороде. Скорость потока газа составляет 10—100 см³/мин. Создаваемое в камере давление находится в пределах от 1 до 10 кПа.

В зависимости от состояния поверхности подложки образующийся поликристаллический алмазный осадок состоит либо из кубооктаэдрических или мно-

гократно сдвоенных отдельных частиц, либо из замкнутых пленок. При указанных выше условиях линейные скорости роста алмазных частиц составляют примерно 1 мкм/ч. Это значение можно считать типичным для CVD-метода с нитью накала.

Многочисленные исследования, проведенные для выяснения, какие параметры и как влияют на скорость и качество роста поликристаллических алмазных пленок [8, 9], позволили установить следующие наиболее важные факторы [10].

Для того чтобы обеспечить быстрое формирование алмазной пленки, необходима надлежащая предварительная обработка поверхности подложки, например, сверхзвуковым облучением. Максимальная скорость роста алмазной пленки достигается при температуре около 850 °С. Скорость роста пленки увеличивается с повышением температуры нити накала, а также при уменьшении расстояния между подложкой и нитью. Скорость роста пленки возрастает с увеличением концентрации метана. Однако при этом в получаемом продукте увеличивается содержание неалмазных углеродистых компонентов. Скорость роста алмазной пленки зависит также от давления газа и достигает максимального значения при 10 кПа.

К существенному недостатку данного метода синтеза поликристаллических алмазов следует отнести неизбежное внедрение в растущий алмаз примесей, исходящих от раскаленной нити.

Микроволновый CVD-метод

Из процессов химического осаждения алмазной пленки именно микроволновый метод стал основой промышленной технологии получения поликристаллических алмазов. Впервые этот метод был продемонстрирован в 1982 г. группой японского ученого Камо [7] в Национальном институте исследований неорганических материалов (National Institute for Research in Inorganic Materials) в Японии. С тех пор эта технология успешно применяется благодаря простоте и удобству ее реализации. Кроме того, интенсивное развитие микроволновой техники открыло возможности увеличить скорость роста алмазных пленок и соответственно размеры получаемых в итоге кристаллов алмаза.

Сущность микроволнового CVD-метода заключается в следующем [11] (рис. 2). В камеру микроволнового реактора вводится газовая смесь, содержащая метан. Газ, находящийся над подложкой, подвергается микроволновому облучению. При этом в камере создается разряд и получается плазма. Камера реактора является по сути электромагнитным резонатором, поэтому геометрия камеры оказывает сильное влияние на расположение и размеры плазменного облака. Очень важно, чтобы плазма была стабильной и можно было контролировать ее состояние. Микроволновое излучение передает энергию электронам, которые в свою очередь посредством столкновений передают эту энергию всему газу [12, 13]. В результате газ нагревается. При достижении необходимой температуры начинается разложение метана с образованием свободного углерода и водорода. В присутствии водорода и при определенных значениях температуры подложки и давления газовой смеси преимущественным становится формирование алмазной, а не графитовой структуры углерода.

Плазма в камере возбуждается микроволновым излучением на частотах 915 МГц (32,8 см) и 2,45 ГГц

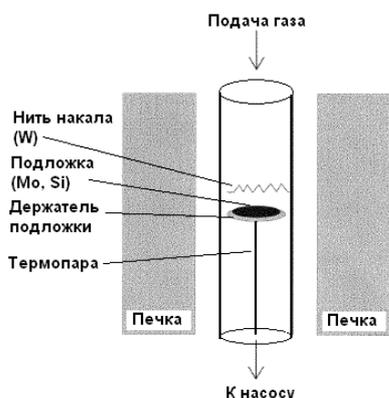


Рис. 1. Схема CVD-установки с нитью накала [6]

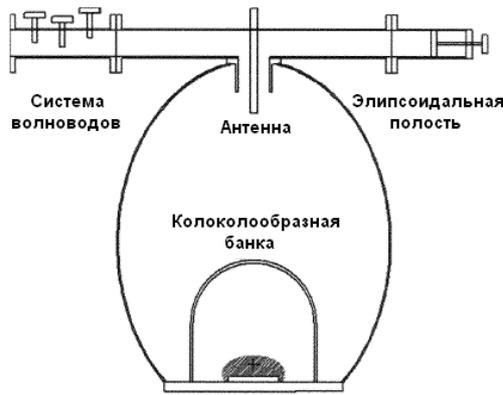


Рис. 2. Схема микроволновой CVD-установки [11]

(12,2 см). Выбор именно таких частот обусловлен главным образом тем, что они свободны для использования в большинстве стран.

В отличие от метода с нитью накала, где примесь в исходной газовой смеси агрессивных газов, таких как кислород или галогены, недопустима из-за опасности разрушения нити накала, в микроволновом методе может использоваться почти любая газовая смесь. Однако не любая комбинация газов приводит к росту кристаллов алмаза. Для подбора состава углеродсодержащей газовой смеси очень удобной оказалась треугольная фазовая диаграмма в координатах C—H—O (рис. 3) [14]. Было установлено, что рост кристаллов алмаза происходит только при составах, соответствующих относительно узкой линии CO. В последние несколько лет активно разрабатывается также техно-

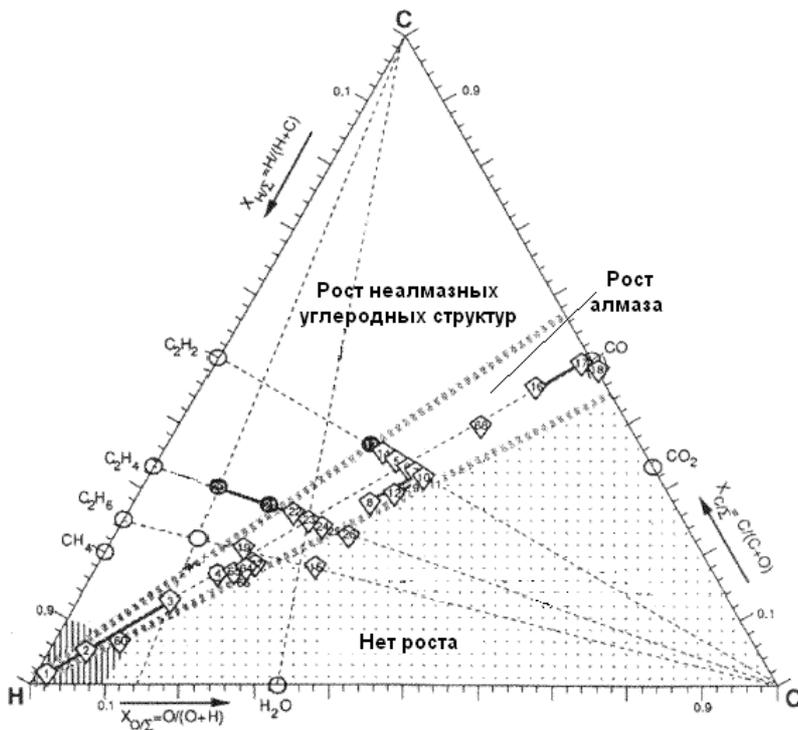


Рис. 3. Треугольная фазовая диаграмма в координатах C—H—O [14]

логия синтеза, соответствующая составам газовой смеси по линии H—C.

Чтобы получить достаточно высокий выход алмазного продукта по микроволновой CVD-технологии, необходим, помимо выбора состава газовой смеси, правильный подбор температуры и давления газа, а также температуры подложки и обеспечение надлежащего качества ее поверхности.

Детонационный синтез ультрадисперсных алмазов из твердых взрывчатых веществ

Ультрадисперсные алмазы получают путем химических превращений, протекающих при взрывах различных взрывчатых органических веществ [15]. На фронте ударной (детонационной) волны происходит практически мгновенное выделение огромного количества энергии. Скорость детонационной волны, возникающей при взрыве мощных твердых взрывчатых веществ, составляет 7—8 км/с. Параметры детонационной волны — давление 20—30 ГПа, температура 3000—4000 К соответствуют области существования стабильного алмаза на фазовой диаграмме углерода (рис. 4). В газах, образующихся при детонации ряда взрывчатых веществ, содержится значительное количество свободного углерода, из которого в условиях высоких температуры и давления, достигаемых при взрыве, формируется алмазоподобная фаза углерода.

Для сохранения образовавшейся фазы необходимо предотвратить ее окисление, а также графитизацию — обратный переход из алмаза в графит при разлете продуктов взрыва в окружающую среду. Это обычно достигается охлаждением продуктов взрыва при их локализации в прочных замкнутых сосудах, выдерживающих высокое давление, создаваемое при взрыве заряда. В качестве охлаждающей среды используются либо вода, либо инертный газ, например углекислый газ, азот, либо продукты взрыва предыдущего заряда. Из полученного после взрыва твердого остатка

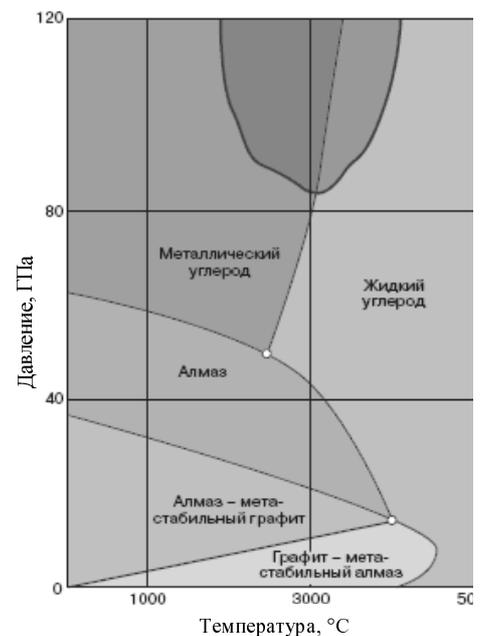


Рис. 4. Фазовая диаграмма углерода

путем механической и химической очистки выделяют алмазоподобную фазу углерода.

Основные характеристики частиц, образуемых методом взрыва: выход алмазного продукта 4–10% от массы взрывчатого вещества, диаметр основной совокупности частиц 2–20 нм (из-за малых размеров такие частицы и получили название «ультрадисперсные алмазы»), плотность 3000–3100 кг/м³. Параметр кристаллической решетки $a = 0,356$ нм. Элементный состав (в %): С 81–87; N 1,9–2,5; H 0,1–1,2; O 9–15. Плотность и параметр кристаллической решетки получаемого алмазного порошка совпадают с характеристиками для природных алмазов. Примесей же в решетке «детонационных» алмазов значительно больше, чем у природных и получаемых по CVD-методу алмазов.

Для увеличения времени действия ударного импульса на продукты взрыва, что необходимо для получения достаточно высокого выхода полезного продукта — алмазного порошка, применяют различные схемы взрывного нагружения. Существенное (примерно на порядок) увеличение длительности ударного импульса достигается при использовании цилиндрических зарядов, внутри которых по их оси устанавливается труба с графитовым порошком. Так, в экспериментах с использованием зарядов взрывчатых веществ диаметром более метра и высотой в несколько метров выход алмазов достигал 80%, а размеры алмазных частиц составляли 1–100 мкм [16].

Очень малые размеры алмазных частиц значительно ограничивают возможности непосредственного применения ультрадисперсных алмазов для изготовления каких-либо инструментов или приборов. Практически пригодны для изготовления, например, режущего инструмента технические алмазы с размерами частиц на два–три порядка больше, чем частицы ультрадисперсных алмазов. Поэтому для промышленной реализации «детонационных» алмазов требуется предварительное их укрупнение (компактирование). Многие известные работы по ударному компактированию ультрадисперсных алмазов связаны также с использованием взрывных технологий [17].

Одним из более простых способов ударного компактирования является нагружение образцов с помощью массивных снарядов, разгоняемых взрывом до скоростей в несколько сот метров в секунду. Варьирование скорости снаряда, его калибра и длины позволяет осуществить масштабирование давлений и времени воздействия на образцы ультрадисперсного алмаза, помещенные в нагружаемый контейнер (ампулу). Создаваемые скорости в несколько сот метров в секунду заведомо не допускают пластических деформаций алмазных частиц.

Поскольку процесс компактирования происходит при давлениях и температурах, соответствующих области стабильной алмазной фазы углерода, существует возможность перекристаллизации вещества на границах соприкосновения частиц и образования сравнительно крупных алмазных зерен. Очевидно, что данный механизм компактирования может быть реализован при условии высокой чистоты исходного порошка. Высказанные выше положения обоснованы в основу метода компактирования ультрадисперсного алмаза с применением баллистических взрывных установок. Взрывные установки такого типа, в состав которых

входят взрывные генераторы давления, подробно описаны в [18].

Плотность получаемых алмазных зерен составляет 3,2 г/см³, микротвердость 60–70% от микротвердости природного алмаза. В большинстве своем поликристаллические частицы прозрачны и бесцветны. Встречаются отдельные кристаллики голубого, желтого и светло-коричневого цветов. Подчеркнем еще раз, что заметную долю составляют частицы со средним размером 0,5–0,6 мкм. Это уже макрочастицы с характерным алмазным блеском, которые вполне пригодны для использования их даже в декоративных целях.

Применение алмазов в высокотехнологичных областях

Как было указано в начале статьи, алмазы незаметны в качестве деталей электронных приборов, работающих в экстремальных условиях: при низких и высоких температурах, в сильных электромагнитных полях, в потоках ионизирующих излучений, в агрессивных средах и т.п. Из-за большого разнообразия применений алмазов рассмотреть все в рамках настоящего обзора не представляется возможным. Поэтому остановимся лишь на некоторых примерах наиболее широкого применения синтетических алмазов в современных технологиях.

Инфракрасные окна

Удачные эксперименты синтеза поликристаллических алмазных пластин с большой площадью поверхности, обладающих выдающимися тепловыми, механическими и оптическими свойствами, открыли возможность использования алмазов для изготовления оптических окон (рис. 5) в мощных инфракрасных лазерах (СО₂-лазер с длиной волны 10,6 мкм) и бортовых авиационных инфракрасных датчиках, работающих в диапазоне длин волн 8–12 мкм. Существует лишь небольшое количество материалов, способных функционировать в этом оптическом диапазоне. А если еще учесть, что используемый материал должен выдерживать жесткие условия окружающей среды, такие как высокая температура, большая мощность излучения или высокие аэродинамические нагрузки, то выбор почти автоматически падает на искусственный алмаз [19]. Он сочетает в себе все необходимые свойства: прозрачность в широкой оптической области — от ультрафиолетового до дальнего инфракрасного диапазона, высокую теплопроводность при комнатной температуре и исключительную твердость, благодаря которой он может выдерживать большие механические нагрузки.

Важным параметром мощных лазерных установок (СО₂-лазеры) является коэффициент поглощения выходного окна при длине волны 10,6 мкм. Значения этого коэффициента для природного алмаза и высококачественных искусственных алмазов очень близки и составляют примерно 0,03–0,05 см⁻¹ [20–22]. До настоящего времени стандартным материалом, из которого делали окна мощных СО₂-лазеров, был селенид цинка ZnSe. По сравнению с поликристаллическими алмазными пластинами он имеет более низкий коэффициент поглощения, а именно 0,0005 см⁻¹ при длине волны 10,6 мкм [23]. Однако алмаз оказывается лучше в том отношении, что имеет значительно более высокую теплопроводность и намного более низкий

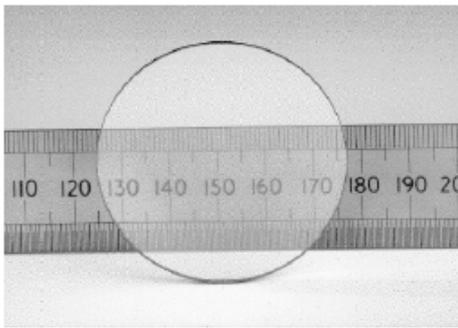


Рис. 5. Алмазное окно для инфракрасного лазера [19]

коэффициент термического расширения. За счет этого окно из алмаза не нагревается под действием лазерного излучения, а мгновенно отводит тепло к краям окна, которые охлаждаются соответствующими способами. Таким образом, использование алмазных окон позволяет значительно повысить мощность лазера.

Алмазные теплоотводы

Серьезную проблему для работы мощных электронных и оптоэлектронных устройств создает высокое тепловыделение (огромный поток энергии, до нескольких кВт/см²) при их функционировании, в связи с чем требуется эффективное охлаждение. Для отвода тепла при работе таких устройств необходимо организовать узкий тепловой поток, например, путем размещения слоя материала с высокой теплопроводностью между самим устройством и системой охлаждения. Оказалось, что на эту роль прекрасно подходит напыленный слой алмазного порошка [24–26].

Помимо высокой теплопроводности алмаз имеет низкий коэффициент термического расширения, сравнимый с коэффициентом для кремния. Это очень важное обстоятельство, поскольку, находясь в непосредственном контакте с охлаждаемой поверхностью, алмазные слои в случае увеличения или уменьшения его объема может существенно ухудшить работу устройства или даже разрушить его. Огромный потенциал синтетического поликристаллического алмаза становится еще более очевидным, если сравнить тепловые характеристики алмаза с соответствующими свойствами известных материалов (см. таблицу).

Алмазные диоды и транзисторы

В течение последних нескольких лет было смоделировано большое количество разнообразных электронных устройств на основе алмаза. Это диоды Шоттки на легированной бором (p^+) алмазной подложке [27, 28], диоды с $p-n$ -переходом на основе контакта поликристаллических алмазов, легированных бором и азотом, биполярные транзисторы, основанные на $p-n$ -переходе [29, 30], полевые транзисторы с дельта-легированными слоями бора и поверхностными проводящими слоями со связанным водородом [31–33]. Многие из перечисленных устройств уже реально изготовлены и представляют современное состояние в этой области науки и техники. Как правило, приборы на основе алмазов используются в экстремальных условиях. Алмазные диоды Шоттки выдерживают большие плотности тока и высокие температуры, т.е. им не страшен собственный разогрев под

Таблица

Коэффициенты теплопроводности и термического расширения различных материалов

Материал	Коэффициент теплопроводности при 20 °С, Вт/(см ² ·К)	Коэффициент теплового расширения при 20 °С, 10 ⁻⁶ ·К ⁻¹
CVD-алмаз	10–20	1,05
Медь	4	16,8
Серебро	4,28	19,6
ВеО	2,23	6,4
Кремний	1,5	-2,62
GaAs	0,45	-5,9

нагрузкой, — это прежде всего ключи в высокотокковых цепях. В частности, алмазные диоды Шоттки применяются в приборах, работающих при температурах до 1000 °С. Алмазные полевые транзисторы имеют пороговую частоту 30 ГГц и плотность тока до 300 мА/мм [34].

Применение алмазов в технике высоких давлений

Один из наиболее распространенных способов создания высокого квазигидростатического давления основан на применении объемной камеры Бриджмена. Давление в ней создается в тонком слое среды, находящемся между двумя рабочими торцами усеченных конусов (наковален), изготовленных из твердых сплавов, с большим углом при вершине. Камера такого типа позволяет получать давление до 10,0–20,0 ГПа. В объемных квазигидростатических камерах можно устанавливать внутренний нагреватель, поэтому их используют для проведения химических превращений веществ под давлением, например для синтеза синтетических алмазов и других технически важных материалов. Усилие к таким камерам создается гидравлическими прессами [16].

Давление выше 100 ГПа получают с помощью алмазных камер высокого давления. Рекордные значения при использовании алмазных наковален достигают 270–280 ГПа. В качестве наковален применяются алмазы ювелирной огранки с плоской площадкой на вершине.

Композиционные сверхпроводящие материалы на основе алмаза

Создание материалов, сочетающих в себе сверхпроводимость, сверхтвердость и высокую прочность, представляет интерес с научной и прикладной точек зрения. В частности, в аппаратах высокого давления, применяемых для исследования сверхпроводящих материалов, удобно использовать наковальни из материала, который также обладает сверхпроводимостью. Первые результаты таких работ описаны в [3].

К настоящему времени хорошо изучены карбиды различных металлов, таких как Nb [35–39], Mo [40–42], Ta [38], обладающие сверхпроводящими свойствами.

В рамках данной работы было проведено исследование следующих алмазных систем: алмаз–Nb, алмаз–Mo, алмаз–MgB₂. Синтез этих материалов осуществляли при высоких статических давлениях и тем-

пературах. Эксперименты выполнены с использованием камер высокого давления типа «наковальни с лунками». Температурную зависимость электрического сопротивления полученных образцов измеряли четырехконтактным методом. (В этом методе ток протекает через одну пару контактов, а потенциал, определяющий сопротивление, измеряется с двух других контактов. При этом сопротивление контактов не входит в измеряемое сопротивление образца).

Система алмаз—ниобий. Для получения сверхпроводящего композита в этой системе в качестве исходного материала использовали синтетический алмаз с размерами частиц 80—100 мкм, на поверхность которых предварительно наносили пленки ниобия. Эксперименты проводили при давлении 7,7 ГПа и температуре 1973 К, время выдержки при заданных параметрах 60 с.

Значения микротвердости (по Виккерсу) синтезированного композита находятся в интервале 35—95 ГПа. По данным [43], микротвердость карбида ниобия NbC (по Виккерсу) равна ~17 ГПа, что значительно меньше полученных нами значений для композита. Образцы имеют критическую температуру перехода в сверхпроводящее состояние $T_c = 12,6$ К (рис. 6а), характерную только для соединения в системе Nb—C с высокой стехиометрией состава [35, 36]. Нестехиометричные соединения NbC имеют более низкую температуру T_c . Характерная особенность состоит в том, что сверхпроводящий переход оказывается достаточно узким, $\Delta T \approx 1,5$ К. Полученное значение второго критического магнитного поля $H_{c2} = 1,25$ Тл (на рис. 6б отмечено вертикальной линией) согласуется с полученным ранее [35].

Система алмаз—молибден. Для синтеза сверхпроводящего композита в данной системе в качестве исходного материала был использован порошок синтетического алмаза зернистостью 40—100 мкм и порошок молибдена с размерами частиц 1—5 мкм. Условия получения компактного материала: давление 7,7 ГПа, температура 2173 К, время выдержки 90 с. Микротвердость полученного материала (по Виккерсу) варьирует в интервале значений 27÷83 ГПа. Композиты являются сверхпроводниками и имеют свои характерные особенности. Во-первых, температура перехода в сверхпроводящее состояние ($T_c=9,3$ К) ниже, чем у системы алмаз—ниобий. Во-вторых, ширина перехода значительно больше, $\Delta T \approx 5$ К. На рис. 7 представлена температурная зависимость сопротивления таких композитов.

Система алмаз—MgB₂. Температура сверхпроводящего перехода композита, полученного при варьировании содержания MgB₂ в системе алмаз—MgB₂ в широких пределах, оказалась практически той же, что и для исходного MgB₂ (рис. 8).

В заключение отметим, что нами получены карбиды на поверхности синтетических алмазов, которые обладают сверхпроводящими характеристиками на уровне показателей для лучших образцов, приготовленных другими методами. Это узкий сверхпроводящий переход, высокая температура перехода в сверхпроводящее состояние, большое значение критического магнитного поля. В то же время данные алмазные

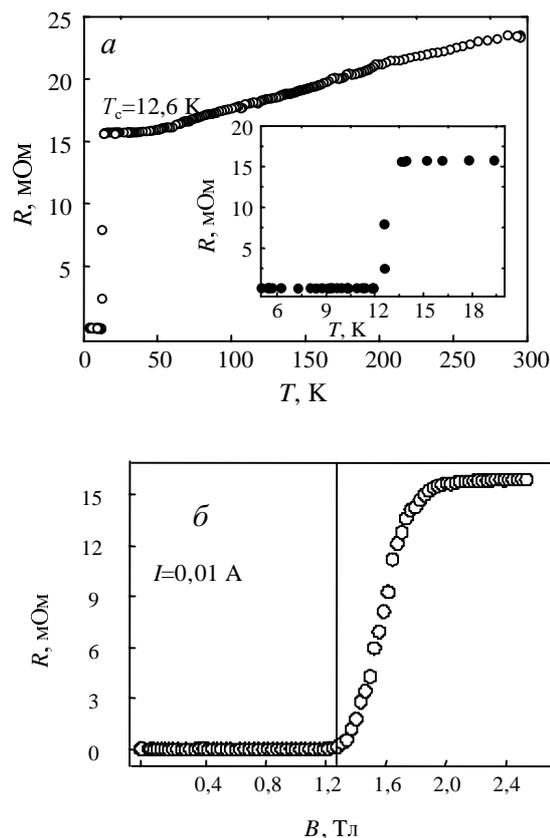


Рис. 6. Температурная (а) и магнетополевая (при $T = 4,2$ К) (б) зависимость сопротивления системы алмаз—ниобий.

Начало перехода в нормальное состояние обозначено вертикальной линией

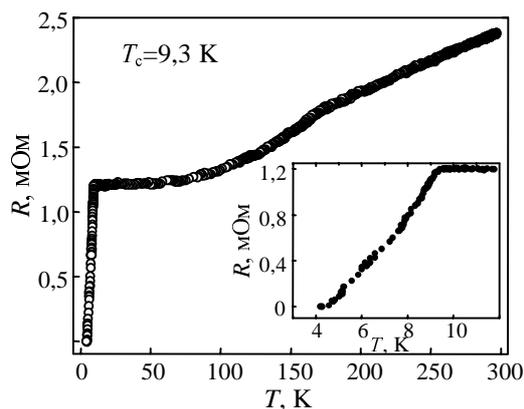


Рис. 7. Температурная зависимость электрического сопротивления композитов, полученных в системе алмаз—молибден

компакты имеют достаточно высокие механические характеристики и могут успешно применяться в качестве высокопрочных конструктивных элементов различных устройств, для работы которых важно сочетание сверхпроводимости и высокой прочности.

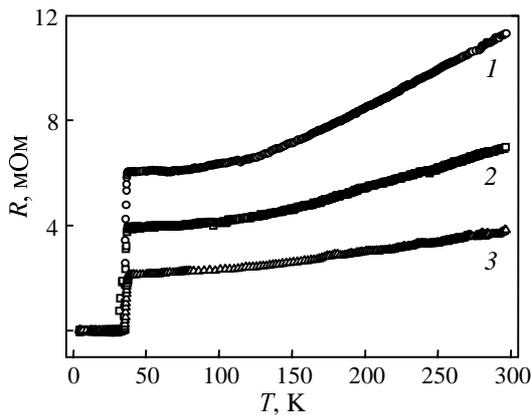


Рис. 8. Температурная зависимость сопротивления образцов композитов, полученных в системах алмаз— MgB_2 , $T_c = 36,9$ (1), чистого MgB_2 , $T_c = 37$ К (2) и алмаз—ниобий— MgB_2 , $T_c = 37,5$ (3)

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ekimov E.A., Sidorov V.A., Bauer E.D. e. a.* Nature, 2004, v. 428, p. 542.
2. *Takano Y., Nagao M., Kobayashi K. e. a.* 15th European Conference on Diamond, Diamond-like Materials, Carbon Nanotubes, Nitrides & Silicon Carbide/Diamond"2004, 12—17.09.2004, Rivadel Garda, Italy, No. 4.4.
3. *Нарожный В.Н., Степанов Г.Н., Дубицкий Г.А., Семёнова Е.Е., Яковлев Е.Н.* Физика и техника высоких давлений, 1988, вып. 27, с. 88.
4. *Spitsyn B.V., Bouilov L.L., Derjaguin B.V.* J. Cryst. Growth, 1981, v. 52, p. 219.
5. *Spitsyn B.V.* Growth of Diamond Films from the Vapour Phase. Handbook of Crystal Growth. Ed. D.T.J. Hurle, Amsterdam: Elsevier, 1994, v. 3, p. 401.
6. *Matsumoto S., Sato Y., Kato M., Sekata N.* Japan. J. Appl. Phys., 1982, v. 21, p. 183.
7. *Kato M., Sato Y., Matsumoto S., Setaka N.* J. Cryst. Growth, 1983, v. 62, p. 642.
8. *Matsubara H., Sakuma T.* J. Mater. Sci., 1990, v. 25, p. 4472.
9. *Okoli S., Haubner R., Lux B.* J. Physique, 1991, VI, p. 923.
10. *Zhou S., Zhihao Z., Ning X., Xiaofeng Z.* Mater. Sci. Eng., 1994, v. 25, p. 47.
11. *Füner M., Wild C., Koidl P.* Appl. Phys. Lett., 1998, v. 72, p. 1149.
12. *Hyman E., Tsang K., Drobot A., Lane B., Casey J., Post R.* J. Vac. Sci. Technol., 1994, v. 12, p. 1474.
13. *Capitelli M., Colonna G., Hassouni K., Gicquel A.* Plasma Chem. Proc., 1996, v. 16, p. 153.
14. *Bachmann P., Leers D., Lydtin H.* Diam. Relat. Mater., 1991, v. 1, p. 1.
15. *Даниленко В.В.* Синтез и спекание алмаза взрывом. М.: Энергоатомиздат, 2003.
16. *Новиков С.А.* Соросовский образов. ж., 1999, № 2, с. 104.
17. *Нестеренко В.Ф.* Импульсные нагружения гетерогенных материалов, Новосибирск: Наука, 1992.
18. *Новиков С.А., Петров В.А.* Установки взрывного типа для механических испытаний материалов и конструкций. М.: ЦНИИатоминформ, 1989, с. 60.
19. *Werner M., Locher R.* Rep. Prog. Phys., 1998, v. 61, p. 1665.
20. *Harris D.C.* SPIE, 1994, v. 2286, p. 218.
21. *Massart M., Union P., Scarsbrook G. e. a.* Ibid, 1996, v. 2714, p. 177.
22. *Harris K., Herrit G.L., Johnson C.J. e. a.* Appl. Opt., 1991, v. 30, p. 5015.
23. *Klocek P.* Handbook of Infrared Optical Materials. New York: Dekker, 1991.
24. *Lu G.* Applications of Diamond Films and Related Materials, 2nd Int. Conf. Eds. A. Feldmann e. a., 1993, p. 269.
25. *Wörner E., Wild C., Müller-Sebert W. e. a.* Diam. Relat. Mater., 1996, v. 5, p. 668.
26. *Graebner J.E., Jin S., Kammlott G.W. e. a.* Appl. Phys. Lett., 1992, v. 60, p. 1576.
27. *Butler J.E., Geis M.W., Krohn K.E. e. a.* Semicond. Sci. Technol., 2003, v. 18, p. 67.
28. *Borst T.H., Strobel S., Weis O.* Appl. Phys. Lett., 1995, v. 67, p. 2651.
29. *Aleksov A., Denisenko A., Kohn E.* Proc. Applied Diamond Conf. Frontier of Carbon Technology Joint Conf. Tsukuba, Japan, 1999, p. 138.
30. *Kawarada H.* Surf. Sci. Rep., 1996, v. 26, p. 205.
31. *Gluche P., Aleksov A., Vescan A. e. a.* IEEE Electron Device Letters, 1997, v. 18, p. 547.
32. *Vescan A., Gluche P., Ebert W., Kohn E.* Ibid., 1997, v. 18, p. 556.
33. *Ebert W., Vescan A., Gluche P. e. a.* Diam. Relat. Mater., 1997, v. 6, p. 329.
34. *Aleksov A., Denisenko A., Kunze M. e. a.* Semicond. Sci. Technol., 2003, v. 18, p. 59.
35. *Шабанова Н.П., Красносвободцев С.И., Ноздрин В.С., Головашкин А.И.* Физика твердого тела, 1996, т. 38, № 7, с. 1969.
36. *Каримов Ю.С., Уткина Т.Г.* Письма в ЖЭТФ, 1990, т. 51, вып. 9, с. 468.
37. *Красносвободцев С.И., Шабанова Н.П., Екимов Е.В. и др.* Там же, 1995, т. 108, вып. 3(9), с. 970.
38. *Гусев А.И., Назарова С.З., Коуров Н.И.* Физика твердого тела, 1987, т. 29, вып. 6, с. 1879.
39. *Pickett W.E., Klein B.M.* Phys. Rev. B, 1984, v. 34, № 4, p. 2517.
40. *Wood J., Keem J.E., Kadin A.M. e. a.* IEEE Transactions on Magnetics, 1985, v. MAG-21, p. 842.
41. *Dabell R.S., Meyer R.G., Morse M.D.* J. of Chem. Phys., 2001, v. 114, I. 7, p. 2938.
42. *Terrones M., Hsu W.K., Schilder A. e. a.* Appl. Phys. A, 1998, v. 66, I. 3, p. 307.
43. *Том Л.* Карбиды и нитриды переходных металлов. Пер. с англ. М.: «Мир», 1974.