

Как алмазы превращаются в проводники

При нанесении металлического покрытия и последующем низкотемпературном отжиге поверхность алмаза трансформируется, образуя достаточно тонкое и прочно связанное с алмазом графеновое покрытие.

Локальная графитизация алмазной пленки позволит создать электронную схему на подложке без дополнительных металлических контактных слоев. Ученые из Института неорганической химии им. А. В. Николаева СО РАН создали такой проводящий графеноподобный слой и изучают его транспортные свойства. Статья об этом опубликована в международном журнале *Synthetic Metals*.



О. В. Седельникова

Алмаз — хороший диэлектрик, устойчивый к воздействию высоких напряжений и ионизационному излучению. Графен — другая модификация углерода, отличающаяся высокой электропроводностью. Комбинация этих материалов открывает возможность для развития углеродной электроники нового поколения, в которой электрический сигнал будет подаваться по графеновым дорожкам к полупроводниковым алмазным элементам. Однако переносить готовый графен на поверхность алмаза не всегда эффективно, поскольку между материалами образуется нековалентная связь, ухудшающая электрический контакт. Альтернативное решение — непосредственная графитизация алмазной поверхности. На выполнение этой задачи направлен проект РНФ «Гибридные sp^3 - sp^2 углеродные материалы как платформа для разных областей электроники: синтез, строение и свойства».

«Алмаз — состояние углерода в sp^3 -гибридизации, то есть каждый его атом связан с еще четырьмя атомами углерода. Эта структура обеспечивает большую запрещенную зону (ту область значений энергий, которыми не может обладать электрон) и, следовательно, хорошие изоляционные свойства алмаза. Графит же состоит из плоских листов графена, у которых каждый атом связан с тремя другими, и образуется структура пчелиных сот. При нормальных условиях (комнатная температура и атмосферное давление) термодинамически более стабильная фаза углерода — графит, алмаз же метастабилен. Казалось бы, алмаз должен спонтанно преобразовываться в графит. Но этого не происходит из-за высокого энергетического барьера, необходимого для разрушения алмазной

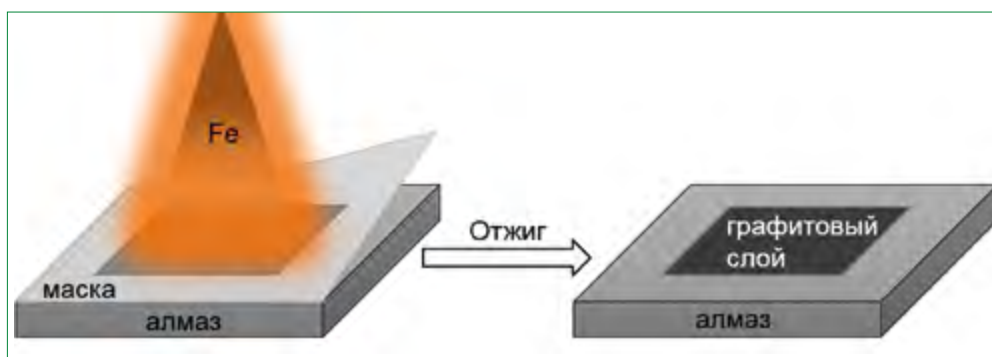


Схема формирования проводящего слоя при отжиге

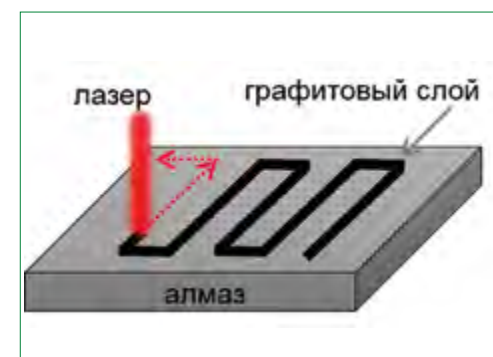
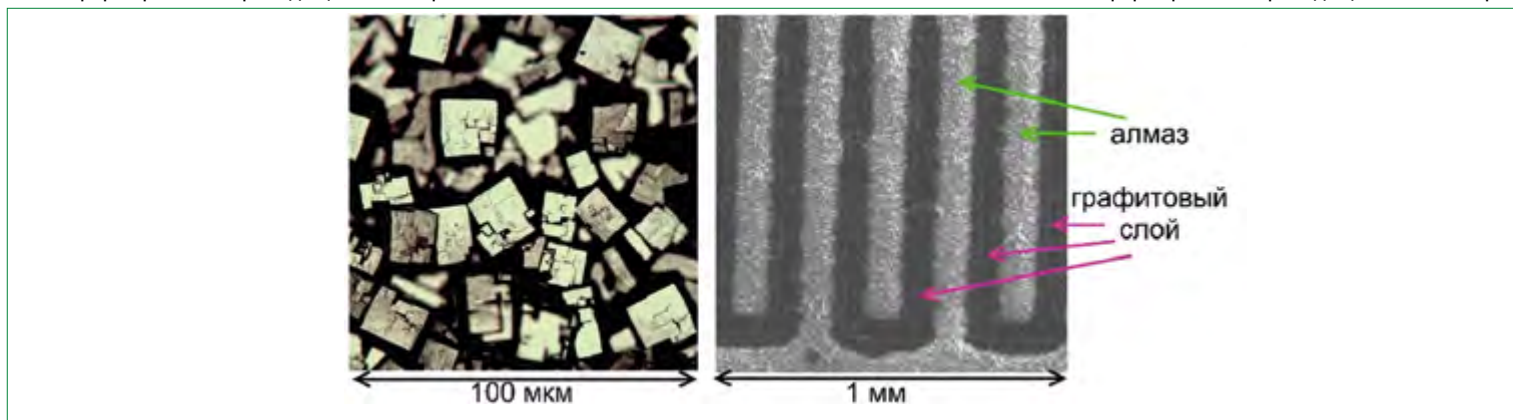


Схема формирования проводящего слоя лазером



Проводящий графеноподобный слой под разным увеличением

структуры. Для такого превращения требуются высокие температуры (выше 2000 °C). Однако в присутствии каталитического металла разрушение алмазной структуры значительно упрощается. При нагревании в интерфейсном слое «алмаз — металл» возникает встречная диффузия атомов, то есть частицы металла погружаются в алмаз, а атомы углерода проникают в металл. В итоге происходит насыщение каталитической частицы и выделяется sp^2 -углерод, параллельно формируются графеновые слои на поверхности алмаза», — рассказывает старший научный сотрудник лаборатории физикохимии наноматериалов ИНХ СО РАН кандидат физико-математических наук **Ольга Викторовна Седельникова**.

Ученые используют поликристаллические алмазные пленки, получаемые методом плазмохимического осаждения из газовой фазы. При этом в водородно-углеродной плазме образуются углеродосодержащие радикалы, которые конденсируются на кремниевой подложке с образованием алмазной фазы. За десять часов исследователи синтезируют порядка 50–70 микрон плотной алмазной пленки, которая состоит из поликристаллитов размером около десятков микрон. В итоге ее свойства близки к свойствам монокристаллических алмазных подложек.

Тонкий слой металла (обычно это железо, никель или молибден) наносят на поликристаллическую пленку с помощью магнетронного напыления через трафарет. После этого пленку переносят в печь и отжигают в бескислородной атмосфере. В течение процесса происходит конверсия алмаза в графитоподобную форму толщиной около пяти нанометров. Невооруженным глазом видно, что нагретая

область стала темнее. Поскольку сам алмаз для оптики прозрачен, это говорит о том, что сформировалась графитовая фаза. На каждом этапе ученые снимали спектры с помощью спектрометра. Было установлено, что при 310 °C начинает формироваться графит. Такая температура считается низкой, однако процесс уже запускается. При 500 °C образуется два нанометра графита, а это примерно восемь слоев графена.

«При создании электронной платы нужно нанести проводящую разводку к тем или иным компонентам. Мы можем нанести тонкий слой металла (несколько нанометров) так, как нам нужно, нагреть (до 700–800 °C), и получится очень тонкий электропроводящий графеновый слой. На алмазной подложке без дополнительных слоев переходных слоев можно получить готовый электронный элемент, в котором будет совмещено всё: изоляционная подложка, полупроводниковый слой и проводящие дорожки. Метод достаточно прост и не требует сложных манипуляций и дорогостоящего оборудования — только нанесение металла и отжиг. При этом проводимость в графитизированном слое будет такой же, как и в графене, а ее характер будет двумерным», — отметила Ольга Седельникова.

Нанесение металла — это не единственный способ локально трансформировать поверхность алмаза в графит. Оказалось, если воздействовать на подложку импульсным ультрафиолетовым лазером, будет происходить схожий процесс. При попадании лазерного луча на поверхность алмазной пленки энергия света мгновенно преобразуется в тепло, которое сильно разогревает тонкий верхний слой. Из-за быстрого разогрева этот слой моменталь-

но превращается в пар (происходит абляция), остаются небольшие углубления, так называемые абляционные кратеры. Одновременно графитизируются верхние слои толщиной около 400 нм. При этом можно нарисовать желаемую разводку (топологию интегральной платы) с высоким разрешением за минуты, в то время как отжиг занимает полчаса или час. На практике именно трансформация лазерным излучением больше подходит для масштабирования.

Ученые прошли лазером вдоль алмазной пленки и сформировали решетки с периодом 200–400 микрон. Уникальность этих структур заключается в том, что они полностью состоят из атомов углерода. Такие решетки действуют как специальные фильтры для сверхбыстрого светового излучения, способного менять частоту и направление волны. Их работа зависит от структуры графита на поверхности и формы самого покрытия.

«Еще до нас было много работ, когда графен помещали на алмаз, и получался быстрый транзистор. Вероятно, можно будет получить что-то подобное при конверсии алмаза в графен, что удешевит процесс. Изготовленная нами решетка также интересна для терагерцовой оптики, поскольку алмаз обладает низким собственным поглощением в этом частотном диапазоне. В ближайшем будущем именно на поликристаллах начнут происходить практические внедрения, поскольку они намного дешевле, а свойства близки к монокристаллам», — подытожила исследовательница.

Ирина Баранова
Изображения предоставлены
исследовательницей