

## ВЛИЯНИЕ ОРИЕНТАЦИИ АЛМАЗА НА ЛОКАЛЬНУЮ ПРОВОДИМОСТЬ ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННОГО ГРАФИТИЗИРОВАННОГО ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ

М. С. Комленок<sup>1</sup>, М. А. Дежкина<sup>1</sup>, Е. В. Заведеев<sup>1</sup>,  
А. А. Хомич<sup>2</sup>, А. С. Орехов<sup>3</sup>, А. С. Орехов<sup>4</sup>, В. И. Конов<sup>1</sup>

*С помощью эксимерного КтF-лазера на поверхности поликристаллического алмаза созданы графитизированные структуры. Установлено, что слой, образованный на кристаллите с ориентацией {001}, обладает меньшим сопротивлением и толщиной, чем на поверхности {111}. Предложена модель образования ориентированного нанокристаллического графита для объяснения наблюдаемых эффектов.*

**Ключевые слова:** алмаз, графитизация, лазер, ориентация кристаллитов, проводимость.

*Введение.* Развитие технологий синтеза поликристаллического алмаза, позволяющих получать толстые образцы высокого качества с диаметром до 100 мм, открывает новые возможности для создания на его основе различных устройств. Одним из эффективных инструментов создания углеродных элементов фотоники и электроники является лазерное излучение [1], в результате локального воздействия которого на поверхности или в объёме алмаза (в зависимости от условий облучения) образуется графитизированный материал. Полученные таким методом структуры сочетают противоположные оптические и электрические свойства алмаза и графита и уже успешно применяются, например, для создания детекторов ионизирующих частиц [2] и фотонных элементов [3]. Недавно было продемонстрировано влияние ориентации кристаллитов алмаза на оптические свойства планарных алмаз/графитовых метаматериалов [4,

<sup>1</sup> ИОФ РАН, 119991 Россия, Москва, ул. Вавилова, 38.

<sup>2</sup> Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, 141190 Россия, Фрязино, Московская обл., пл. ак. Б. А. Введенского, 1; e-mail: m.a.dezhkina@gmail.com.

<sup>3</sup> НИЦ “Курчатовский институт”, 123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, 1.

<sup>4</sup> ФНИЦ “Кристаллография и фотоника” РАН, 119333, г. Москва, Ленинский пр., 59.

5]. Целью же данной работы является установление взаимосвязи между ориентацией кристаллитов алмаза и электрическими свойствами лазерно-индуцированного слоя на их поверхности.

Стандартный способ анализа электрических свойств заключается в измерении сопротивления проводящих линий или площадок двух- или четырёхзондовыми методами, соответственно [6]. Для выявления зависимости электрических свойств от ориентации алмаза потребуется несколько образцов монокристалла с отполированными гранями. Затем на каждой поверхности необходимо создать площадки размером несколько миллиметров или линии для измерения сопротивления. Однако грань с ориентацией  $\{111\}$  плохо поддаётся полировке [7], к тому же монокристаллы алмаза необходимых размеров достаточно дороги. Вместе с этим возникает проблема соблюдения одинаковых условий облучения различных образцов. Поэтому в работе был разработан другой подход, состоящий в регистрации сопротивления растекания на лазерно-модифицированном участке поверхности поликристаллического образца при помощи сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ). Выбор поликристаллического алмаза, помимо сочетания различных ориентаций кристаллитов, обеспечивает одинаковые условия облучения при использовании лазерного пятна с равномерным распределением энергии излучения и большего по сравнению с отдельным кристаллитом размера. Данная методика хоть и не позволяет получить абсолютные значения сопротивлений образующегося на различных кристаллитах материала, но даёт возможность сравнить их относительное изменение.

*Экспериментальная часть.* На поверхности полированного поликристаллического алмаза, полученного методом газофазного осаждения, была создана графитизированная проводящая линия шириной 15 мкм с площадкой на одном из ее концов посредством воздействия эксимерного лазера KrF (Optosystems Ltd., CL 7100,  $\tau = 20$  нс,  $\lambda = 248$  нм) с плотностью энергии 21 Дж/см<sup>2</sup> в импульсе и 4 импульсами на точку. С помощью метода дифракции обратнорассеянных электронов на растровом электронном микроскопе (FEI Versa FEG) при ускоряющем напряжении 20 кВ и токе пучка 4 нА была составлена карта ориентаций кристаллитов алмаза. Измерение локальной проводимости области, модифицированной лазером, проводилось с помощью СЗМ (INTEGRA Spectra, NT-MDT Co.) в режиме отображения сопротивления растекания [8]. Метод основан на измерении тока между сканирующей поверхностью проводящим кремниевым кантилевером, покрытым PtIr сплавом, и заземляющим электродом, приложенным к площадке (напряжение составляло +2.5 В, рис. 1(а)). Для определения относительного изменения локальной толщины модифицированного слоя использовался неразрушающий ме-

тод спектроскопии комбинационного рассеяния (КР) назад, успешно примененный и подробно описанный в работе [5]. Суть метода заключается в регистрации изменений интенсивности алмазной линии ( $1332\text{ см}^{-1}$ ) за счет прохождения возбуждающего лазерного луча и сигнала КР сквозь поглощающий слой графитизированного материала различной толщины. Измерения проводились на спектрометре LabRAM HR800 Horiba ( $\lambda = 473\text{ нм}$ , диаметр пятна  $\sim 1\text{ мкм}$ ) в режиме картирования поверхности с шагом  $500\text{ нм}$  по горизонтали и  $1\text{ мкм}$  по вертикали.

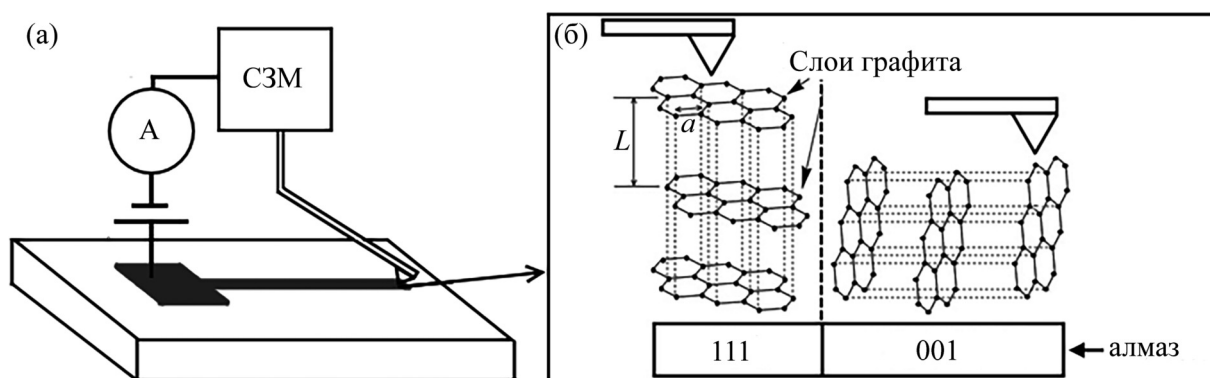


Рис. 1: (а) схема измерений проводимости на СЗМ; (б) увеличенная область контакта кантилевер/поверхность и предлагаемая модель образования графитизированного слоя на кристаллитах алмаза различной ориентации ( $a = 0.142\text{ нм}$ ,  $L = 0.335\text{ нм}$ ).

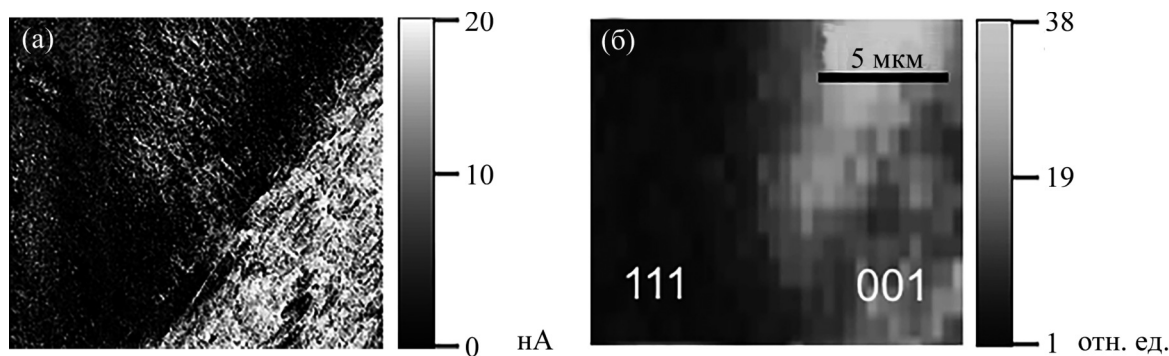


Рис. 2: (а) распределение тока на поверхности графитизированного слоя. Результат анализа методом сопротивления растекания на СЗМ; (б) интенсивность алмазной линии спектров КР на различных кристаллитах той же области, что и на рис. (а).

*Результаты и обсуждение.* Для исследования влияния ориентации алмаза на проводимость лазерно-модифицированного слоя был выбран участок поверхности, содержащий кристаллиты с ориентацией  $\{111\}$  и  $\{001\}$ . На рис. 2(а) представлена карта

распределения тока, на которой светлые области обладают большим током проводимости, и, таким образом, четко видны зоны с большей и меньшей проводимостью. На рис. 2(б) приведена карта интенсивности линии КР алмаза для того же участка. Темные зоны на ней соответствуют меньшей интенсивности и наоборот, что указывает на большую и меньшую толщину графитизированного слоя, соответственно.

Из анализа изображений следует, что графитизированный слой на поверхности кристаллита с ориентацией  $\{001\}$  обладает большей проводимостью и меньшей толщиной по сравнению со слоем, образованным на поверхности кристаллита  $\{111\}$ . Необходимо отметить, что измерения сопротивления зондом проводились на большом расстоянии ( $\sim 5$  мм) от заземляющего электрода, и сопротивление графитизированной линии значительно меньше величины, измеряемой СЗМ. Поэтому значения тока на карте обусловлены локальным сопротивлением образованного слоя. Наблюдаемые зависимости могут быть объяснены ростом графитизированных структур, ориентированных вдоль определённых направлений относительно различных ориентаций кристаллитов алмазной подложки. И в силу того, что графит обладает анизотропией электрических свойств (в направлении, перпендикулярном слоям графита, проводимость в сто раз меньше, чем вдоль них [9]), ориентация алмазных кристаллитов влияет на проводимость образующегося на них графитизированного слоя. На рис. 1(б) схематически изображено предлагаемое объяснение наблюдаемых эффектов. Так, в случае графитизации поверхности кристаллитов с ориентацией  $\{001\}$  происходит образование структур в таком направлении по отношению к кантилеверу СЗМ, что зонд движется поперек графитизированных слоев, в которых наблюдается наименьшее сопротивление. Радиус закругления используемого кантилевера составлял  $\sim 30$  нм, поэтому в контактной зоне кантилевер/поверхность находятся около сотни слоев, по которым ток идет в глубь графитизированной области. И, наоборот, на кристаллите алмаза  $\{111\}$  слои располагаются параллельно плоскости сканирования, и кантилевер контактирует с одним поверхностным слоем, а электрическое сопротивление между слоями обладает максимальным значением. Так как в графите расстояние между соседними атомами углерода в плоскости ( $a = 0.142$  нм) значительно меньше расстояния между плоскостями ( $L = 0.335$  нм), то на кристаллите алмаза  $\{111\}$  образуется не только менее проводящий, но и более толстый слой графитизированного материала. Следует отметить, что предложенная модель графитизации обладает несколько идеализированным характером, так как после лазерного воздействия образуются не высокоориентированный графит, а нанокристаллический с характерным размером  $\sim 3.8$  нм [3]. Однако, по всей видимости,

образованные графитовые нанокристаллиты одинаково ориентированы, что и приводит к анизотропии свойств всего лазерно-модифицированного слоя.

*Заключение.* В результате проведённого исследования было установлено, что графитизированный слой на поверхности кристаллита алмаза с ориентацией  $\{001\}$  обладает большей проводимостью и меньшей толщиной по сравнению со слоем, образованным на поверхности  $\{111\}$ . Для объяснения наблюдаемых эффектов предложена модель образования нанокристаллического графита, ориентированного преимущественно вдоль определённого направления, зависящего от исходной ориентации алмаза, на поверхности которого происходила лазерно-индуцированная графитизация.

Работа выполнена при поддержке РФФИ № 16-32-60179 мол\_а\_дк и Министерства науки и высшего образования в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФНИЦ “Кристаллография и фотоника” РАН в части анализа ориентации кристаллов.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] В. И. Конов, Квантовая электроника **45**(11), 1043 (2015).
- [2] M. Pacilli et al., Nucl. Inst. Methods Phys. Res. A **738**, 119 (2014).
- [3] M. S. Komlenok et al., Laser Phys. Lett. **15**(3), 036201 (2018).
- [4] M. S. Komlenok et al., Appl. Phys. Lett. **113**(4), 041101 (2018).
- [5] M. S. Komlenok et al., J. Phys. Conf. Ser. **1092**, 012061 (2018).
- [6] М. С. Комленок и др., Краткие сообщения по физике ФИАН **44**(8), 47 (2017).
- [7] S. E. Grillo, J. E. Field, F. M. Van Bouwelen, J. Phys. D. Appl. Phys. **33**(8), 985 (2000).
- [8] P. De Wolf, J. Vac. Sci. Technol. B Microelectron. Nanom. Struct. **14**(1), 380 (1996).
- [9] P. R. Wallace, Phys. Rev. **71**(9), 622 (1947).

Поступила в редакцию 15 ноября 2018 г.

После доработки 15 ноября 2018 г.

Принята к публикации 4 декабря 2018 г.