

Известия Алтайского государственного университета. 2025. № 4 (144). С. 25–32.
Izvestiya of Altai State University. 2025. No 4 (144). P. 25–32.

Научная статья

УДК 539.234

DOI: 10.14258/izvasu(2025)4-03

Кластерная структура углеродных алмазоподобных пленок

Владимир Александрович Плотников¹, Сергей Викторович Макаров²,
Евгения Владимировна Кустова³, Ольга Сергеевна Мельникова⁴

¹Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия,
plotnikov@phys.asu.ru

²Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия,
makarov@phys.asu.ru

³Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия,
kustovae13@gmail.com

⁴Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия,
olya.melnikova.99@yandex.ru

Original article

Cluster Structure of Diamond-Like Carbon Films

Vladimir A. Plotnikov¹, Sergey V. Makarov², Evgenia V. Kustova³,
Olga S. Melnikova⁴

¹Altai State University, Barnaul, Russia, plotnikov@phys.asu.ru

²Altai State University, Barnaul, Russia, makarov@phys.asu.ru

³Altai State University, Barnaul, Russia, kustovae13@gmail.com

⁴Altai State University, Barnaul, Russia, olya.melnikova.99@yandex.ru

Аннотация. Методами просвечивающей электронной микроскопии и спектрами комбинационного рассеяния света (Раман-спектроскопии) проведено исследование структуры углеродных алмазоподобных тонких пленок. Углеродные пленки были сформированы путем конденсации на подложке углерода из парогазовой фазы, полученной испарением графитовой мишени расфокусированным лазерным излучением с длиной волны 1064 нм. Данные электронной микроскопии свидетельствуют об однородности распределения кластеров, а межплоскостные расстояния, рассчитанные по рефлексам (111) и (220), свидетельствуют о кристаллической структуре кластеров как алмазной, но сильно искаженной. Электронные рефлексы от графитоподобных кластеров не обнаружены.

Напротив, спектры комбинационного рассеяния света (спектры КРС) свидетельствуют о наличии кластеров графита, но не фиксируют алмазоподобные кластеры. Графитовые кластеры идентифицированы с помощью характерных G- и D-линий (полос). G-полоса связана с идеальной решеткой графитового кластера, в то время как D-полоса связана с искаженной и разупорядоченной кристаллической

Abstract. The paper studies the structure of thin diamond-like carbon films using transmission electron microscopy and Raman spectroscopy. Carbon films are condensed on carbon substrates from vapors produced by evaporation of a graphite target with a defocused 1064 nm laser beam. The electron microscopy data indicates the uniformity of the cluster distribution. The interplane distances calculated from the reflections (111) and (220) reveal the crystal structures of the clusters to be diamond-like but strongly distorted. There are no electron reflections detected from graphite-like clusters.

On the contrary, Raman spectra indicate the presence of graphite clusters, but not the diamond-like clusters. Graphite clusters are identified using characteristic G- and D-lines (bands). The G-band is associated with the ideal lattice of a graphite cluster, while the D-band is associated with the distorted and disordered crystal lattice of a graphite-like cluster. The absence of a diamond line is due to the small size of the clusters, which leads to the appearance of phonon modes with wave vectors q in the range $0 < q < 1/L$ (L is the size of the diamond-like cluster). Thus, the zero phonon energy is redistributed between

решеткой графитоподобного кластера. Отсутствие алмазной линии обусловлено малым размером кластеров, что приводит к появлению фононных мод с волновыми векторами \mathbf{q} в диапазоне $0 < |\mathbf{q}| < 1/L$ (L — размер алмазоподобного кластера). Таким образом, энергия нулевого фона перераспределяется между фононными модами, т.е. уширенная алмазная линия скрыта в низкочастотном «хвосте» D-полосы.

Ключевые слова: углеродные алмазоподобные кластеры, графитоподобные кластеры, дифракция электронов, спектры комбинационного рассеяния света

Для цитирования: Плотников В.А., Макаров С.В., Кустова Е.В., Мельникова О.С. Кластерная структура углеродных алмазоподобных пленок // Известия Алтайского государственного университета. 2025. № 4 (144). С. 25–32. DOI: 10.14258/izvasu(2025)4-03.

Введение

Свойства углеродных пленок определяются, в частности, большим разнообразием структур, имеющих не только кристаллическое, но и аморфное состояние. Разнообразие структур и уникальные свойства тонких пленок можно объяснить особенностями межатомных связей атомов углерода [1, 2, 3]. Наиболее распространенные химические связи в аморфных и кристаллических углеродных пленках — sp^3 - и sp^2 -связи, являющиеся результатом гибридизации электронных орбиталей. При sp^3 -гибридизации атомы углерода имеют четыре sp^3 -орбитали, что позволяет образовать четыре прочные связи с соседними атомами и сформировать кубическую структуру алмаза. При sp^2 -гибридизации атомы углерода имеют три sp^2 -орбитали, позволяющие образовывать три ковалентные связи с соседними атомами углерода и формировать гексагональную кристаллическую структуру графеновой плоскости. Четвертый π -электрон образует слабую π -связь, за счет которой графеновые плоскости объединяются в кристалл графита [1]. В некоторых углеродных пленках доля sp^3 -связей может достигать 80 % и более [1, 2, 3]. Такие пленки состоят из тетраэдрического аморфного углерода, в котором доминируют алмазные sp^3 -связи [1, 2, 4, 5].

Для описания структуры аморфных пленок предложена кластерная модель [1, 6]. Однако суть модели заключается в том, что только атомы углерода, связанные sp^2 -связями, организованы в гексагональные графеновые пластины размером до 16 нм, которые связаны π -связями в стопки — кластеры графита. Алмазные кластеры отсутствуют, а sp^3 -гибридизированные атомы углерода представляют собой аморфную матрицу, в которую погружены графитовые кластеры. Кластеры sp^2 контролируют электрические свойства, матрица sp^3 контролирует механические свойства. Из этой модели вытекает неоднородность структуры пленки — чередование областей с sp^2 - и sp^3 -связями.

the phonon modes, i.e., the broadened diamond line is hidden in the low-frequency "tail" of the D-band.

Keywords: carbon diamond-like clusters, graphite-like clusters, electron diffraction, Raman spectra

For citation: Plotnikov V.A., Makarov S.V., Kustova E.V., Melnikova O.S. Cluster Structure of Diamond-Like Carbon Films. *Izvestiya of Altai State University*. 2025. No 4 (144). P. 25–32. (In Russ.). DOI: 10.14258/izvasu(2025)4-03.

Таким образом, в аморфных и нанокристаллических углеродных пленках могут существовать области с координационными числами 3 (sp^2 -связь) и 4 (sp^3 -связь), образующие смесь структур с двумя типами связей [1]. Фактически области с координационными числами 3 или 4 это sp^2 - и sp^3 -кластеры. Первоначально считалось, что высокая твердость определяется прежде всего алмазной sp^3 -связью, но недавние исследования показали, что sp^2 -связи также формируют углеродные пленки высокой твердости. Иными словами, существование в углеродной пленке той или иной связи не свидетельствует о превалировании свойств, характерных для алмаза или графита, при условии, что кластеры sp^2 и sp^3 имеют размеры в нанометровом диапазоне [7, 8].

Аморфное состояние в материалах с ковалентными связями принципиально отличается от аморфного состояния в металлах. Аморфные металлы имеют жидкоподобную структуру, в которой ближайшее окружение атома подчиняется принципу плотнейшей упаковки, соседи расположены на расстоянии атомного диаметра, а координационное число близко к 12. В ковалентных кристаллах расстояние до ближайших соседей определяется длиной ковалентной связи, а число ближайших атомов — валентностью элемента. В алмазе ближайшие атомы расположены на расстоянии 0,154 нм, число ближайших соседей равно 4, в графите атомы располагаются на расстоянии 0,142 нм, число ближайших соседей 3.

Из сказанного можно заключить, что кластерная модель углеродных пленок даже при концентрации атомов с sp^3 -связями фактически 90 % представлена лишь кластерами графита. В этой связи возникают вопросы к структурной организации sp^3 -гибридизированных атомов углерода. В данной работе проведено исследование структуры тонкой углеродной пленки, полученной методом лазерного испарения углеродных мишеней в вакууме.

1. 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 NTS300 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. Известно, что лазерное испарение дает преимущественно sp^3 -связи в конденсированном углероде.

Расфокусированный лазерный пучок вводился в вакуумную камеру вакуумной установки (остаточное давление не хуже 10^{-5} торр), где располагались графитовые мишени и подложки из силикатного стекла. На графитовой мишени диаметром 5 мм и толщиной около 2 мм расфокусированный лазерный пучок, энергию которого меняли в интервале 2,0–6,0 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 парогазового факела, формируя углеродную пленку.

Структура углеродных алмазоподобных пленок была изучена с помощью высокоразрешающей про-

свечивающей электронной микроскопии (с помощью просвечивающего электронного микроскопа *Philips CM-30*) в Материаловедческом центре коллективного доступа при Томском государственном университете. Спектры комбинационного рассеяния света (КРС) при комнатной температуре получены в Институте геологии и минералогии СО РАН. Использовался конфокальный Рамановский спектрометр *LabRAM HR*, в котором возбуждение в пятне диаметром около 5 микрон производилось излучением Не-Cd лазера с длиной волны 325 нм.

2. Результаты исследования

Типичная структура алмазоподобной пленки, полученная методом просвечивающей электронной микроскопии, и электронограмма от этого же участка приведены на рисунке 1. Видно, что пленка в нанометровом масштабе имеет неоднородную зернистую структуру. Размер зерен находится в диапазоне около 1 нм. Исследование темнопольного изображения показало, что контраст, возникающий на светлопольном изображении, полностью подобен контрасту темнопольного изображения. Это свидетельствует о высокой однородности пленки в макроскопическом масштабе и наличии преимущественно одной структурной составляющей. Каждая локальная область пленки дает одинаковый вклад в интенсивность дифракционных колец.

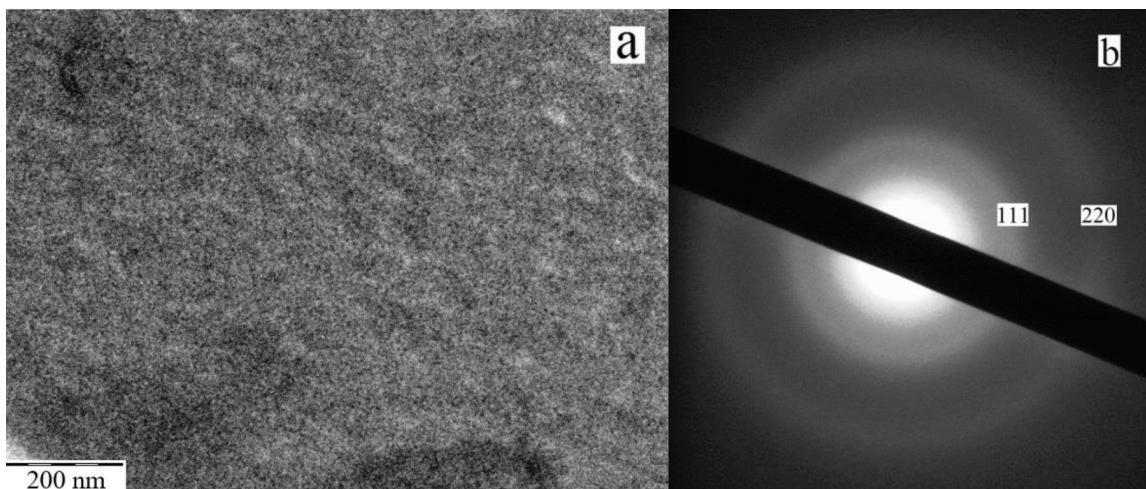


Рис. 1. Светлопольное электрономикроскопическое изображение участка пленки (а), электронограмма от этого участка (б)

Расшифровка электронограмм показала, что кольца (дифракционные максимумы) соответствуют дифракции от плоскостей (111) и (220) решетки алмаза. Межплоскостные расстояния имеют значения $d_{111}=0,207$ нм, $d_{220}=0,119$ нм. Видно, что эти значения отличаются от табличных значений для монокристалла алмаза ($d_{111}=0,205$ нм и $d_{220}=0,125$ нм). В случае

пленки межплоскостное расстояние d_{111} оказывается больше, а d_{220} — меньше по сравнению со значениями для монокристалла. Такое искажение решетки является характерным для алмазоподобных тонких пленок. Например, в работе [9] исследованы кристаллографические параметры тонких углеродных пленок, полученных лазерным методом, значения межплос-

костных расстояний в углеродном конденсате равны $d_{111}=0,208$ нм, $d_{220}=0,117$ нм, а согласно [10], значение $d_{111}=0,207$ нм. Можно предположить, что межатомные расстояния не изменяются и длина связи C-C остается постоянной, но изменяются углы между связями, как это имеет место в углеродных нанотрубках и фуллеренах [11, 12]. Это приводит к искажению решетки, уменьшению одних межплоскостных расстояний и увеличению других.

Важной особенностью электронограмм является сильное уширение колец. Если размер кристаллов алмаза составляет 4–7 нм, то наблюдаются хотя и уширенные, но достаточно четкие рефлексы [13, 14]. В этой связи можно предположить, что в исследуемых пленках размер областей, формирующих дифракционное кольцо, значительно меньше, около 1 нм. Такие же размытия колец на электронограмме от пленки с алмазоподобной структурой описаны в работе [3],

что обусловлено содержанием около 80 % sp^3 -связей. Именно такую структуру считают аморфной, т.е. соответствующей так называемому ta-C (tetrahedral amorphous carbon) аморфному алмазу [15, 16, 17]. Таким образом, аморфный углерод может рассматриваться как смесь sp^2 - и sp^3 -связей [16].

Электронная микроскопия и дифракция электронов позволяет нам однозначно трактовать структурное состояние углеродной пленки как совокупность алмазоподобных кластеров. Но сильно размытые рефлексы свидетельствуют о крайне малых размерах алмазных кластеров и сильном искажении межатомных расстояний. Рефлексов же от гексагональной кристаллической решетки графита не обнаружено. Возникает вопрос: есть ли в структуре пленки углерод с sp^2 -связями, организованный в графитоподобные кластеры. Ответ дают спектры комбинационного рассеяния (спектры КРС или Раман-спектры).

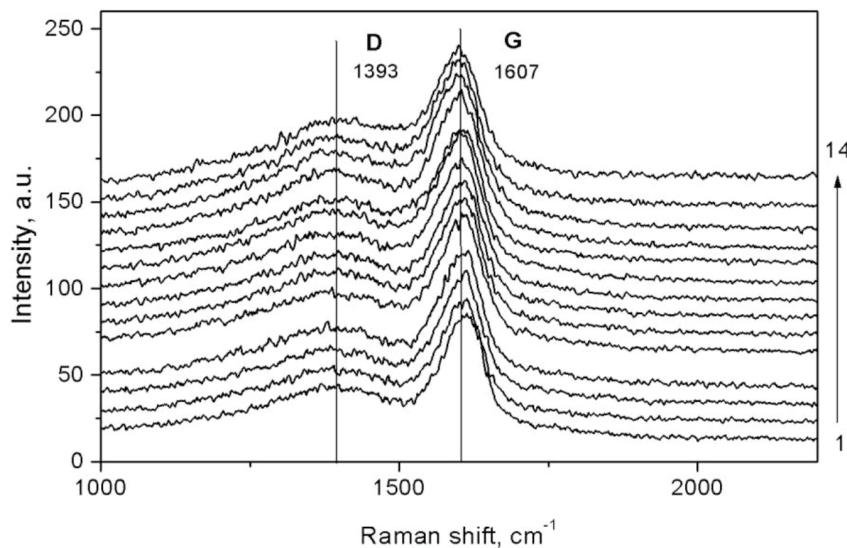


Рис. 2. Спектры КРС, полученные при возбуждении лазерным излучением с длиной волны 325 нм в 14 точках вдоль алмазоподобной тонкой пленки

Спектры КРС приведены на рисунке 2. Согласно сложившимся представлениям, линия КРС около 1585 cm^{-1} относится к оптической моде растяжения симметрии E_{2g} (G-моде), характерной для хорошо упорядоченного бездефектного кристаллического графита, которая в данном случае смещена к 1600 cm^{-1} из-за нанокристалличности и разупорядочения графитовых кластеров [18]. Для природного кристаллического графита ширина полосы на уровне полувысоты составляет около 13 cm^{-1} . Уширение до значений 60 – 80 cm^{-1} объясняется обычно присутствием стекловидного графита. Линия около 1355 cm^{-1} (D-мода, disorder peak), впервые описанная в статье Tuinstra & Koenig [19], отнесена к «дыхательной» моде симметрии A_{1g} с фоном около границы k-зоны. Эта мода отсутствует в совершенном (идеальном) графите и появляется лишь

при его разупорядочении. Положение линии варьируется в диапазоне 1310 – 1450 cm^{-1} , диапазон ширин составляет 80 – 400 cm^{-1} . Возможная природа связана с разупорядочением или нанокристалличностью графита, разупорядочением в стеклообразном углероде, sp^2 -гибритизованными углеродными фазами, дефектностью микрокристаллического графита [20]. Интенсивность пика D меняется в зависимости от количества ароматических колец в графитоподобных кластерах. Смещение пика G в высокоэнергетическую сторону и увеличение интенсивности D-пика указывают на увеличение sp^2 π - π^* связывания и, наоборот, уменьшение алмазоподобных sp^3 -связей [16].

Как следует из приведенных данных, спектр КРС свидетельствует о равномерном распределении углеродных неискаженных (линия G) и искаженных

(линия D) sp^2 -связей по поверхности алмазоподобной пленки. Так как уширенная полоса D в алмазоподобных ta-C (тетраэдрический аморфный углерод) пленках характеризует наличие sp^3 - и sp^2 -кластеров, то ширина D полосы зависит и от доли алмазных связей в углеродной пленке [16].

3. Обсуждение

Согласно данным электронной микроскопии, характерной особенностью структуры тонких углеродных пленок является отсутствие четко выраженных границ между зернами, что свидетельствует в пользу аморфного состояния. Однако электронограммы однозначно свидетельствуют о присутствии кристаллической решетки алмаза, хотя и имеющей измененные межплоскостные расстояния. Рефлексы графита на электронограммах отсутствуют.

Напротив, анализ спектра КРС свидетельствует о наличии как линии G от бесдефектного кристаллического графита, так и линии D, соответствующей разупорядоченному дефектному графиту. Казалось бы, результаты двух методов исследования структурного состояния алмазоподобных пленок противоречат друг другу. Однако противоречивая ситуация разрешима. Известно, что высокая симметрия решетки алмаза определяет 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 $1332,5 \pm 0,5 \text{ см}^{-1}$ [21]. При переходе же к нанокристаллическому алмазу ширина данного пика увеличивается, а в тетрагональных и аморфных пленках этот пик не проявляется совсем [22].

Действительно, для нанокристаллов детонационного алмаза в спектре КРС на рисунке 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 [18] и размеров зерен графита. Отсутствие алмазной линии в спектрах КРС совсем не означает, что алмазные кластеры отсутствуют. Действительно, согласно модели удержания фононов (effect of confinement on phonon modes [23, 24, 25]) в нанокристаллах алмаза становится заметным вклад в фоновый спектр фононов с волновыми векторами $0 < q < 1/L$. Иными словами, в алмазоподобных кластерах по аналогии с нанокристаллами алмаза фоновый спектр существенно трансформирован из-за появления системы фононных мод с волновыми векторами в диапазоне $0 < q < 1/L$ (L — размер кластера), в результате чего энергия фона с $q=0$ перераспределилась между фононными модами. Таким образом, алмазная линия около 1322 см^{-1} размыта и скрыта в «хвосте» D-полосы.

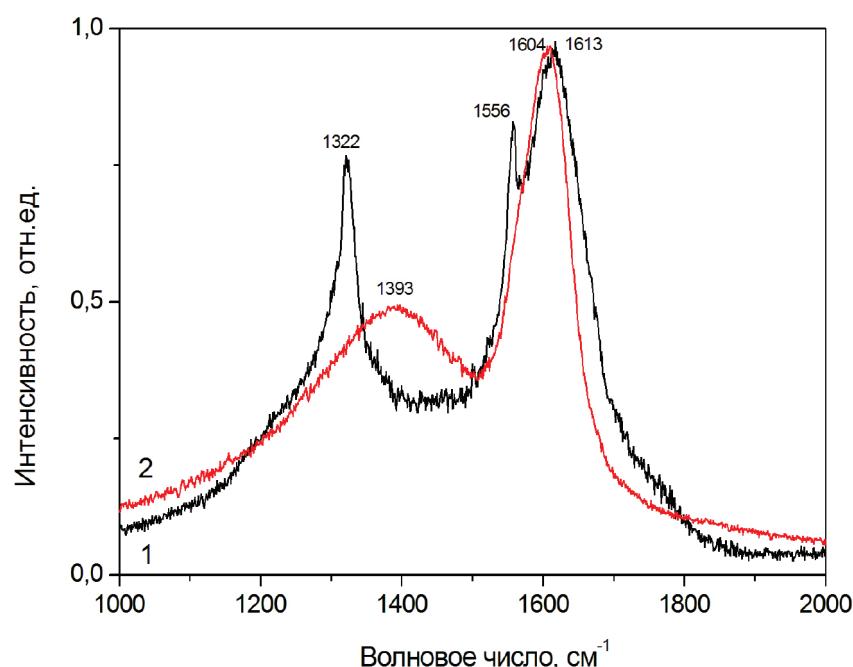


Рис. 3. Спектр КРС для детонационного наноалмаза (1) и алмазоподобной пленки (2)

Полученные результаты могут быть объяснены с позиций несколько трансформированной кластерной модели [1, 6]. Кластерное состояние оказывает

существенное влияние на вид электронограмм углеродных алмазоподобных пленок. Электронограммы (электронные рефлексы) от мелкозернистого поли-

кристалла имеют вид сплошных колец, ширина которых увеличивается при уменьшении размера зерен. Рефлексы сохраняются до тех пор, пока в кристаллах присутствует решетка. При некотором размере кристаллы переходят в кластеры. Кластеры же представляют собой группы атомов, связанных межатомным взаимодействием, в которых кристаллическая решетка необязательно сформирована. Отсутствие рефлексов от графитоподобных кластеров позволяет считать, что графеновые пластиинки, состоящие из гексагональных колец, разориентированы друг относительно друга и не образуют кристалл графита либо их концентрация мала.

Таким образом, структурное состояние пленки следующее: в основном структура пленки представляет собой алмазоподобные кластеры и небольшое число графитоподобных кластеров, объединенные в целостную однородную структуру как sp^3 -, так и sp^2 -связями. Такой подход является альтернативным подходу, согласно которому в углеродных пленках присутствуют только графитоподобные кластеры,

погруженные в матрицу из атомов углерода, связанных sp^3 -связями [1, 6].

Заключение

Проведенные исследования — электронная микроскопия углеродных тонких пленок — однозначно, а рамановская спектроскопия косвенно свидетельствуют о наличии алмазоподобных sp^3 -кластеров, а аномально уширенные рефлексы свидетельствуют также о больших искажениях межплоскостных расстояний $d(111)$ и $d(220)$ в алмазоподобных кластерах. В то же время согласно Раман-спектроскопии следует вывод о наличии sp^2 -кластеров в структуре углеродной пленки, однако отсутствие электронных рефлексов графитоподобной фазы может быть связано с ее низкой концентрацией. Связь между алмазоподобными и графитоподобными кластерами выполняют как sp^3 -связи, так и sp^2 -связи. Такая структура однородна, и однородность обусловлена отсутствием границ раздела между sp^3 - и sp^2 -кластерами.

Библиографический список

1. Robertson J., O'Reilly E.P. Electronic and Atomic Structure of Amorphous Carbon // Physical Review B. 1987. Vol. 35. No 6. P. 2946–2957.
2. Gilkes K.W.R., Gaskell P.H., Robertson J. Comparison of Neutronsattering Data for Tetrahedral Amorphous-Carbon with Structural Models // Physical Review B. 1995. Vol. 51. No 18. P. 12303–12312.
3. Inkin V.N., Kirpilenko G.G., Dementjev A.A. et al. A Superhard Diamond-Like Carbon Film // Diamond and Related Materials. 2000 Vol. 9. P. 715–721.
4. Xu S., Tay B. K., Tan H. S. et al. Properties of Carbon Ion Deposited Tetrahedral Amorphous Carbon Films as a Function of Ion Energy // Journal of Applied Physics. 1996. Vol. 79. No 9. P. 7234–7240.
5. Tay B.K., Sheeja D., Lau S.P. et al. Time and Temperature-Dependent Changes in the Structural Properties of Tetrahedral Amorphous Carbon Films // Surface and Coatings Technology. 2000. Vol. 130. P. 248–251.
6. Robertson J. Diamond-Like Amorphous Carbon // Materials Science and Engineering: R: Reports. 2002. Vol. 37. P. 129–281.
7. Tay B.K., Shi X., Liu E.J. et al. Effects of Substrate Temperature on the Properties of Tetrahedral Amorphous Carbon Films // Thin Solid Films. 1999. Vol. 346. No 1-2. P. 155–161.
8. Jayatissa A.H., Sato F., Saito N. et al. Structural Properties of Carbon Films Deposited by Pulsed ArF Laser Ablation: Effects of Substrate Temperature, Bias and H₂ Pressure // Materials Science and Engineering: B. 1998. Vol. 55. No 1–2. P. 143–152.
9. Pappas D.L., Saenger K.L., Bruley J. et al. Pulsed Laser Deposition of Diamond-Like Carbon Films // Journal of Applied Physics. 1992. Vol. 71. No 11. P. 5675–5684.
10. Петров С.А. О механизме зарождения вюрцитной фазы графита в пленках, осажденных в вакууме из лазерно-эрзационной плазмы // Вестник Брянского государственного университета. 2012. Сер. 1. № 1. С. 43–45.
11. Плотников В.А., Демьянов Б.Ф., Соломатин К.В. и др. Атомная структура углеродных нанопленок, полученных конденсацией из паровой фазы // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2013. Т. 10. № 1. С. 50–55.
12. Старостенков М.Д., Лощина И.В., Демьянов Б.Ф. Исследование углеродныхnanoструктур с использованием потенциала Терцоффа // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2005. Т. 2. № 1. С. 62–67.
13. Hoffman A., Heiman A., Strunk H. P. et al. Microstructure and Phase Composition Evolution of Nano-Crystalline Carbon Films: Dependence on deposition temperature // Journal of Applied Physics. 2002. Vol. 91. No 5. P. 3336–3344.
14. Плотников В.А., Демьянов Б.Ф., Макаров С.В. Влияние синтеза интерметаллических соединений на процессы роста и консолидации нанокристаллов детонационного алмаза // Письма в журнал технической физики. 2009. Т. 35. № 20. С. 10–18.
15. Beghi M.G., Ferrari A.C., Teo K.B.K. et al. Bonding and Mechanical Properties of Ultrathin Diamond-Like Carbon Films // Applied Physics Letters. 2002. Vol. 81. No 20. P. 3804–3806.

16. Dwivedi N., Kumar S., Malik H.K., Superhard Behaviour, Low Residual Stress, and Unique Structure in Diamond-Like Carbon Films by Simple Bilayer Approach // *Journal of Applied Physics*. 2012. Vol. 112. No 2. P. 023518.
17. Lifshitz Y. Diamond-Like Carbon — Present Status // *Diamond and Related Materials*. 1999. Vol. 8. P. 1659–1676.
18. Bhargava S., Bist H. D., Sahli S. et al. Diamond Polytypes in the Chemical Vapor Deposited Diamond Films // *Applied Physics Letters*. 1995. Vol. 67. P. 1706–1709.
19. Tuinstra F., Koenig J.L. Raman Spectrum of Graphite // *Journal of Chemical Physics*. 1970. Vol. 53. P. 1126–1130.
20. Zaitsev A.M. Optical Properties of Diamond, Data Handbook. Springer, Berlin. 2001.
21. Hardy J.R., Smith S.D. Two-Phonon IR Lattice Absorption in Diamond // *Philosophical Magazine*. 1961. No 6. P. 163–172.
22. Ramamurti R., Shanov V., Singh R.N. et al. Raman Spectroscopy Study of the Influence of Processing Conditions on the Structure of Polycrystalline Diamond Films // *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*. 2009. Vol. 24. No 2. P. 179–189.
23. Миков С.Н., Иго А.В., Горелик В.С. Комбинационное рассеяние света на алмазных квантовых точках в матрице бромистого калия // *Физика твердого тела*. 1995. Т. 37. № 10. С. 3033–3038.
24. Magnus Lipp J., Valentín Garsia Baonsa, Wiliam Evans J. et al. Nanocrystalline Diamond: Effect of Confinement, Pressure and Heating on Phonon Modes // *Physical Review B*. 1997. Vol. 56. No 10. P. 5978–5984.
25. Joel Ager III W., Kirk Veirs D., Gerd Rosenblatt M. Spatially Resolved Raman Studies of Diamond Films Grown by Chemical Vapor Deposition // *Physical Review B*. 1991. Vol. 43. No 8. P. 6491–6499.

References

1. Robertson J., O'Reilly E.P. Electronic and Atomic Structure of Amorphous Carbon. *Physical Review B*. 1987. Vol. 35. No 6. P. 2946–2957.
2. Gilkes K.W.R., Gaskell P.H., Robertson J. Comparison of Neutronscattering Data for Tetrahedral Amorphous-Carbon with Structural Models. *Physical Review B*. 1995. Vol. 51. No 18. P. 12303–12312.
3. Inkin V.N., Kirpilenko G.G., Dementjev A.A. et al. A Superhard Diamond-Like Carbon Film. *Diamond and Related Materials*. 2000 Vol. 9. P. 715–721.
4. Xu S., Tay B. K., Tan H. S. et al. Properties of Carbon Ion Deposited Tetrahedral Amorphous Carbon Films as a Function of Ion Energy. *Journal of Applied Physics*. 1996. Vol. 79. No 9. P. 7234–7240.
5. Tay B.K., Sheeja D., Lau S.P. et al. Time and Temperature-Dependent Changes in the Structural Properties of Tetrahedral Amorphous Carbon Films. *Surface and Coatings Technology*. 2000. Vol. 130. P. 248–251.
6. Robertson J. Diamond-Like Amorphous Carbon. *Materials Science and Engineering: R: Reports*. 2002. Vol. 37. P. 129–281.
7. Tay B.K., Shi X., Liu E.J. et al. Effects of Substrate Temperature on the Properties of Tetrahedral Amorphous Carbon Films. *Thin Solid Films*. 1999. Vol. 346. No 1–2. P. 155–161.
8. Jayatissa A.H., Sato F., Saito N. et al. Structural Properties of Carbon Films Deposited by Pulsed ArF Laser Ablation: Effects of Substrate Temperature, Bias and H₂ Pressure. *Materials Science and Engineering: B*. 1998. Vol. 55. No 1–2. P. 143–152.
9. Pappas D.L., Saenger K.L., Bruley J. et al. Pulsed Laser Deposition of Diamond-Like Carbon Films. *Journal of Applied Physics*. 1992. Vol. 71. No 11. P. 5675–5684.
10. Petrov S.A. On the Mechanism of Nucleation of the Wurtzite Phase of Graphite in Films Deposited in Vacuum From Laser-Erosive Plasma. *Bulletin of the Bryansk State University*. 2012. Series 1. No 1. P. 43–45. (In Russ.).
11. Plotnikov V.A., Demyanov B.F., Solomatin K.V. et al. Atomic Structure of Carbon Nanofilms Obtained by Condensation from the Vapor Phase. *Fundamental Problems of Modern Materials Science*. 2013. Vol. 10. No 1. P. 50–55. (In Russ.).
12. Starostenkov M.D., Loshchina I.V., Demyanov B.F. Investigation of Carbon Nanostructures Using the Tersoff Potential. *Fundamental Problems of Modern Materials Science*. 2005. Vol. 2. No 1. P. 62–67. (In Russ.).
13. Hoffman A., Heiman A., Strunk H.P. et al. Microstructure and Phase Composition Evolution of Nano-Crystalline Carbon Films: Dependence on Deposition Temperature. *Journal of Applied Physics*. 2002. Vol. 91. No 5. P. 3336–3344.
14. Plotnikov V.A., Demyanov B.F., Makarov S.V. The Effect of Synthesis of Intermetallic Compounds on the Processes of Growth and Consolidation of Detonation Diamond Nanocrystals. *Letters to the Journal of Technical Physics*. 2009. Vol. 35. No 20. P. 10–18. (In Russ.).
15. Beghi M.G., Ferrari A.C., Teo K.B.K. et al. Bonding and Mechanical Properties of Ultrathin Diamond-Like Carbon Films. *Applied Physics Letters*. 2002. Vol. 81. No 20. P. 3804–3806.
16. Dwivedi N., Kumar S., Malik H.K. Superhard Behaviour. Low Residual Stress, and Unique Structure in Diamond-Like Carbon Films by Simple Bilayer Approach. *Journal of Applied Physics*. 2012. Vol. 112. No 2. P. 023518.
17. Lifshitz Y. Diamond-Like Carbon-Present Status. *Diamond and Related Materials*. 1999. Vol. 8. P. 1659–1676.
18. Bhargava S., Bist H. D., Sahli S. et al. Diamond Polytypes in the Chemical Vapor Deposited Diamond Films. *Applied Physics Letters*. 1995. Vol. 67. P. 1706–1709.
19. Tuinstra F., Koenig J.L. Raman Spectrum of Graphite. *Journal of Chemical Physics*. 1970. Vol. 53. P. 1126–1130.
20. Zaitsev A.M. Optical Properties of Diamond, Data Handbook. Berlin: Springer. 2001. 502 p.

21. Hardy J.R., Smith S.D. Two-Phonon IR Lattice Absorption in Diamond. *Philosophical Magazine*. 1961. No 6. P. 163–1172.
22. Ramamurti R., Shanov V., Singh R.N. et al. Raman Spectroscopy Study of the Influence of Processing Conditions on the Structure of Polycrystalline Diamond Films. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*. 2009. Vol. 24. No 2. P. 179–189.
23. Mikov S.N., Igo A.V., Gorelik V.S. Raman Scattering of Light by Diamond Quantum Dots in a Potassium Bromide Matrix. *Solid State Physics*. 1995. Vol. 37. No 10. P. 3033–3038. (In Russ.).
24. Lipp M.J., Baonsa V.G., Evans W.J., Lorenzana H.E. Nanocrystalline Diamond: Effect of Confinement, Pressure and Heating on Phonon Modes. *Physical Review B*. 1997. Vol. 56. No 10. P. 5978–5984.
25. Ager J.W. III, Veirs K.D., Rosenblatt G.M. Spatially Resolved Raman Studies of Diamond Films Grown by Chemical Vapor Deposition. *Physical Review B*. 1991. Vol. 43. No 8. P. 6491–6499.

Информация об авторах

В.А. Плотников, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры общей и экспериментальной физики, Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия;

С.В. Макаров, доктор физико-математических наук, доцент кафедры общей и экспериментальной физики, Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия;

Е.В. Кустова, аспирант Института цифровых технологий, электроники и физики, Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия;

О.С. Мельникова, аспирант Института цифровых технологий, электроники и физики, Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия.

Information about the authors

V.A. Plotnikov, Doctor of Sciences in Physics and Mathematics, Professor, Professor of the Department of General and Experimental Physics, Altai State University, Barnaul, Russia;

S.V. Makarov, Doctor of Sciences in Physics and Mathematics, Associate Professor of the Department of General and Experimental Physics, Altai State University, Barnaul, Russia;

E.V. Kustova, Postgraduate Student of the Institute of Digital Technologies, Electronics and Physics, Altai State University, Barnaul, Russia;

O.S. Melnikova, Postgraduate Student of the Institute of Digital Technologies, Electronics and Physics, Altai State University, Barnaul, Russia.