

05;10;11;12

Физическая модель формирования периодической структуры на поверхности пиролитического графита при высокоэнергетическом ионном облучении

© Д.В. Куликов, А.Л. Суворов, Р.А. Сурис,
Ю.В. Трушин, В.С. Харламов

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург
Институт теоретической и экспериментальной физики, Москва

Поступило в Редакцию 25 марта 1997 г.

Предложена физическая модель образования структуры "микроострий" и "впадин" на поверхности пиролитического графита при облучении ионами Kr^+ с энергией 210 МэВ. Полученная структура может быть объяснена, исходя из распределения по глубине энергии, вводимой облучением.

В работах [1–3] исследовались экспериментальные возможности использования облучения для модификации поверхности различных типов графита для создания эмиссионных катодов с периодической структурой поверхности. Для этого проводилось облучение ионами Ar , La , Vi с энергиями 30–500 кэВ и дозами 10^{16} – 10^{18} cm^{-2} . При этом варьировались как энергия и доза, так и угол падения ионов на поверхность. В результате удалось получить систему из случайным образом расположенных микроострий на поверхности образца, которые, кроме того, существенно различались по высоте и кривизне вершин.

В работе [4] изложены результаты по облучению высокоориентированного пиролитического графита (НОРГ) высокоэнергетическим ионным пучком. При этом удалось получить периодическую структуру "микроострия–впадины" на поверхности материала. В настоящей работе предлагается физическая модель обнаруженного эффекта, основанная на анализе выделения энергии при неупругом взаимодействии падающих ионов и материала.

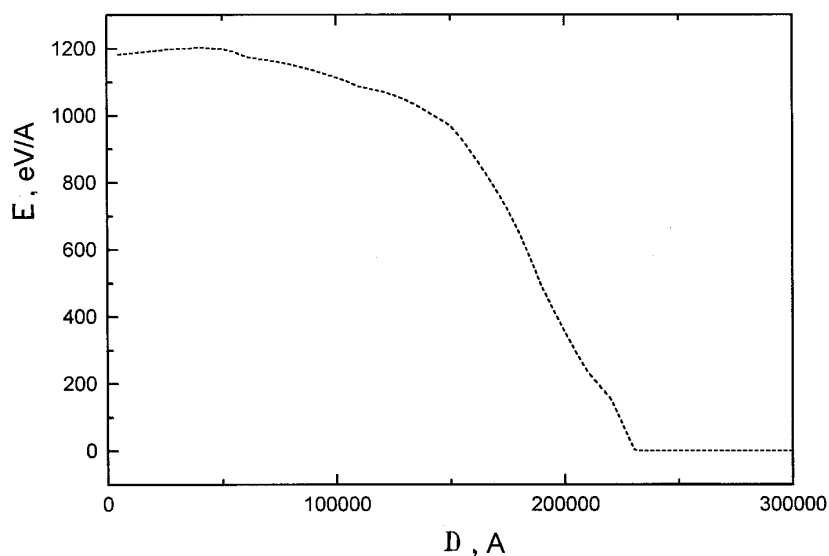


Рис. 1. Зависимость энергии, затраченной на ионизацию, от глубины проникновения иона в материал при облучении пиролитического графита ионом Kr^+ с энергией 210 МэВ.

В [4] образцы пиролитического графита облучались ионами Kr^+ с энергией 210 МэВ дозой $4.3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, при этом плотность потока падающих частиц составляла $\sim 10^{10} \text{ ионов} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ и ионы падали перпендикулярно поверхности образца. Образующаяся на поверхности периодическая структура изучалась с помощью работающего на воздухе сканирующего туннельного микроскопа СТМ/НЛ-20. Средняя высота обнаруженных микроострий составила примерно 60 \AA , а среднее расстояние между ними — около 170 \AA (см. [14]).

Формирование микроострий на поверхности углеродных образцов при облучении ионами можно описать, исходя из распределения по глубине энергии, вводимой облучением. Расчеты, проведенные по программе TRIRS (см. [5,6]), показывают, что при облучении пиролитического графита ионами Kr^+ с энергией 210 МэВ неупругие потери простираются на значительные глубины h порядка сотен тысяч ангстрем (рис. 1). При этом до глубины $h = 50000 \text{ \AA}$ потери практически

постоянны. Выделившаяся в результате энергия тратится на нагрев материала. Используя данные по энергосвободению (см. рис. 1), были рассчитаны распределения температуры в области трека падающего иона по формуле, приведенной в [7]:

$$T(r, t) = \frac{F_D(h)}{4\pi\zeta t} \exp\{-C_V r^2 / (4\zeta t)\} + T_0.$$

Здесь r — расстояние вдоль радиуса трека частицы, t — время, F_D — энергия, затрачиваемая на ионизацию и приходящаяся на единицу длины, h — глубина проникновения иона, ζ — коэффициент теплопроводности, C_V — теплоемкость единицы объема, T_0 — температура облучения.

Расчеты температуры $T(r, t)$ по приведенной формуле выполнены при следующих параметрах для графита: $F_D = 1200$ эВ/Å, $\zeta = 40$ Вт/(м · К), $C_V = 4000$ кДж/(м⁻³ · К) [8], температура плавления 4200 К [9]. Из результатов расчетов температуры $T(r, t)$ для различных моментов времени (см. рис. 2) видно, что в течение времени $6 \cdot 10^{-13}$ с температура в областях диаметром примерно 100 Å превышает температуру плавления. Таким образом может происходить интенсивное переплавление материала вдоль трека облучающей частицы. Затем по прошествии около 10^{-10} с материал быстро остывает.

Известно [10,11], что пиролитический графит имеет как кристаллическую (cr), так и аморфную (a) компоненты, причем кристаллическая занимает существенно большую долю. Переплавление кристаллической фазы под действием энергии, выделяющейся при падении иона, может приводить при быстром (около 10^{-12} с, см. рис. 2) охлаждении к образованию аморфной фазы. Однако плотности (d) этих фаз различны: $d_{cr} = 2.26$ г/см³, $d_a = 1.8$ г/см³. Поэтому в процессе остывания при формировании аморфной фазы возникает разность объема, которая, как предполагается, способствует "выдавливанию" лишнего объема на поверхность. Из эксперимента можно оценить средний объем одного микроострия, как $V = \pi R^2 h / 3 \approx 6 \cdot 10^5$ Å³, здесь $R = 100$ Å — радиус основания, а $h = 60$ Å — высота микроострия, аппроксимируемого конусом. Поскольку плотности аморфной и кристаллической фаз отличаются примерно в 1.2 раза, то этот "выдавлившийся" лишний объем составляет примерно 20% от объема переплавленной кристаллической фазы, из которого образовалось это микроострие. Таким образом, объем переплавленной кристаллической фазы вдоль трека единичного иона равен $V_{cr} \approx 5 \cdot V = 3 \cdot 10^6$ Å³. Следовательно, если предположить, что графит

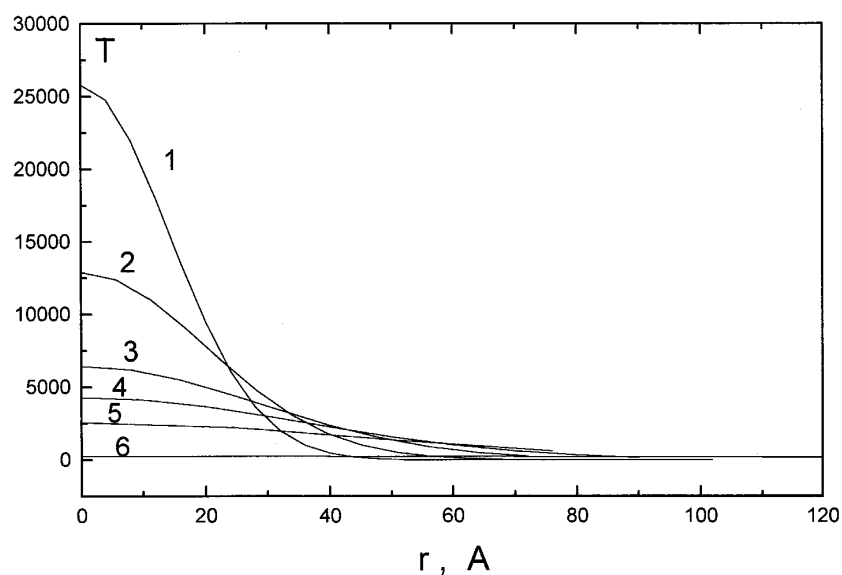


Рис. 2. Зависимость температуры пиролитического графита от расстояния от ионного трека в различные моменты времени после пролета иона: 1 — $t = 1 \cdot 10^{-13}$ s; 2 — $t = 2 \cdot 10^{-13}$ s; 3 — $t = 4 \cdot 10^{-13}$ s; 4 — $t = 6 \cdot 10^{-13}$ s; 5 — $t = 1 \cdot 10^{-12}$ s; 6 — $t = 1 \cdot 10^{-11}$ s.

переплавляется в цилиндрической области радиусом $R_{cr} = 50 \text{ \AA}$ вдоль ионного трека, то глубина, с которой "выдавливаются" лишние атомы на поверхность, составляет $h_{cr} \approx 400 \text{ \AA}$, что существенно меньше глубины, на которой выделяется энергия при неупругих потерях. Сформированные таким образом первоначальные микроострия приводят к тому, что последующие облучающие частицы падают на существенно искаженную поверхность, в которой формируется развитая напряженная структура. Именно поля напряжений в кристаллической фазе пиролитического графита, генерируемые сформированными включениями переплавленной аморфной фазы, возможно, определяют условия формирования последующих микроострий, что может приводить к их упорядочению. Однако не менее вероятное объяснение формирования периодически расположенных микроострий может быть связано со специфической

структурой самого пиролитического графита. Для уточнения модели и выявления физических условий формирования периодически расположенных микроострий на поверхности необходимо получение и анализ дополнительных экспериментальных данных, использование в исследованиях дополнительных методов — таких, как традиционная сканирующая микроскопия и рентгеноструктурный анализ, что и предполагается осуществить авторами работы [4] и настоящей заметки.

Список литературы

- [1] *Suvorov A.L.* et al. // Rev. "Le Vide, les Couches Minces" — Suppl. 1994. N 271. P. 326.
- [2] *Suvorov A.L.* et al. NANO 3. Denver, Colorado, Final Program and Abstracts. 1994. P. 306.
- [3] *Суворов А.Л.* и др. // ЖТФ. 1996. Т. 66. С. 172.
- [4] *Suvorov A.L., Trushin Yu.V., Suris R.A., Kharlamov V.S., Kulikov D.V.* et al. 43 Int. Field Emission Symposium, Moscow, Russia, July 14–19, 1996. P. 90.
- [5] *Журкин Е.Е.* Материалы 11 конференции "Взаимодействие ионов с поверхностью", 7–11 сент. 1993 г., Москва, МГУ, Т. 3. С. 105.
- [6] *Бер Б.Я., Журкин Е.Е., Меркулов А.В., Харламов В.С., Трушин Ю.В.* // ЖТФ. 1996. Т. 66. С. 54.
- [7] *Nastasi M., Mayer J.V.* // Rad. Eff. and Def. in Solids. 1994. V. 130/131. P. 367.
- [8] *Rasor N.S., McClelland J.D.* // J. Phys. Chem. Solids. 1960. V. 5. N 1–2. P. 17.
- [9] *Шулепов С.В.* Физика углеродных материалов. Челябинск, "Металлургия", Челябинское отделение, 1990. 336 с.
- [10] *Vasop G.E.* // Acta Cryst. 1950. V. 3. P. 137.
- [11] *Пугачева Е.С., Ильичева И.Е., Калиновский А.П., Бужинский О.И., Опимах И.В.* // Поверхность: физика, химия, механика. 1995. № 9. С. 71.