

✓
Подписной индекс 72674
ISSN 1810-3189

**ФИЗИКА
ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ
И РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ
СИСТЕМЫ**

2, 2013
ТОМ 16

ФИЗИКА ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ И РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Периодический теоретический и научно-практический журнал

Том 16, №2, 2013

Решением пленума ВАК Министерства образования РФ от 1 января 2007 года журнал включен в число изданий, в которых рекомендуется публикация основных результатов диссертационных исследований на соискание ученой степени доктора наук (электроника, измерительная техника, радиотехника и связь, физика).

Журнал включен в библиографические базы данных ВИНТИ (<http://www.viniti.ru/>),
ULRICHS Periodical Directory (<http://www.ulrichsweb.com/>) и Elibrary
(<http://www.elibrary.ru/>).

Учредитель журнала:

Самарский государственный университет

Соучредитель журнала:

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики

Главный редактор: Г.П.Яровой

Зам. Главного редактора: В.А.Неганов

Редакционная коллегия:

Е.Ю. Альтшулер (Саратов), В.А. Андреев (Самара), А.Н. Волобуев (Самара),

Ю.П. Воропаев (Минск), Д.И. Воскресенский (Москва),

Ю.В. Гуляев (Москва), В.Ф. Дмитриков (Санкт-Петербург),

В.В. Зайцев (Самара), В.Л. Карякин (Самара),

Г.А. Кузаев (Барлингтон, Канада), Г.С. Макеева (Пенза),

В.А. Мещанов (Саратов), В.Н. Митрохин (Москва), Г.А. Морозов (Казань),

Е.И. Нефедоров (Москва), Ю.Б. Нечаев (Воронеж), С.А. Никитов (Москва),

А. Г. Онищук (Минск), О.В. Осипов (Самара),

А.И. Пихтелев (Нижний Новгород), Л.И. Пономарев (Москва),

С.Л. Просвирнин (Харьков), С.Б. Раевский (Нижний Новгород),

И.П. Руденок (Волгоград), Д.А. Усанов (Саратов),

Н.С. Шевяхов (Саров), В.В. Яцышен (Волгоград), А.А. Яшин (Тула)

Ответственный секретарь: Д.П. Табаков

Выпускающий редактор: Л.В. Крылова

Корректор: Т.А. Мурзинова

Компьютерный набор и верстка: И.М. Градинарь

**Издание Самарского государственного университета и Поволжского
государственного университета телекоммуникаций и информатики**

Адрес редакции: 443010, Самара, ул. Толстого, 23

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, к. 333

Телефон: (846) 332-58-53

E-mail: neganov-samara@yandex.ru, URL: <http://neganov-samara.narod.ru/>

Адрес издателя: 443010, Самара, ул. Ак. Павлова, 1

Самарский государственный университет

Издательство «Самарский университет», к. 311 (физ.)

Телефон: (846) 334-54-23. Факс: (846) 334-54-17

Издается с 1998 г. Выходит 4 раза в год.

Издание зарегистрировано Министерством Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций – ПИ № 77-3343 от 28.04.2000

© Физика волновых процессов и радиотехнические системы, 2013

Подписано в печать 30.08.2013

Формат 60x84/8. Бумага офсетная. Печать офсетная. Уч.-изд. л. 9,056. Усл.-печ. л. 13,184.

Цена свободная. Тираж 300 экз. Заказ № 2401

Отпечатано с готового оригинал-макета на УОП СамГУ.

2

ФВПиРТС, 2013

Содержание

Памяти Геннадия Петровича Ярового.....	6
<i>А.С. Абрамов, С.А. Афанасьев, Д.И. Семенцов</i> Интерференционное управление поглощательной способностью магнитной пленки.....	8
<i>И.П. Запороцкова, С.В. Борознин, Е.В. Борозина, Д.И.Поликратов, А.А. Крутяров.</i> Транспортные свойства вакансий в бороуглеродных BC_3 нанотрубках.....	14
<i>Е.К. Башкиров, М.С. Мастюгин</i> Влияние диполь-дипольного взаимодействия на динамику перепутанных сверхпроводящих потоковых кубитов, взаимодействующих с тепловым шумом.....	19
<i>А.В.Данилов, А.А. Радионов</i> Распространение упругих волн в периодически неоднородной среде.....	25
<i>А.А.Малахов, К.В. Попков, А.С. Раевский</i> Плазмон-поляритонные волны в цилиндрических направленных структурах	
<i>Н.А. Бушуев, М.В. Давидович, Е.Ю. Альтшулер</i> Магнитное поле МПФС приборов О-типа: расчет на основе интегральных соотношений.....	35
<i>А.В.Зайцев, Ар.В. Карлов, Д.Б. Нураев</i> Численный анализ автоколебаний активного фрактального осциллятора.....	45

<i>Е.С. Емельянов</i> Особенности формирования пространственной избирательности многоканальной многочастотной линейной антенной решетки при регулярном распределении частот по ее элементам.....	49
<i>А.Н.Разиньков</i> Точность оценки местоположения источников последовательностей сверхширокополосных импульсов в дальномерных системах.....	53
<i>А.М. Бобрешов, Н.Н. Мыррикова, Ю.П. Сбитнев, А.М. Уткин</i> Анализ и оптимизация многокаскадных усилительных структур.....	57
<i>Д.П. Николаев</i> Физические и механические свойства, модель формирования и структура защитных пленок на основе углерода.....	64
<i>К.И. Сухачёв, Н.Д. Сёмкин, А.В. Пияков</i> Импульсный ускоритель пылевых частиц.....	70
Т.16, №2	3

<i>В.А. Неганов, Д.П. Табаков</i> Математические модели цилиндрической спиральной антенны.....	79
<i>Г.Ф. Заргано, В.В. Земляков, С.В. Крутыев</i> Полосно-пропускающие фильтры на плоско-поперечных сдвигах Н-волноводов, выполненные по SIW-технологии.....	87
<i>А.С. Арефьев</i> Соотношение между концентрациями свободных носителей заряда в равновесном полупроводнике.....	94
<i>П.А. Трифонов, И.В. Гуцин</i> Квазиоптимальное обнаружение сверхширокополосного сигнала при воздействии узкополосной помехи.....	96
<i>Д.П. Николаев</i> Вторичная электронная эмиссия и методы ее исследования.....	101
Сведения об авторах.....	108
К сведению авторов.....	112

CONTENTS

In memory of Gennadiy Petrovich Yarovoy.....	6
<i>A.S. Abramov, S.A. Afanasyev, D.I. Sementsov</i>	
Absorptivity control of magnetic film by interference of counter propagating waves.....	8
<i>I.V. Zaporotskova, SV. Boroznin, E.V. Boroznina, D.I. Polikarpov, A.A. Krutoyarov</i>	
Vacancy transport properties in boron-carbon BC ₃ nanotubes.....	14
<i>A.K. Bashkirov, M.S. Mastugin</i>	
The influence of dipole-dipole interaction on dynamics of entangled superconducting flux qubits interacting with thermal noise.....	19
<i>AV. Danilov, A.A. Radionov</i>	
Propagation of elastic waves in a periodically inhomogeneous medium.....	25
<i>V.A. Malakhov, KV. Popkov, A.S. Raevskii</i>	
Plasmon-polariton waves in cylindrical guiding structures.....	29
<i>N.A. Bushuev, M.V. Davidovich, E.Yu. Altshuler</i>	
Field of MPFS: the calculation on the basis of integral relations.....	35
<i>V.V. Zaitsev, Ar.V. Karlov, D.B. Nuraev</i>	
Numerical analysis of self-oscillations fractional active oscillator.....	45
<i>E.S. Emelyanov</i>	
Features of the formation of multi-channel spatial selectivity of multi-frequency linear array with regular frequency allocation to its elements.....	49
<i>S.N. Razin'kov</i>	
Accuracy of assessment of location of sources of sequences super-broadband impulses by measuring systems.....	53

A.M. Bobreshov, N.N. Mymrikova, U.P. Sbitnev, A.M. Utkin Analysis and optimization of multistage amplifier structures.....	57
<i>D.P. Nikolaev</i> The physical and mechanical properties, a model of formation and structure of the protective films on carbon-based.....	64
<i>K.I. Sukhachev, N.D. Semkin, A.V. Piyakov</i> Dust particle accelerator pulse.....	70
T.16, №2	5
<hr/>	
<i>V.A. Neganov, D.P. Tabakov</i> Mathematical models of cylindrical spiral antenna.....	79
<i>G.F. Zargano, VV. Zemlyakov, S.V. Krutiev</i> Band-pass filters on transverse shifts of double-ridge waveguides realized by SIW-technology.....	87
<i>A.S. Aref'ev</i> The correlation between concentrations of free carries of charge in a semiconductor in equilibrium.....	94
<i>P.A. Trifonov, I.V. Guschin</i> Suboptimal detection of the superbroadband signal at influence of the narrow-band interference.....	96
<i>D.P. Nikolaev</i> Secondary electronic emission and methods of its study.....	101
About the authors.....	108
Information for authors.....	112

УДК 539.231

Физические и механические свойства, модель формирования и
структура защитных пленок на основе углерода

Д.П. Николаев

Московский институт электроники и математики Национального
исследовательского университета «Высшая школа экономики»

(МИЭМ НИУ ВШЭ)

Рассмотрены физические свойства, условия охлаждения и структура углеродных пленок. Достоинства и недостатки алмазоподобных углеродных пленок, области применения. Методы PVD. Предложена модель связывания атомов углерода имплантированных в аморфную углеродную матрицу. Согласно которой единственным и достаточным условием является ограничение температуры матрицы. Модель sp^3 связывания позволяет оценить понимание механизма PVD углеродных пленок, а также нестабильных фаз других веществ и материалов

Ключевые слова: алмазоподобные углеродные пленки, аморфные углеродные пленки, методы нанесения углеродных пленок, имплантированные атомы.

The physical and mechanical properties, a model of formation and structure
of the protective films on carbon-based

D.P.Nikolaev

Moscow Institute of Electronics and Mathematics,

Higher School of Economics

(MIEM HSE)

A following article runs about carbon films, their physical properties, deposition conditions and structure; advantages and disadvantages of carbon diamond-like films; a field of application; physical vapor deposition methods

(PVD). A model of bound carbon atoms, implanted in an amorphous carbon matrix comes forward. According to the model, a limitation of a matrix temperature is a necessary and sufficient condition. A model of sp^3 bounding allows to estimate the whole understanding of PVD mechanism applied not only for carbon films, but also for other substances.

Keywords: diamond-like carbon films, amorphous carbon films, methods of application of carbon films, the implanted atoms.

Углеродные пленки, получаемые различными технологическими методами, находят широкое применение в разных областях науки и техники.

Уникальность их свойств, таких как твердость, удельное электрическое сопротивление, оптическая прозрачность в видимом и ИК-диапазонах электромагнитного излучения, низкий коэффициент трения, высокая стойкость в агрессивных химических средах, биосовместимость объясняется огромным интересом к исследованию и применению углеродных пленок. Их можно получить всеми известными методами плазменного осаждения, но с учетом определенного набора условий, при которых приобретают свои уникальные свойства [1].

Углеродные пленки могут иметь различную структуру (фазовый и химический составы) в зависимости от методов и условий осаждения. Поэтому в научно-технической литературе такие пленки имеют различные названия. Пленки, имеющие кристаллическую структуру алмаза, карбида или графита, обычно называются по соответствующим модификациям углерода. Гораздо сложнее вопрос в отношении углеродных пленок, обладающих аморфной или квазикристаллической структурой, характерной для пленок, получаемых ионно-плазменными методами осаждения. Такие пленки получили название «алмазоподобные» (АПП). Термин АПП отражает подобие ряда некоторых свойств пленок, например, твердости, химической инертности, оптической прозрачности, электрического сопротивления

аналогичным свойствам природного алмаза. Хотя это название не отражает реальную структуру и фазовый состав таких пленок [4].

Алмаз, обладающий уникальными, отличными физическими свойствами, используется как для ювелирных изделий, но и в качестве твердых износостойких покрытий в изделиях приборостроения и машиностроения, в том числе в качестве материала микросхем, материала игл звукоснимателей электрофонов (из-за высокого значения скорости распространения звуковых волн). В настоящее время используют свойства алмаза хорошо проводить тепло – конкретно, проектируются алмазные теплоотводящие элементы полупроводниковых лазеров.

При расширении области практического применения алмазов заметный интерес представляют новые технологии осаждения алмазных пленок синтезом из газовой фазы, отличающиеся относительной простотой. Новые возможности применения алмазов связаны с такими свойствами этого вещества, как хорошее пропускание оптического излучения в широкой области спектра, полупроводниковые свойства, высокая упругость и износостойкость. Одновременно алмаз может быть эффективно использован при изготовлении прозрачных защитных слоев, в качестве радиационного и теплостойкого полупроводника, а также в элементах акустических головок [3].

В настоящее время получены алмазоподобные углеродные пленки, похожие по некоторым свойствам на алмазные слои, названные α -углеродными и i -углеродными, чаще их называют «пленками твердого углерода». Свойства этих пленок характеризуются прозрачностью, высокой твердостью, хорошими изолирующими характеристиками и коррозионной стойкостью. Отличительной чертой методик получения этих пленок (ионно-лучевой осаждение, ионное осаждение) является низкая температура подложек при синтезе алмазных слоев [6, 11].

Одной из основных характеристик углеродных пленок является отношение атомов с различной гибридизацией валентных электронов sp^3 , sp^2

, *sp*. В последнее время аморфные алмазоподобные пленки стали разделять еще на две категории: водородосодержащие α -C:H и безводородные α -C (иногда $t\alpha$ -C – «тетраэдрические» аморфные пленки), что отражает большое количество sp^3 гибридизированных атомов в пленках.

Расширение плотности применения водородных пленок стимулирует разработки новых методов и устройств для их получения. К таким методам можно отнести ряд импульсных методов, например получение пленок при распылении графитовой мишени импульсным лазером и в плазме импульсного катодно-дугового разряда в вакууме. Причем этот метод является перспективным для получения АПП, поскольку имеет высокую производительность и стабильность процесса во времени, а также сравнительно недорогой и простой в реализации, то есть позволяет получать пленки при температуре подложек ниже 373К.

Сравнивая физические свойства природного алмаза, алмаза, осажденного и газовой фазы, и пленок твердого углерода видно, что значения параметров природного алмаза близки к величинам соответствующих параметров алмазов, осажденных из газовой фазы; пленки твердого углерода отличаются по ряду характеристик, в частности по твердости, плотности и оптическому пропусканию.

Алмазоподобные пленки имеют такие характеристики, как оптическое пропускание, показатель преломления, изолирующая способность, твердость, износоустойчивость, эти пленки стоят гораздо ближе к алмазу, чем к графиту, что и позволило дать им название «алмазоподобные», в отличие от получаемых ранее методами вакуумного осаждения проводящих пленок углерода.

Ввиду важной роли ионов в процессе осаждения алмазоподобных пленок, часто для их обозначения употребляется термин «i-углеродная пленка» (i-ion-ион) в отличие от обычных проводящих углеродных пленок. Исследования структуры указанных пленок методами дифракции рентгеновских и электронных лучей показали, что в большинстве случаев

пленки характеризуются аморфной структурой и лишь иногда – поликристаллической. С учетом аморфности алмазоподобных пленок их называют « α -углеродными» (α : amorphous – аморфный) [5, 8].

Перечисленные три названия не предполагают какого-либо четкого различия в физических характеристиках слоев, отличие этих терминов вызвано лишь разным подходом к определению одного и того же понятия.

В настоящее время большой интерес вызывает получение аморфных безводородных углеродных пленок, обладающих многими алмазоподобными свойствами. Также пленки осаждают с применением распыления углеродной мишени ионным пучком, магнетронного распыления, вакуумной дуги, лазерной технологии, а также пучков ионов углерода, бомбардирующих подложку. Эти способы осаждения и их возможные комбинации обычно относят к так называемым методам PVD (physical vapor deposition) [7].

Одним из основных параметров, определяющих широкий диапазон свойств аморфных углеродных пленок, является содержание sp^2 и sp^3 гибридизированных атомов.

Механизм PVD sp^2 и sp^3 пленок в настоящее время еще недостаточно ясен. Поэтому, несмотря на огромный объем информации, накопленный за последнее время по осаждению пленок, отсутствует алгоритм решения проблем, которые сдерживают технологию конкретных применений. Отметим, что предлагаемые сегодня модели осаждения пленок не описывают экспериментальные результаты в широком диапазоне условий PVD. sp^3 . С пленок, не отражают огромную роль таких параметров осаждения, как величина потока бомбардирующих углеродных частиц и их функции распределения по энергиям, не указывают процессы, определяющие наноразную структуру пленок и т.п. Различный подход к различным параметрам осаждения часто приводит к недостаточно корректному представлению в публикациях экспериментальных данных, что затрудняет их понимание [9].

Будем называть sp^2 матрицей случайную трехмерную сетку тригонально-связанных углеродных атомов с низкой плотностью упаковки. Модель использует матрицу в качестве исходной структуры, в которой при имплантации образуются sp^3 координированные атому углерода.

Считая, что элементарный акт связывания углерода в процессе формирования sp^3 пленок можно отнести к реакции ассоциации, т.е. присоединения отдельного имплантированного атома C к некоторой совокупности атомов sp^2 матрицы с образованием новых ковалентных связей. При этом существующая связность sp^2 матрицы не нарушается, а ассоциируемые атомы углерода легко находят места внутри рыхлой структуры. Связывание имплантированного атома углерода sp^2 матрицы может идти по одному из трех каналов:



где численные коэффициенты в левых частях означают количество атомов матрицы, с которыми непосредственно связывается имплантированный атом, а в правых – число атомов, образующих в результате ассоциации новые конфигурации. Эффективность образования sp^3 гибридных конфигураций в элементарных актах связывания имплантированного атома по каналам А,В,С составляет соответственно 100%, 75% и 67%.

Для потока углеродных атомов, имплантируемых в sp^2 матрицу, можно ввести усредненный канал связывания, который является суперпозицией параллельных каналов А, В и С со статистическими весами, соответствующими вероятности реализации каждого из каналов. Указанные вероятности можно найти, определив фиктивные концентрации междуузлий, образуемых 4,3 и 2 атомами sp^2 матрицы, равными $N/4$, $N/2$, где N – концентрация атомов углерода в sp^3 матрице. Видно, что вероятности

реализации каналов А, В и С будут составлять 0,23; 0,31 и 0,46. Следовательно, эффективность образования sp^3 гибридизированных конфигураций при связывании имплантированного атома углерода с атомами sp^2 матрицы будет приблизительно равна

$$0,23 - 100\% + 0,31 - 75\% + 0,46 - 67\% = 77\% \quad (4)$$

Далее найдем необходимые и достаточные условия связывания имплантированных в sp^2 матрицу атомов углерода. В элементарных актах, идущих по каналам А, В и С валентные связи имплантированного атома устанавливаются, соответственно, с 4, 3 или 2 атомами матрицы. Но в процессе ассоциации участвуют также и первые соседи этих атомов, так как образование новых конфигураций сопряжено с изменением симметрии их расположения. Введем понятие локальной ячейки связывания, в которую включим атомы, участвующие в элементарном акте ассоциации. Таким образом, ячейки, связывания по каналам А, В и С будут состоять из 16, 12 и 8 атомов углерода соответственно [1, 5].

Взаимодействие имплантированного атома с ячейкой можно рассматривать как столкновение с ней, когда сечение взаимодействия становится больше размеров ячейки. В этом случае, согласно оценкам с использованием, например, потенциала Борна-Майера энергия атома углерода должна составлять не более нескольких электронвольт. Будем считать, что имплантированный в ячейку атом образует вместе с ней комплекс, если время «столкновения», т.е. время пролета через ячейку будет больше характерного времени движения атомов внутри ячейки, которое определяется периодом колебаний $T_{кол}$ атомов матрицы.

Механизм активации комплекса состоит в преодолении атомом энергетического барьера при его имплантации в ячейку и не носит технического характера. Условие образования комплекса накладывает ограничение на кинематическую энергию имплантированного атома

$$E < \frac{mL^2}{2T_{кол}^2}, \text{ где } m - \text{масса атома углерода, } L - \text{характерный размер ячейки.}$$

Приняв для оценки $T_{кол} = 10^{13}$ и характерный размер ячейки, состоящей из 8-16 атомов $L = 4 \dots 6 \text{ \AA}$, получим $E = 1 \dots 2 \text{ эВ}$.

Отметим, что при такой энергии атома от пролетит через ячейку и имплантируется в следующую, т.к. его энергия в этом случае превысит энергию активации самодиффузии и условие образование комплекса будет выполнено на последующем этапе торможения имплантированного атома. Следовательно, условие образования активированного комплекса, являющегося необходимым для элементарного акта, выполняется всегда при имплантации атома углерода в sp^2 матрицу. В течение времени порядка периода колебаний атомов комплекс остается изолированным от остальной sp^2 матрицы. Увеличение количества атомов в ячейке за счет имплантированного атома будет соответствовать взаимным расстояниям между ними, характерным для объемно сжатого состояния sp^2 связанных атомов. Согласно адиабатическому принципу, электронная подсистема комплекса мгновенно по отношению к движению атомов будет перестраиваться в соответствии с их взаимным расположением. При этом возможно образование связанного состояния имплантированного атома углерода с ячейкой за счет новых конфигураций по каналам А, В или С. Результат альтернативной возможности – атомы ячейки сохраняют sp^2 гибридизацию, а имплантированный атом углерода остается несвязанным. Реализоваться будет тот из вариантов, который ведет к минимуму энергии для конечного состояния [5].

До настоящего времени полные расчеты движения ядер в ячейке, процессов перераспределения энергии с участием электронной подсистемы, энергией образующихся конфигураций являются сложнейшей квантово-механической задачей. Поэтому для определения достаточных условий образования связанного состояния имплантированного атома пользуются Р-Т диаграммой стабильности Бермана-Симона. Трактую фазовую диаграмму графит-алмаз как диаграмму устойчивых sp^2 и sp^3 конфигураций атомов

углерода. Вводя эффективное давление в ячейке $P_{эф}$ как величину, определенную локальным увеличением плотности, считая $\Delta n/n = 1/n$, где n – количество атомов в ячейке вместе с имплантированным атомом. В результате, при постоянном объеме ячейки $P = \sigma/n$, где σ – объемный модуль упругости. Положим для оценок объемный модуль упругости sp^2 матрицы равным модулю графита $\sigma = 33,7$ ГПа. Соответственно каналом связывания А, В и С эффективные давления в ячейках составят приблизительно 2,0 Гпа; 2,6 ГПа и 3,7 Гпа и будут оставаться такими в течение периода колебаний атомов. Следовательно, устойчивые связанные состояния в локальных ячейках реализуются, если температура не будет превышать граничных температур T_{cp} , которые для каналов А, В и С, согласно диаграмме Бермана-Симона, приблизительно равны 450К, 650К и 1050К. При образовании устойчивых связанных состояний часть полной энергии комплекса (0,6...1,2эВ) уходит на изменение гибридизации атомов ячейки, т.к. для аморфного углерода нестабильная конфигурация sp^3 энергетически на 0.3 ЭВ/атом выше sp^2 конфигурации. Остальная избыточная энергия, также как и давление, будет релаксировать за пределы ячейки в течение последующих периодов колебаний атомов матрицы.

Таким образом, согласно данной модели для связывания имплантированных в sp^2 матрицу атомов углерода единственным и достаточным условием является ограничение температуры матрицы.

В процессе формирования пленок из данной модели вытекает ряд следствий, которые необходимо рассмотреть.

Начальная энергия имплантированного атома не влияет на элементарный процесс связывания, т.к. он совершается на конечном периоде торможения при практически полной потере атомом кинематической энергии ($E < 1...2$ эВ). Начальная энергия будет определять лишь глубину в матрице, на которой происходит его связывание. Очевидно, что процессы на предыдущем участке тормозного пути углеродного атома несущественны для

элементарного процесса ассоциации. Это может быть как первичный имплантированный атом, так и атом отдачи или один из атомов столкновительного каскада. В модели связывания рассматривается только имплантированный в ячейку атом углерода. Но при рассмотрении процессов осаждения sp^3 пленок необходимо учитывать появление в матрице несвязанных атомов углерода. В частности, возникает вопрос о возможности связывания таких атомов. Действительно, совершая под воздействием тепловых колебаний элементарные скачки по междоузлиям, они также образуют активированные комплексы с атомами sp^2 матрицы. Одновременно имеется существенное различие между атомами, имплантированными и совершившими скачок в ячейку. Элементарный скачок несвязанного атома происходит между соседними междоузлиями, находящимися в установившемся за время его «оседлой» жизни ($\gg T_{кол}$) дальнедействующем поле деформаций. Поэтому эффективное в ячейке при скачке в нее несвязанного атома не достигает величины, необходимой в соответствии с диаграммой Бермана-Симона для образования sp^3 гибридизированных конфигураций связанного углерода [9].

Другая ситуация возникает, если имплантированный и совершивший скачок в ячейку несвязанный атом образуют активированный комплекс, приводящий к стабильной связанной конфигурации независимо от величины эффективного давления. Например, при ассоциации атома бора с тремя sp^2 гибридизированными углеродными атомами ячейки осуществляется стабильная карбидная конфигурация, в которой три атома углерода становятся sp^3 гибридизированными. Связывание не только имплантированных в ячейку, но и междоузельных атомов скажется на процессах формирования пленок и ее характеристик. Эксперименты показывают, что при добавлении к бомбардирующему углеродному потоку 2...4% атомов бора изменяется зависимость процентов sp^3 от параметров осаждения. Возможен так же вариант, когда имплантированный в ячейку

атом образует нестабильную конфигурацию, соответствующую фазе высокого давления, а совершающий элементарные скачки междоузельный атом – конфигурацию фазы низкого давления. Вероятно, такой вариант имеет место при осаждении методами PVD пленок.

Данная модель позволяет дать физическое обоснование субимплантационной идее Лифшица и др., согласно которой формирование углеродных пленок является результатом процессов, вызванных субповерхностной имплантацией. В действительности не имеет значения, является ли имплантация субповерхностной или обычной, соответствующей пробегам атомов с начальной энергией килоэлектронвольт и более. Для элементарного процесса sp^3 связывания имплантированный атом должен оказаться внутри локальной ячейки, состоящей из 8...16 атомов углерода, т.е. пробег проникающего в sp^2 матрицу атома должен быть не менее $2\overset{0}{A}$. В этом случае ассоциируемые атомы ячейки не будут являться поверхностными и становится возможной реализация величины эффективного давления в ячейке, соответствующей образованию связанной конфигурации. Результаты всех экспериментов по осаждению углерода с энергией частиц меньшей энергии проникновения в матрицу свидетельствуют о поверхностном росте пленок [4, 11].

Рассмотрим влияние температуры осаждаемой пленки на процессы, определяющие ее характеристики. Экспериментально установлено, что PVD при температуре подложки, превышающей $T_{кр} = 450...500K$ приводит к резкому спаду плотности углеродных пленок. Известные модели осаждения либо нечувствительны к изменению температуры подложки, либо недостаточно обоснованно связывают $T_{кр}$ с увеличением диффузии одного потока междоузельных атомов углерода к поверхности пленки. Считается, что причиной спада плотности sp^3 пленок является изменение условий связывания имплантированных атомов углерода с атомами матрицы. Согласно данной модели, канал А при повышении температуры $T_{кр} = 450K$

уже не образует устойчивые sp^3 связанные конфигурации. Эффективность связывания, определяемая суперпозицией каналов А,В и С, резко снизится, а насыщение углеродной матрицы несвязанными атомами возрастает. Таким образом, граничная температура элементарных актов образования T_{sp} соответствует критической температуре $T_{кр}$, полученной в экспериментах по PVD пленок [2].

С целью дальнейшего развития данной модели необходимо уточнение вероятности связывания имплантированных атомов по различным каналам ассоциации. Определить эти вероятности в первом приближении можно, используя прием введения фиктивных концентраций ячеек для соответствующих каналов. Отсутствует также информация об участии в процессах осаждения пленок sp^3 гибридного углерода как возможной промежуточной конфигурации [2].

Отметим, что величины граничных температур для каналов А,В и С были получены в приближении, использующем объемный модуль упругости графита. Для уточнения граничных условий необходимы сведения о локальных модулях упругости для элементарных ячеек связывания. Видно, что они могут зависеть от параметров углеродного потока и условий осаждения, формирующих sp^2 матрицу.

Некоторые изменения величины $T_{кр}$ в экспериментах, возможно, связаны с отличием упругих характеристик ячеек при разных режимах осаждения. Применения Р-Т диаграммы кристаллических фаз углерода служит лишь первым приближением для определения области стабильности связанных конфигураций с преобладающей sp^3 гибридизацией углерода. Рассмотренная модель sp^3 связывания способствует лучшему пониманию механизма РV. D углеродных пленок и метастабильных фаз других материалов.

Выводы.

Рассмотрен процесс связывания атомов углерода, внедряемых в sp^2 матрицу с целью выявления механизма PVD пленок. Предложена модель элементарного акта осаждения имплантированного атома с локальной ячейки связывания с образованием sp^3 гибридизированных атомов углерода, из которой следует:

- Превышение критической температуры осаждения пленок ведет к резкому спаду плотности и определяется элементарными процессами связывания, а не процессами переноса;

- Единственное условие элементарного акта связывания имплантированного в sp^2 матрицу углеродного атома – это ограничение ее температуры ($T < T_{sp}$);

- Имплантация атома в ячейку связывания может быть при его проникновении в sp^2 матрицу не меньше, чем на 2Å , что определяет физический смысл идеи Лифшица о субповерхностной имплантации;

- Элементарный акт связывания углерода, имплантированного в sp^2 матрицу, не зависит от его начальной энергии и совершается на конечной участке тормозного пути имплантированного атома углерода;

- Только при имплантации атома в ячейку может происходить связанная конфигурация с образованием sp^2 гибридизированных атомов, а атом углерода, совершающий элементарные скачки теплового характера по междоузлиям матрицы, остается несвязанным;

- По результатам данной работы можно построить модели формирования углеродных пленок для различных методов PVD.

Список литературы

1. Л. Майссел, Р. Глэнг, Технология тонких пленок, 1 том 660 стр., 2 том 760 стр., М. «Сов радио» 1977г.
2. Ефимов И.Е., Козырь И.Я Микроэлектроника, М. «Высшая школа» 1996г., 460 стр.

3. В.И. Костиков «Углеродные материалы», М. Наука 1997г.
4. Станишевский А.В., «Структура пленок углерода, осажденных из плазмы» М. Машиностроение 1985, 233 стр.
5. Е.Л. Шешин «Структура поверхности и эмиссионные свойства углеродных материалов» М. «Высшая школа» 1984 270 стр.
6. Берлин Е. Двинин С. Вакуумная технология и оборудование для нанесения и травления тонких пленок. М. Техносфера 2007
7. Данилин Б.А. Применение низкотемпературной плазмы для нанесения тонких пленок. М. Энергоиздат 1989
8. Данилин Е.С., Сырчин В.К. Магнетронные распылительные системы, М.: Радио и связь. 1982 -72 стр.
9. Ивановский Г.Ф., Петров В.И. Ионно-плазменная обработка материалов. М.: Радио и связь. 1986 – 232 стр.
10. Ткачук Б.В., Колотыркин В.М. Получение тонких полимерных пленок из газовой фазы. – М.: Химия. 1977 – 216 стр.
11. Маишев Ю.П. Шевчук С.Л. Ионно-лучевая обработка: осаждение тонких пленок из низкоэнергетического пучка ионов// Труды ВТИАН. 2005. Т.18. С. 148-160.