

Моделирование формирования кластерных групп углерода в плазме электродугового разряда

Александр Н. Гаврилов¹ ganinvrn@yandex.ru

¹ Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия

Реферат. Проблема моделирования сложных ресурсоемких процессов плазменного синтеза углеродных наноструктур (УНС) на базе математических и численных методов решения, ориентированных на использование параллельных и распределенных вычислений для обработки больших объемов данных, позволяющих исследовать связи и характеристики процессов для получения эффективного, экономически целесообразного метода синтеза УНС (фуллеренов, нанотрубок), является актуальной теоретической и практической проблемой. В данной статье рассматривается задача математического моделирования движения и взаимодействия заряженных частиц в многокомпонентной плазме на основе уравнения Больцмана применительно для синтеза УНС методом термической возгонки графита. Представлен вывод интеграла столкновений позволяющий выполнять численное решение системы уравнений Больцмана - Максвелла применительно к электродуговому синтезу УНС. Высокий порядок частиц и количество их взаимодействий участвующих одновременно в процессе синтеза УНС требует значительных затрат машинных ресурсов и времени для выполнения численных расчетов по построенной модели. Применение метода крупных частиц дает возможность снизить объем вычислений и требования к аппаратным ресурсам, не влияя на точность численных расчетов. Использование технологии параллельных вычислений на CPU и GPU с применением технологии Nvidia CUDA позволяет организовать все вычисления общего назначения для разработанной модели на базе графического процессора видеокарты персонального компьютера, без использования суперЭВМ или вычислительных кластеров. Представлены результаты экспериментальных исследований и численных расчетов, подтверждающих адекватность разработанной модели. Получены количественные характеристики общих парных взаимодействий частиц углерода и взаимодействий с образованием кластерных групп углерода с различными типами связей в плазме межэлектродного пространства составляющих основу синтезируемых наноструктур. Образование кластеров углерода происходит во всем межэлектродном пространстве плазмы с различной интенсивностью и зависит от параметров процесса.

Ключевые слова: углеродные наноструктуры, плазма, уравнение Больцмана, кластеры углерода, численное решение

Modeling of formation of carbon cluster groups in electric arc discharge plasma

Alexksandr N. Gavrilov¹ ganinvrn@yandex.ru

¹ Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia

Summary. The problem of modeling complex resource-intensive processes of plasma synthesis of carbon nanostructures (CNS) on the basis of mathematical and numerical methods of solution, focused on the use of parallel and distributed computing for processing large amounts of data, allowing to investigate the relationship and characteristics of processes to obtain an effective, cost-effective method of synthesis of CNS (fullerenes, nanotubes), is an actual theoretical and practical problem. This article deals with the problem of mathematical modeling of motion and interaction of charged particles in a multicomponent plasma based on the Boltzmann equation for the synthesis of CNS by thermal sublimation of graphite. The derivation of the collision integral is presented allowing to perform a numerical solution of the Boltzmann - Maxwell equations system with respect to the arc synthesis of CNS. The high order of particles and the number of their interactions involved simultaneously in the process of synthesis of CNS requires significant costs of machine resources and time to perform numerical calculations on the constructed model. Application of the large particle method makes it possible to reduce the amount of computing and hardware requirements without affecting the accuracy of numerical calculations. The use of parallel computing technology on the CPU and GPU with the use of Nvidia CUDA technology allows you to organize all the General-purpose calculations for the developed model based on the graphics processor of the personal computer graphics card, without the use of supercomputers or computing clusters. The results of experimental studies and numerical calculations confirming the adequacy of the developed model are presented. Obtained quantitative characteristics of the total pairwise interactions between the carbon particles and interactions with the formation of clusters of carbon with various types of ties in the plasma of the interelectrode space which are the basis of the synthesized nanostructures. The formation of carbon clusters occurs in the entire interelectrode space of the plasma with different intensity and depends on the process parameters.

Keywords: carbon nanostructures, plasma, Boltzmann equation, carbon clusters, numerical solution

Введение

Получение углеродных наноструктур (УНС) обладающих уникальными механическими и электрическими свойствами, является перспективных направлений развития современной науки. Использование их, например, в качестве добавок в полимерные смолы, позволяет создавать полимерные нанокомпозиты, обладающие новым или улучшенным комплексом свойств [1].

Промышленное производство УНС (фуллеренов, нанотрубок, нановолокон) сдерживает низкая производительность и высокая стоимость существующих технологий синтеза, обусловленные недостаточностью изученности особенностей процесса их образования.

На сегодняшний момент нет единого мнения о модели формирования УНС.

Понимание механизма образования кластерных групп углерода формирующих объемные УНС позволит исследователям целенаправленно создавать и варьировать способами и условиями получения различных типов наноструктур и их производных, что позволит значительно повысить эффективность существующих технологий синтеза.

В основном применяемые в промышленности технологии синтеза УНС предполагают использование различных методов термического испарения атомарного графита энергетическим потоком или разложение углеродосодержащих газов с последующим осаждением формируемых

Для цитирования

Гаврилов А.Н. Моделирование формирования кластерных групп углерода в плазме электродугового разряда // Вестник ВГУИТ. 2018. Т. 80. № 2. С. 108–113. doi:10.20914/2310-1202-2018-2-108-113

For citation

Gavrilov A.N. Modeling of formation of carbon cluster groups in electric arc discharge plasma. *Vestnik VGUIT* [Proceedings of VSUET]. 2018. vol. 80. no. 2. pp. 108–113. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2018-2-108-113

структур на охлаждаемую поверхность [2]. Во всех технологиях происходит термическое разрушение структуры исходного материала с последующим образованием и ростом многоатомных кластеров углерода с различными типами связей, которые и формируют объемные УНС.

Одним из наиболее распространенных методов синтеза УНС является метод термического испарения графита плазмой дугового разряда в среде буферного газа [3]. Данный метод позволяет вовлекать в технологический процесс значительные объемы сырья и отличается высокой скоростью протекания и качеством конечного продукта.

Изучение отдельных физико-химических процессов, протекающих при горении дуги, охватывает исследование электрических, тепловых, диффузионных, газодинамических и плазменных явлений. Каждое из этих явлений достаточно подробно изучено и описано, однако в реальном процессе дугового синтеза УНС происходит одновременно множество взаимодействующих явлений с определенными особенностями, разделить которые зачастую невозможно, поэтому использовать существующие математические модели для описания движения и взаимодействия частиц в плазме невозможно.

Для описания поведения низкотемпературной плазмы существует также разные подходы к её математическому моделированию: одночастичное приближение, метод молекулярной динамики, магнитогидродинамическое, кинетическое описание, метод Монте-Карло, шредингеровские модели [4]. Перечисленные подходы отличаются степенью детализации компонентов плазмы, вычислительными затратами и возможностью учета необходимых особенностей рассматриваемого процесса.

Наибольший интерес для моделирования динамики плазмы применительно к электродуговому синтезу, представляют инструментальные средства кинетической теории на основе уравнения Больцмана. Использование функций распределения заряженных частиц по координатам и импульсам позволяет учитывать разнообразие происходящих процессов в плазме и снизить вычислительную сложность моделирования.

1.1 Постановка задачи

Целью данной работы является разработка математической модели процессов синтеза различных УНС в плазме электродугового разряда, позволяющей описывать механизм образования и рост углеродных кластерных групп с различными типами связей (C-C, C=C (C₂) и C=C-C (C₃)), которые являются основой построения объемных наноструктур. При этом необходимо учитывать все основные факторы

процессов синтеза, влияющих на движение и столкновения частиц в межэлектродном пространстве. В модели должны учитываться парные упругие и неупругие столкновения различных частиц многокомпонентной плазмы.

1.1.1 Математическая модель движения и взаимодействия частиц в плазме

В основу предлагаемой математической модели описывающей движения частиц многокомпонентной плазме с учетом взаимодействий между ними, положена система уравнений Больцмана [5] для каждого вида частиц, дополненная условием парных столкновений между частицами:

$$\frac{\partial f_\alpha}{\partial t} + \vec{g} \frac{\partial f_\alpha}{\partial \vec{r}} - \frac{q_\alpha}{m_\alpha} (\vec{E} + \frac{1}{c} [\vec{g}, \vec{B}]) \frac{\partial f_\alpha}{\partial \vec{g}} = \frac{\partial f_\alpha}{\partial t} \Big|_{CT}, \quad (1)$$

где f_α, f'_α – функции распределения компонент плазмы до и после столкновения (α : e – электрон, h – ион буферного газа (He), c – ион углерода); \vec{r} – координаты частицы; q_α, m_α – заряд и масса частицы.

Допуская, что столкновения в плазме дугового разряда происходят между электронами, ионами буферного газа и частицами углерода интегралы парных столкновений запишутся в виде:

$$\frac{\partial f_\alpha}{\partial t} \Big|_{CT} = \sum_{\beta=e,c,hV} \iint (f'_\alpha f'_\beta - f_\alpha f_\beta) |\vec{g} - \vec{g}'| d\sigma d\vec{g}', \quad (2)$$

где \vec{g}, \vec{g}' – скорости частиц до и после столкновения; $d\sigma = 4R_1 R_2 \cos \theta d\Omega$ – дифференциальное эффективное сечение рассеяния частиц R_1 и R_2 в телесный угол $d\Omega$; θ – угол между скоростью сталкивающихся частиц и линией движения.

Система уравнения (1) с целью нахождения параметров электромагнитного поля дополняется системой уравнений Максвелла описывающих самосогласованное поле [6].

В качестве функции описывающей распределение частиц по скоростям в плазме, задается распределение Максвелла. Начальные и граничные условия представлены в работе [7].

Использование в уравнении (1) интеграла столкновений (2) вызывает значительные сложности в явном решении данной задачи. Поэтому интеграл столкновений (2) можно представить в виде уравнения Фоккера–Планка, записанного для рассматриваемого примера в виде:

$$\frac{\partial f_\alpha}{\partial t} \Big|_{CT} = \frac{1}{2} \frac{\partial^2}{\partial g_r \partial g_v} (f_\alpha \langle \Delta \partial g_r \Delta \partial g_v \rangle_\alpha) - \frac{\partial}{\partial g_r} (f_\alpha \langle \Delta \partial g_r \rangle_\alpha), \quad (3)$$

где $\partial g_r, \partial g_v$ – компоненты скорости частиц в декартовых координатах.

При расчете средних значений прироста в единицу времени компонент скорости α частицы $\langle \Delta \partial \mathcal{G}_r \rangle$ и $\langle \Delta \partial \mathcal{G}_r \Delta \partial \mathcal{G}_v \rangle$ делается предположение, что изменения в скорости есть результат взаимодействий двух частиц, их столкновений, во время которых пространственные корреляционные эффекты не имеют значения. Поэтому выражения для $\langle \Delta \partial \mathcal{G}_r \rangle$ и $\langle \Delta \partial \mathcal{G}_r \Delta \partial \mathcal{G}_v \rangle$ можно представить в виде:

$$\langle \Delta \partial \mathcal{G}_r \rangle_\alpha = \sum_{k=e,c,h} \int f_b(\mathcal{G}'_r) d\mathcal{G}'_r \int \sigma(u, \Omega) u \Delta \mathcal{G}_r d\Omega, \quad (4)$$

$$\langle \Delta \partial \mathcal{G}_r \Delta \partial \mathcal{G}_v \rangle_\alpha = \sum_{k=e,c,h} \int f_b(\mathcal{G}'_r) d\mathcal{G}'_r \int \sigma(u) u \Delta \mathcal{G}_r \Delta \partial \mathcal{G}_v d\Omega,$$

где $u = |\mathcal{G}'_r - \mathcal{G}_r|$; $\mathcal{G}_r, \mathcal{G}'_r$ – скорости частиц до и после столкновения.

Переход к декартовой системе координат с единичными векторами, позволяет вычислить изменения относительной скорости в локальной системе для всех столкновений с помощью интегрирования по углам рассеяния.

Пренебрегая слабой зависимостью от u , получаем:

$$\langle \Delta \partial \mathcal{G}_r \rangle_\alpha = \sum_{b=e,i,h} \int f_b(\mathcal{G}'_r) \{ \Delta \mathcal{G}_r \}_\alpha d\mathcal{G}'_r = \Gamma_\alpha \left(\frac{\partial h_\alpha}{\partial \mathcal{G}_r} \right), \quad (5)$$

$$\langle \Delta \partial \mathcal{G}_r \Delta \partial \mathcal{G}_v \rangle_\alpha = \Gamma_\alpha \left(\frac{\partial^2 g_\alpha}{\partial \mathcal{G}_r \partial \mathcal{G}_v} \right),$$

где Z – коэффициент кратности заряда; Γ_α – коэффициент связанности.

Подставляя в уравнение (3) уравнения (5) получаем уравнение Фоккера-Планка для произвольной функции распределения компонент плазмы α :

$$\frac{1}{\Gamma_\alpha} \left(\frac{\partial f_\alpha}{\partial t} \right)_{CT} = \frac{1}{2} \frac{\partial^2}{\partial \mathcal{G}_r \partial \mathcal{G}_v} \left(f_\alpha \frac{\partial^2 g_\alpha}{\partial \mathcal{G}_r \partial \mathcal{G}_v} \right) - \frac{\partial}{\partial \mathcal{G}_r} \left(f_\alpha \frac{\partial h_\alpha}{\partial \mathcal{G}_r} \right), \quad (6)$$

$$h_\alpha = \sum_b \frac{m_a + m_b}{m_b} \left(\frac{Z_b}{Z_\alpha} \right) \int \frac{f_b}{|\mathcal{G}_\alpha - \mathcal{G}'_\alpha|} d\mathcal{G}'_\alpha,$$

$$g_\alpha = \sum_b \int f_b |\mathcal{G}_\alpha - \mathcal{G}'_\alpha| d\mathcal{G}'_\alpha,$$

где m_a, m_b – массы двух сталкивающихся частиц a и b .

Уравнение (6) можно записать в виде тензоров. Расписывая ковариантные тензорные производные и опуская промежуточные преобразования перехода к декартовой системе координат получим конечное уравнение интеграла столкновений в безразмерном виде:

$$\left(\frac{\partial \hat{f}_\alpha}{\partial t} \right)_{CT} = K_\alpha \left\{ \frac{1}{2} G_\alpha \frac{\partial^2 \hat{f}_\alpha}{\partial \mathcal{G}_r^2} + \tilde{C}_\alpha \frac{\partial \hat{f}_\alpha}{\partial \mathcal{G}_r} + \tilde{R}_\alpha \right\} \quad (7)$$

где $G_\alpha, C_\alpha, R_\alpha$ – матрицы безразмерных коэффициентов размерностью (3×1) ; K_α – параметрический коэффициент.

Итоговая система уравнений (1) описывающих кинетику движения заряженных частиц в трехкомпонентной плазме дугового разряда с учетом интеграла столкновений (7) в безразмерном виде примет вид:

$$\frac{\hat{f}_\alpha}{\partial \hat{t}} + \sqrt{\delta_\alpha} \left\{ \hat{g}_r \frac{\partial \hat{f}_\alpha}{\partial r} + \frac{Z_\alpha}{2 \varepsilon_\alpha} \hat{E}_r \frac{\partial \hat{f}_\alpha}{\partial \mathcal{G}_r} \right\} = K_\alpha \left\{ \frac{1}{2} G_\alpha \frac{\partial^2 \hat{f}_\alpha}{\partial \mathcal{G}_r^2} + \tilde{C}_\alpha \frac{\partial \hat{f}_\alpha}{\partial \mathcal{G}_r} + \tilde{R}_\alpha \right\}, \quad (8)$$

где $\delta_\alpha, \varepsilon_\alpha$ – безразмерные коэффициенты.

Используя метод расщепления, конечная система уравнений разбивается на две вспомогательных задачи: одна определяет перенос частиц, вторая столкновение заряженных частиц, которые решаются последовательно.

Наличие большого количества частиц ($10^{15} \div 10^{17}$ штук) каждой компоненты плазмы, участвующих в расчете на каждом временном шаге, вызывает необходимость использования для численного решения системы уравнений Больцмана-Максвелла метода «крупных частиц» [8], позволяющего снизить объем вычислений и требования к компьютерным ресурсам, за счет уменьшения количества однотипных частиц в расчете, путем их группировки до обоснованного уровня в макрочастицы не влияющей на точность расчетов.

Для выполнения численных расчетов по построенной модели, была использована технологий параллельных вычислений на CPU и GPU [9]. Использование технологии GPU позволило выполнить вычисления неспециализированных потоков на аппаратно-программном комплексе CUDA (Compute Unified Device Architecture) с применением технологии nVidia CUDA [10]. Данная технология позволяет использовать графические процессоры для вычислений общего назначения на одном ПК, что значительно повышает эффективность обработки больших объемов данных без использования суперЭВМ или вычислительных кластеров.

Для решения задачи поиска столкновений частиц был разработан специальный алгоритм, заключающийся в проверке факта пересечения траекторий объектов в пространстве.

1.2 Результаты исследований

В процессе моделирования определялись зоны и состояния удовлетворяющее пространственным и энергетическим условиям вероятного формирования кластерных групп углерода со связями типов C_2 и C_3 , нарастание которых образует линейные углеродные цепочки замыкающиеся

в моноциклические кольца (пентагоны и гексагоны) формирующие выпуклые структуры углерода (фуллерены, нанотрубки) как в плазме, так и на катоде.

Для проведения исследований по модели были выбраны два основных режима синтеза УНС: режим образования катодного депозита с максимальным содержанием нанотрубок (режим «Нанотрубки»)(сила тока дуги 150 А) и режим с максимальным входом фуллеренов осаждающихся на стенки камеры в виде сажи (сила тока 350А)(режим «Фуллерень»). Остальные параметры расчета: межэлектродное расстояние 1 мм, диаметр электродов 12 мм, напряжение между электродами 25 В, давление буферного газа гелия в камере синтеза 400 Торр.

Для подтверждения адекватности модели, была выполнена аналогичная серия экспериментов на лабораторной установке синтеза УНС с автоматизированной системой управления процессом, позволяющей поддерживать постоянные технологические параметры синтеза. Результаты экспериментальных исследований и численных расчетов осаждения частиц углерода на катод в виде депозитного осадка по разработанной модели, при одних и параметрах процесса синтеза представлены на рисунке 1.

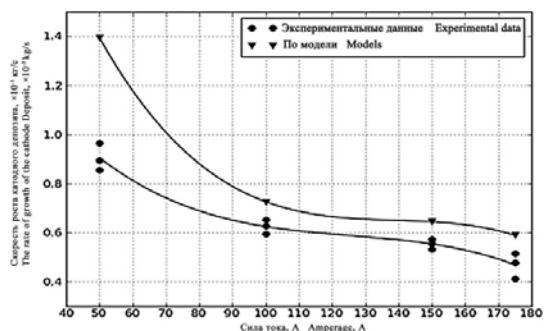
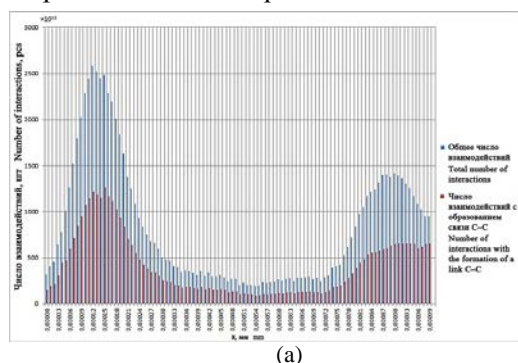


Рисунок 1. Экспериментальные и расчетные значения скорости роста катодного депозита в зависимости от силы тока
Figure 1. Experimental and calculated values of the cathode Deposit growth rate depending on the current strength

Результаты расчета количественных характеристик общих парных взаимодействий



(a)

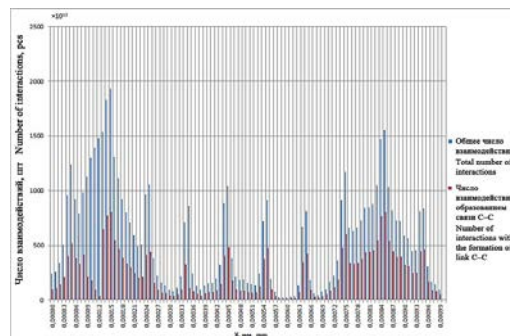
ионов углерода с образованием устойчивых линейных связей C_2 и C_3 в плазме межэлектродного пространства представлены на рисунках 2–4. Временной интервал выполненных расчетов составляет 360 нс.

Общее количество столкновений частиц определяется концентрацией частиц, их скоростью, размером и оказывает непосредственное влияние на образование кластеров. Соотношение числа столкновений с образованием связей к общему числу столкновений в исследованных условиях изменяется не значительно.

Анализ выполненных численных расчетов по модели показывает, что формирование кластерных групп углерода C_2 и C_3 в процессе электродугового синтеза в рассматриваемых режимах происходит во всем межэлектродном пространстве с различной интенсивностью.

Это объясняется различными параметрами электромагнитных полей ускоряющих частицы, температурой плазмы и различными начальными скоростями частиц. Наибольшее количество взаимодействий частиц углерода и соответственно образование устойчивых связей происходит в первой и последней четверти межэлектродного пространства.

На начальном этапе имеется наибольшее количество частиц с относительно невысокой скоростью. И большое количество частиц дает большое число столкновений, часть из которых приводит к образованию устойчивых связей и укрупнению частиц. При движении частицы увеличиваются в размерах за счет образования связей при столкновениях с другими частицами, разгоняются под воздействием электрического поля, но общее количество частиц уменьшается. Количество частиц уменьшается, уменьшается их концентрация, что ведет к уменьшению общего числа столкновений и образованию кластеров. Далее образовавшиеся кластеры разгоняются электромагнитным полем, что приводит к увеличению общего числа столкновений в прикатодной области, а, следовательно, и количества образующихся связей.



(b)

Рисунок 2. Общее число парных столкновений ионов углерода в плазме и образование связей C–C, в режимах синтеза «Нанотрубки»(a) и «Фуллерены»(b)

Figure 2. Total number of paired collisions of carbon ions in plasma and formation of bonds C–C, in the modes of synthesis of «Nanotubes»(a) and «Buckyballs»(b)

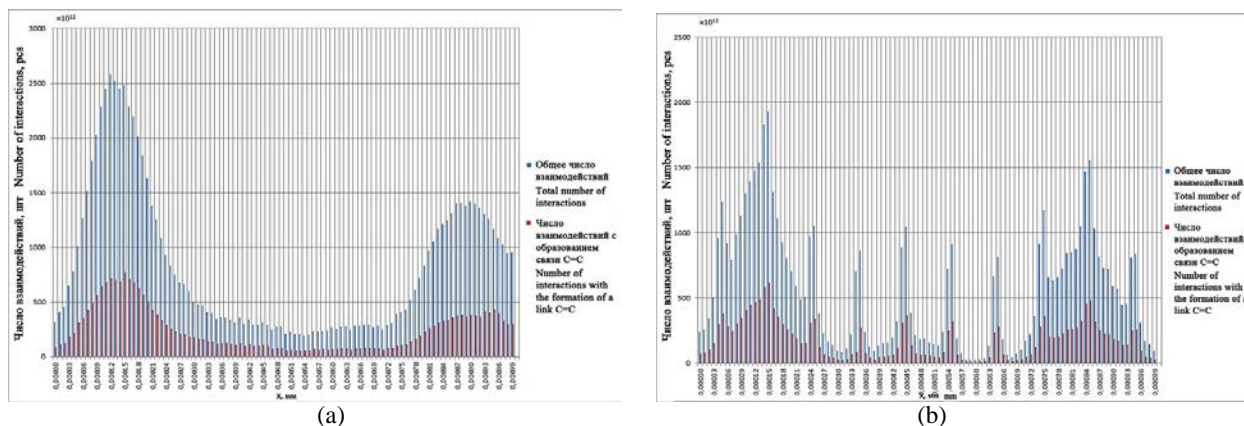


Рисунок 3. Общее число парных столкновений ионов углерода в плазме и образование связей C = C, в режимах синтеза «Нанотрубки» (a) и «Фуллерены» (b)

Figure 3. Total number of paired collisions of carbon ions in plasma and formation of bonds C = C, in the modes of synthesis of «Nanotubes» (a) and «Buckyballs» (b)

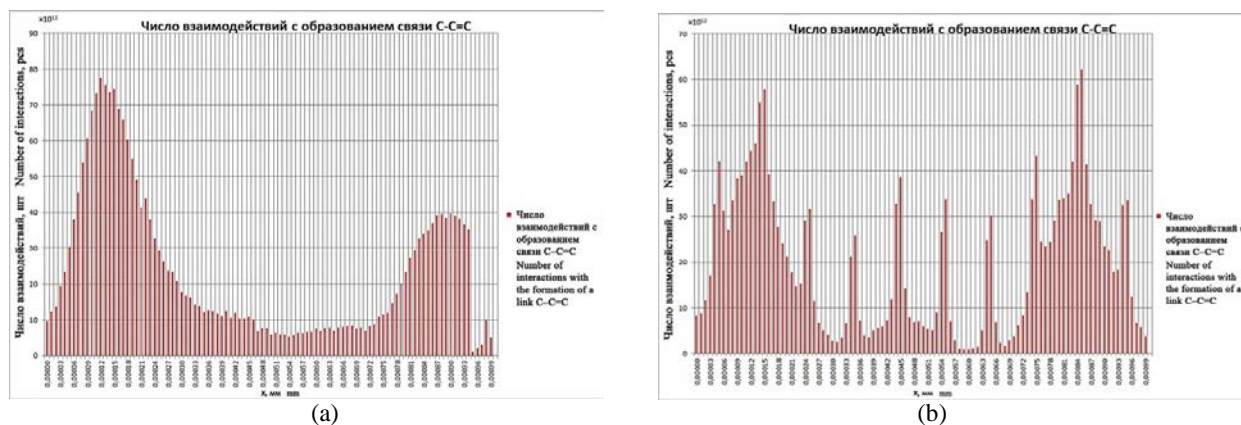


Рисунок 4. Образование связей C=C-C в режимах синтеза «Нанотрубки»(a) и «Фуллерены»(b)

Figure 4. The formation of bonds C=C-C modes of the synthesis of «Nanotubes»(a) and «Buckyballs»(b)

На количество и характер взаимодействий ионов углерода в плазме непосредственное влияние оказывает сила тока дуги, которая определяет в плазме параметры электромагнитного и температурного полей действующих на частицы. Количество образуемых в плазме кластерных групп углерода C₃ по сравнению с C₂ существенно меньше, что объясняется недостаточностью суммарной кинетической энергией взаимодействующих частиц для активации химической связи.

Промежуточные пики столкновений, полученные в режиме «Фуллерены» объясняется дискретностью представления испарения графита с анода при численных расчетах. Однако расчеты показывают, что в данном режиме образование связей между атомами углерода идет более интенсивно идет по всей длине межэлектродного пространства, что приводит к синтезу фуллеренов в плазме, без осаждения на катод.

Таким образом, разработанная модель позволяет моделировать формирование углеродных наноструктур в плазме электродугового разряда с учетом их особенностей синтеза.

Выводы

Предложенная методика моделирования движения и взаимодействия заряженных частиц в многокомпонентной плазме электродугового разряда на основе системы уравнений Больцмана-Максвелла, с учетом парных упругих и неупругих взаимодействий между частицами позволяет учитывать процессы, протекающие в плазме и рассчитывать параметры образующихся межатомных связей.

Выполнены исследования на основе полученной модели количества парных столкновений ионов углерода в плазме с образованием ковалентных связей типа C-C, C=C и C=C-C в различных режимах синтеза, что позволило сделать вывод, что образование кластеров в плазме происходит во всем межэлектродном пространстве с различной интенсивностью и зависит от параметров процесса. Разработанная математическая модель может быть использована при расчете параметров технологического процесса синтеза углеродных наноструктур, а также управлении процессом.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Ершова О.В. Ивановский С.К., Чупрова Л.В., Бахаева А.Н. Современные композиционные материалы на основе полимерной матрицы // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2015. № 4(1). С. 14–18.
- 2 Амиров Р.Х., Исакаев Э.Х., Шавелкина М.Б., Шаталова Т.Б. Синтез углеродных нанотрубок в плазмоструйном реакторе в присутствии катализаторов // Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 3. С. 217–223.
- 3 Дутлов А.Е., Некрасов В.М., Сергеев А.Г., Бубнов В.П. и др. Электродуговой синтез сажи с высоким содержанием высших фуллеренов в «параллельной дуге» // Журнал технической физики. 2016. Т. 86. № 12. С. 99–103.
- 4 Морозов И.В. Моделирование кластерной нано-плазмы методом МД // Наноструктуры. Математическая физика и моделирование. 2011. Т. 5. № 1–2. С. 39–56.
- 5 Галкин В.А. Анализ математических моделей: системы законов сохранения, уравнения Больцмана и Смолуховского. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. 408 с.
- 6 Abramov G.V., Gavrilov A.N. The application of the large particles method of numerical modeling of the process of carbonic nanostructures synthesis in plasma // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. 2018. № 973. P. 012-022. doi: 10.1088/1742-6596/973/1/012022
- 7 Abramov G.V., Gavrilov A.N., Tolstova I.S., Ivashin A.L. Formation of clusters of carbon structures in plasma under thermal destruction of graphite // Nanotechnologies in Russia. March. 2017. V. 12. № 3. P. 139–146. doi: 10.1134/S1995078017020021
- 8 Decyk V.K., Singh T.V. Particle-in-cell algorithms for emerging computer architectures // Computer Physics Communications. 2014. V. 185. № 3. P. 708–719.
- 9 GPGPU.RU Использование видеокарт для вычислений. URL: <http://www.gpgpu.ru>.
- 10 Cook S. CUDA programming. A Developer's Guide to Parallel Computing with GPUs // Morgan Kaufmann. 2013. 576 p.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Александр Н. Гаврилов к.т.н., доцент, кафедра информационных и управляющих систем, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, ganinvrn@yandex.ru

КРИТЕРИЙ АВТОРСТВА

Автор несет ответственность за плагиат

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

ПОСТУПИЛА 10.04.2018

ПРИНЯТА В ПЕЧАТЬ 24.05.2018

REFERENCES

- 1 Ershov O.V. Ivanovskaya K.S., Chuprova L.V., Bagaeva, A.N. Modern composite materials based on polymer matrices. *Mejdunarodni ijurnal prikladnih I fundamentalnih issledovanii* [International journal of applied and fundamental research] 2015. no. 4 (1). pp. 14–18. (in Russian)
- 2 Amirov R.Kh., Isakayev E.Kh., Savelkin M.B., Shatalova T.B. Synthesis of carbo nanotubes in plazmotrona reactor in praesentia catalysts. *Uspehi prikladnoifiziki* [Progreditur in de physical]. 2014. vol. 2. no. 3. pp. 217–223. (in Russian)
- 3 Dutlov A.E., Nekrasov V.M., Sergeev A.G., Bubnov V.P. et al. Electric arc synthesis of soot with a high content of higher fullerenes in a "parallel arc". *Jurnaltehnikeskoiifiziki* [Journal of Technical Physics]. 2016. vol. 86. no. 12. pp. 99–103. (in Russian)
- 4 Morozov I.V. Sculpturae clustered nanoplasma by MD. *Nanostrukturi. Matematicheskaya fizika I modelirovanie* [Nanostructures. Mathematica physicaetsculpturae]. 2011. vol. 5. no. 1–2. pp. 39–56. (in Russian)
- 5 Galkin V.A. Analiz matematicheskikh modelei: sistemi zakono vsokhraneniya uravneniya Bolcmanai Smoluhovskogo. [Analysis mathematica exempla: ratio de conservationeleges, Boltzmann aequationeet Smoluchow skiaequatio]. Moscow, BINOM. Nullascientia, 2009. 408 p. (in Russian)
- 6 Abramov G.V., Gavrilov A.N. The application of the large particles method of numerical modeling of the process of carbonic nanostructures synthesis in plasma. *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series*. 2018. no. 973. pp. 012-022. doi: 10.1088/1742-6596/973/1/012022
- 7 Abramov G.V., Gavrilov A.N., Tolstova I.S., Ivashin A.L. Formation of clusters of carbon structures in plasma under thermal destruction of graphite. *Nanotechnologies in Russia*. March 2017, vol. 12, issue 3, pp. 139–146. doi: 10.1134/S1995078017020021
- 8 Decyk V.K., Singh T.V. Particle-in-cell algorithms for emerging computer architectures. *Computer Physics Communications*. 2014. vol. 185. no 3. pp. 708–719.
- 9 GPGPU.RU In usura GPU pro calculis. (in Russian) Available at: <http://www.gpgpu.ru/>.
- 10 Cook S. CUDA programming. A Developer's Guide to Parallel Computing with GPUs. Morgan Kaufmann. 2013. 576 p.

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Aleksandr N. Gavrilov Cand. Sci. (Engin.), associate professor, information and control systems department, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, ganinvrn@yandex.ru

CONTRIBUTION

The author is responsible for plagiarism

CONFLICT OF INTEREST

The author declare no conflict of interest.

RECEIVED 4.10.2018

ACCEPTED 5.24.2018