

ТЕХНОЛОГИИ

УДК 539.2

**ФОРМИРОВАНИЕ НАНОРАЗМЕРНЫХ КЛАСТЕРОВ
В ПЛОТНОЙ КОМПРЕССИОННОЙ ПЛАЗМЕ**Н.Т. КВАСОВ¹, А.В. ПУНЬКО¹, С.С. КАРАВАЙ¹, И.Л. ДОРОШЕВИЧ¹, Ю.Г. ШЕДКО¹,
Ю.А. ПЕТУХОВ¹, В.В. УГЛОВ², В.М. АСТАШИНСКИЙ³, А.М. КУЗЬМИЦКИЙ³¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь²Белорусский государственный университет
пр. Независимости, 4, 220080, Беларусь³Институт физики НАН Беларуси
пр. Независимости, 70, Минск, 220072, Беларусь*Поступила в редакцию 14 января 2010*

Проведено моделирование процесса образования металлических кластеров в плотной компрессионной плазме. Исследована пространственная структура электромагнитных полей в ускорителе и специфика формирования потока ионизированного газа. Экспериментально обнаружены субмикронные металлические объекты, имеющие фрактальную структуру.

Ключевые слова: плазма, кластеры, наноструктурированные поверхности.

Введение

Наноструктурирование поверхностей и объемов твердых тел позволяет создавать новые материалы, обладающие уникальными физическими характеристиками. Возможность управлять их электрическими, магнитными, тепловыми, оптическими, радиационными, электронно-эмиссионными и др. свойствами является реальной базой для создания нового поколения изделий микро- и нанoeлектроники, устройств для записи и хранения информации со сверхвысокой плотностью и открытия перспективных направлений в ряде других областей науки, техники и технологий.

Особую актуальность в этом бурно развивающемся научно-техническом направлении приобретает разработка плазменных способов генерации наноразмерных частиц с последующим формированием двух- и трехмерных структур.

Методика исследований

В ряде публикаций (см., в частности, [1]) была показана возможность образования металлических и полупроводниковых кластеров с использованием плотной компрессионной плазмы, которая формируется в специальных ускорителях в результате пробоя газа в области пространства между центральным и системой периферийных электродов. При этом движение ионизированного газа происходит в электромагнитных полях, создаваемых разрядными токами.

В целях определения пространственной конфигурации электрического (напряженность \vec{E}) и магнитного (индукция \vec{B}) полей между электродами и в их окрестности проведено ком-

пьютерное моделирование распределения результирующего векторного потенциала $\overset{1}{A}$, формируемого разрядными токами в буферном газе.

$$\overset{r}{C} \overset{r}{\nabla} \overset{r}{A} - \frac{1}{c^2} \overset{r}{\nabla}^2 \overset{1}{A} = - \overset{m_0}{\mu_0} \overset{n}{e} \overset{r}{j}_i, \quad (1)$$

где $\overset{1}{j}_i$ — плотность тока между центральным и одним из периферийных (i -м) электродами; μ_0 — магнитная постоянная; n — число периферийных электродов.

Решение (1) в нашем случае может быть записано следующим образом

$$\overset{r}{A}(\overset{r}{r}, t) = \frac{\overset{m_0}{\mu_0}}{4\pi} \overset{T}{\int} \frac{\overset{1}{j}(\overset{r}{r}', t') d^3 r'}{|\overset{r}{r} - \overset{r}{r}'|}, \quad (2)$$

где $\overset{r}{j} = \overset{n}{e} \overset{r}{j}_i$, $\overset{r}{r}$ — радиус-вектор точки наблюдения.

Интегрирование производится по объему, заполненному зарядами, переносящими ток.

Силовые характеристики электрического и магнитного полей определялись по известным соотношениям:

$$\overset{r}{E} = - \overset{r}{\nabla} \overset{1}{\phi} - \overset{r}{\nabla} \overset{1}{A}, \quad \overset{r}{B} = \overset{r}{\nabla} \overset{1}{A}, \quad (3)$$

Для квазистационарного случая величину $\overset{r}{B}$ можно также получить из закона Био-Савара-Лапласа:

$$\overset{r}{B} = \frac{\overset{m_0}{\mu_0}}{4\pi} \overset{T}{\int} \frac{\overset{r}{B} [d\overset{r}{e} \overset{r}{r}']}{r^3}, \quad (4)$$

где $\overset{r}{B}$ — ток.

Если $\overset{r}{B}$ меняется со временем, то напряженность электрического поля $\overset{1}{E}$ легко получить из уравнения Максвелла

$$\overset{r}{\nabla} \overset{r}{E} = - \overset{r}{\nabla} \overset{r}{B}. \quad (5)$$

На частицу, имеющую заряд q и движущуюся со скоростью $\overset{1}{u}$, действует сила Лоренца $\overset{1}{F}$:

$$\overset{1}{F} = q\overset{1}{E} + q\overset{1}{u} \overset{r}{\nabla} \overset{1}{A}. \quad (6)$$

Из уравнения $m\overset{r}{a} = \overset{1}{F}$ можно рассчитать траекторию движения заряженной частицы.

Мы не учитываем пока в своем рассмотрении давление $p = - \overset{r}{\nabla} \overset{r}{G} \overset{1}{B}_1 dr$, "обжимающее" поток движущегося ионизированного газа (пинч-эффект), так как это требует отдельного рассмотрения ($\overset{r}{G}$ — плотность результирующего тока в плазме, создающего магнитную индукцию $\overset{1}{B}_1$). Не рассматривается также влияние плазмы на структуру поля, созданного разрядными токами.

На рис. 1 представлены распределения величин и направлений вектора $\overset{r}{B}$ в пространстве для случая шести периферийных электродов (длина стрелки пропорциональна $\overset{r}{B}$). Симметрично расположенные разрядные токи предполагаются протекающими в плоскости (x, y), перпендикулярной движению плазмы (ось z). Распределения даны для пяти сечений оси z , от-

стоящих от плоскости разрядных токов на расстояниях 1, 3, 5, 7, 9 см. Насыщенность рисунка и размеры стрелок соответствуют величинам \bar{B} в единицах тесла, приведенным рядом. Как следует из результатов компьютерного моделирования, магнитное поле имеет цилиндрическую конфигурацию, причем сила, действующая на положительно заряженные ионы, отклоняет их траекторию к оси z . Электроны же, движущиеся вдоль положительного направления z , "выметаются" за пределы полевого цилиндра. Структура электрического поля, рассчитанная из (5), показана, в частности, для сечения $z=7$ см и одного фиксированного расстояния r от начала координат (рис. 1).

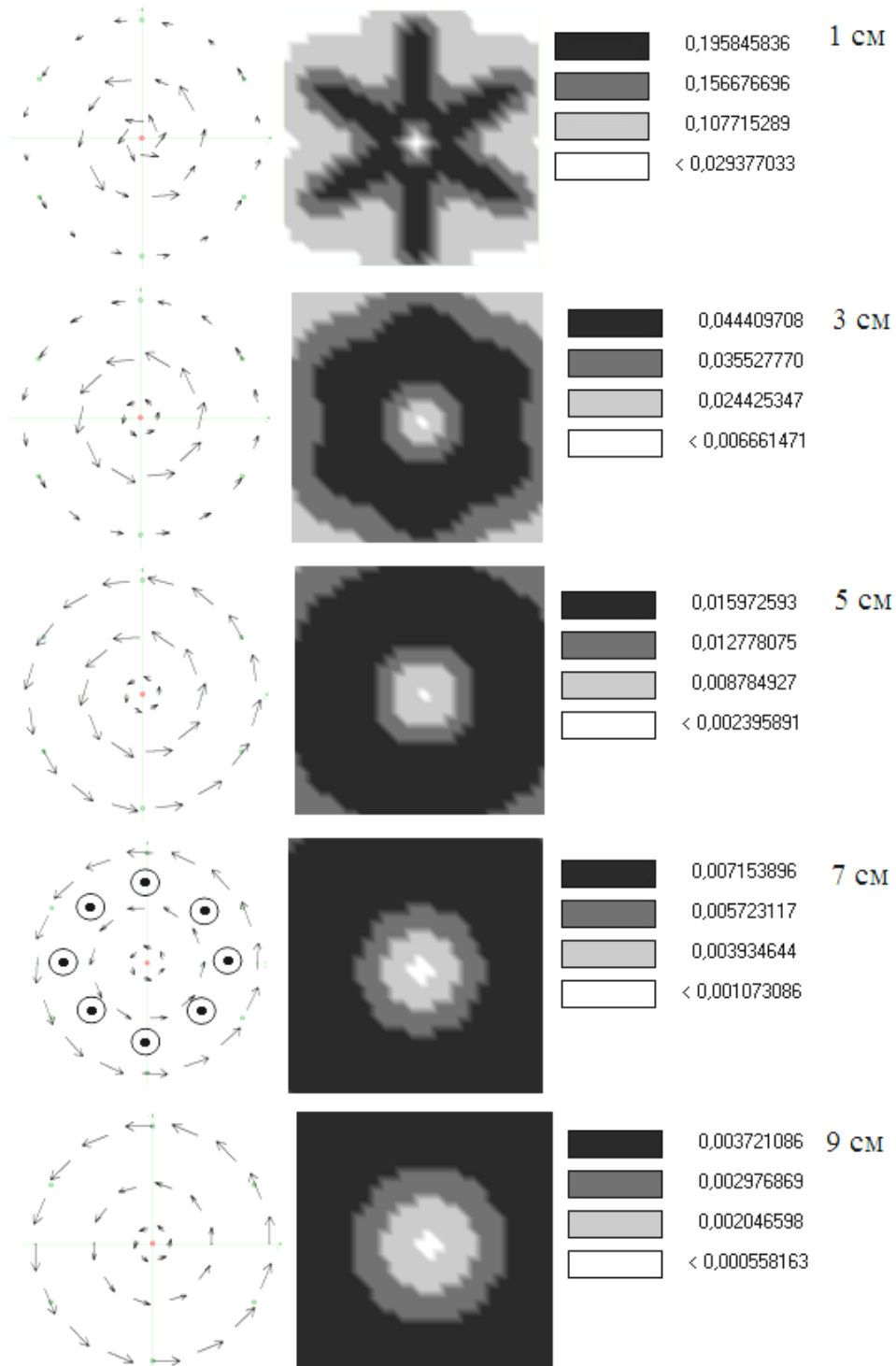


Рис. 1. Структура магнитного поля в ускорителе

Вектор \vec{E} направлен на наблюдателя (острие стрелы в окружности). Из этого следует, что положительно заряженные ионы ускоряются в положительном направлении оси z . На электроны электрическая сила $-e\vec{E}$ действует в противоположном направлении. Скорость плазмы компрессионного потока в зависимости от начальных параметров ускорителя составляет $(4-7) \cdot 10^6$ см/с. Концентрация заряженных частиц плазмы в области максимального сжатия достигает $(5-10) \cdot 10^{17}$ см $^{-3}$, а температура — 1–3 эВ.

Для получения металлического покрытия с помощью электромагнитной системы в поток плазмы вводился металлический порошок. Управление запуском магнитоплазменного компрессора и электромагнитом, притягивающим порошок, осуществлялось микроконтроллерной системой. В качестве подложки в экспериментах использовали монокристаллы кремния с различной ориентацией. Структура и морфология покрытий исследовалась методами растровой электронной и атомно-силовой микроскопии. Состав приповерхностного слоя образцов исследовался методом обратного резерфордовского рассеяния.

В дальнейших исследованиях в лаборатории физики плазменных ускорителей Института физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси был предложен новый способ формирования наноструктурированных покрытий. В этом случае осаждаемый материал "снимается" плазмой с катода разрядного устройства, превращаясь в металлический пар. В условиях пересыщения начинается его нуклеация и осаждение образовавшихся кластеров на подложку.

Теоретические и экспериментальные исследования

Рассмотрим кинетику процесса формирования отдельных кластеров из атомов пара металла. Соответствующие уравнения можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned} \frac{dN_c}{dt} &= dN^2 N_p, \\ \frac{dN}{dt} &= -a_0 n^{2/3} N N_c - dN^2 N_p, \\ \frac{dn}{dt} &= a_0 n^{2/3} N \frac{\delta}{\kappa} - \frac{N_s}{N} \exp\left\{-\frac{A}{3kT} \frac{\delta}{\kappa}\right\} \end{aligned} \quad (7)$$

где $N_c(t)$ — концентрация кластеров; $N(t)$ — концентрация пара свободных металлических атомов; N_p — концентрация частиц плазмы; $n(t)$ — количество атомов в кластере; N_s — концентрация насыщенного пара металла; δ , a_0 , A — константы, характеризующие процесс нуклеации.

Начальные условия при этом определялись как $n(t=0)=2$.

Ввиду высокой температуры плазмы в отличие от [2] здесь учитывалось также испарение атомов металла с поверхности кластера.

На рис. 2 приведена зависимость концентрации кластеров N_c от времени, а на рис. 3 — такая же зависимость от времени числа атомов n в кластере. На рис. 4 представлено распределение медных кластеров по поверхности кремниевой подложки.

В экспериментах нами также были обнаружены более сложные объекты, сформировавшиеся в компрессионной плазме и имеющие фрактальную структуру (рис. 5). В работе [1] нами предполагалось, что взаимодействие между одноименно заряженными кластерами происходит в ударно-сжатом слое за счет изменения диэлектрических свойств среды, когда энергия взаимодействия становится отрицательной. Однако молекулярные силы F , сцепляющие кластеры на малых расстояниях, учтены не были. Такие силы имеют малый радиус действия, и определить их аналитический вид затруднительно.

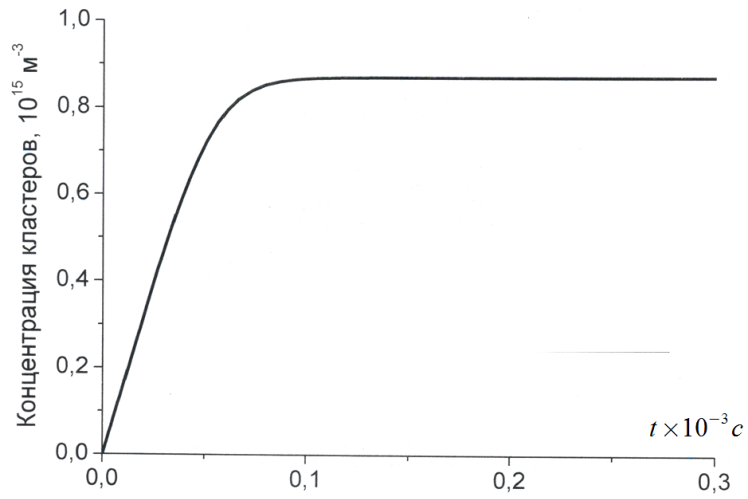


Рис. 2. Временная эволюция концентрации кластеров

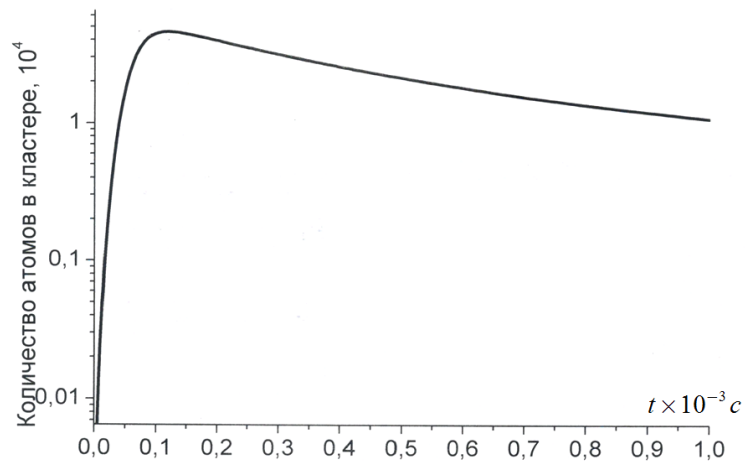


Рис. 3. Временная эволюция количества атомов в кластере

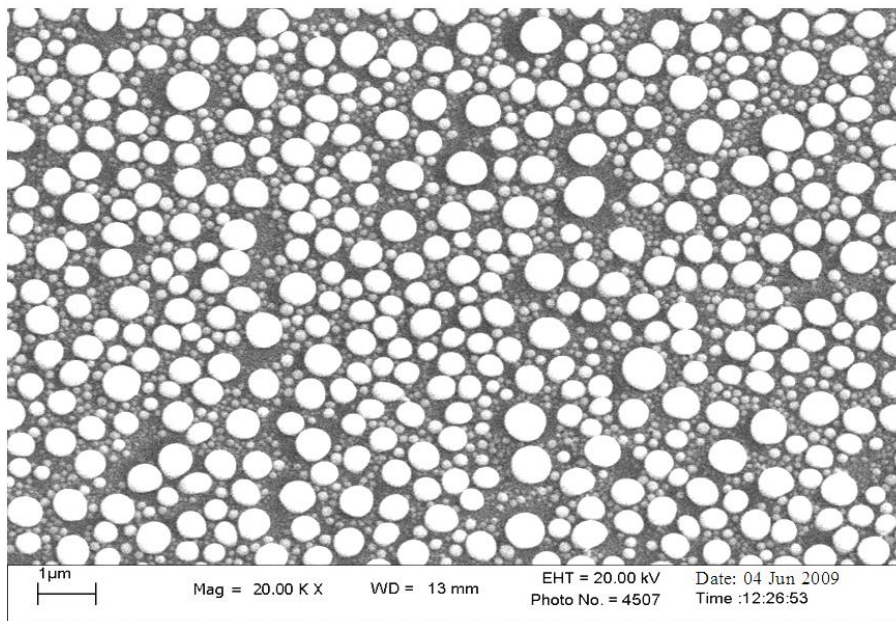


Рис. 4. Металлические кластеры на поверхности кремния

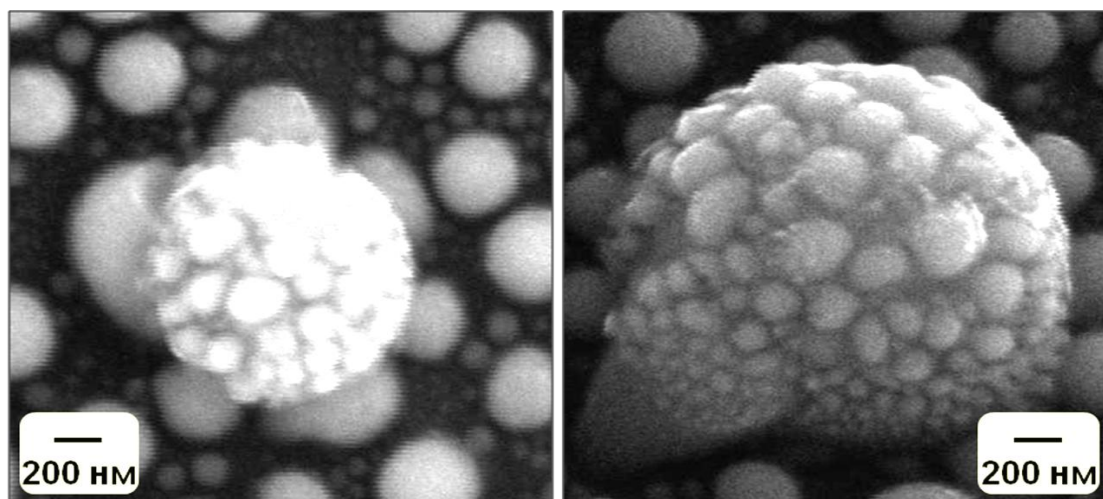


Рис. 5. Фрактальная структура, состоящая из металлических кластеров

Заключение

Использование компрессионной плазмы для создания наноразмерных структур, имеющих различное целевое назначение, открывает широкие перспективы в ряде областей науки, техники и технологий. Различные конструктивные варианты магнитоплазменного компрессора позволяют осаждать любые вещества (металлы, полупроводники, диэлектрики) на любые подложки, а использование современных литографических приемов — создавать различные устройства, элементы которых имеют наномасштабные размеры.

FORMATION OF NANOSIZE CLUSTERS IN DENSE COMPRESSION PLASMA

N.T. KVASOV, A.V. PUNKO, S.S. KARAVAI, I.L. DOROSHEVICH, YU.G. SHEDKO,
YU.A. PETUKHOV, V.V. UGLOV, V.M. ASTASHYNSKI, A.M. KUZMITSKI

Abstract

Some aspects of dense compression plasma formation and means of nanoscale metallic clusters and fractals generating in plasma medium are considered. Nucleation of atoms is analyzed subject to their evaporation from the surface. Corresponding experimental results concerning clusters and fractals deposition on substrates are given.

Литература

1. Квасов Н.Т., Данилюк А.Л., Пунько А.В. и др. // Докл. БГУИР. 2006. № 2 (14). С. 94–102.
2. Смирнов Б.М. // УФН. 2003. Т. 173, № 6. С. 609–648.