

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПОЛУЧЕНИЯ АЭРОЗОЛЬНЫХ НАНОЧАСТИЦ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ГАЗОВОМ РАЗРЯДЕ МЕЖДУ КРЕМНИЕВЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ

П.В. Арсенов, А.А. Ефимов, Д.А. Мыльников, А.А. Лизунова, В.В.Иванов
Московский физико-технический институт, Долгопрудный

В настоящее время существует потребность в получении наночастиц для различных применений в электронике, фотонике и медицине [1]. В связи с этим активно развиваются методы для получения наночастиц. Одним из перспективных методов является метод синтеза наночастиц в импульсном газовом разряде, где частицы получают посредством электрической эрозии материала электродов [2]. Преимуществами данного метода являются: малый размер синтезируемых наночастиц менее 10 нм, высокая химическая чистота, универсальность и широкий выбор материалов для синтеза. Также этот метод является перспективным для создания изделий печатной электроники (активных и пассивных элементов) в качестве источника наночастиц для аэрозольной печати [4]. В тоже время, данный метод имеет ряд недостатков, основными из которых являются: невысокая массовая производительность менее 10 мг/ч и низкая энергоэффективность синтеза наночастиц, порядка 2 кВт*ч/г. Для устранения данных недостатков и раскрытия потенциала метода, в данном исследовании изучалось влияние параметров работы газоразрядного генератора на размер и концентрацию частиц (массовую производительность), а также исследовалась энергоэффективность получения наночастиц при импульсном газовом разряде.

Используемый генератор наночастиц (рис. 1) представляет собой три последовательных пары электродов, между которыми возникает искровой разряд с частотой следования f . Напряжение между электродами U создается конденсатором емкостью C , который заряжается от источника постоянного напряжения и разряжается за время поддержания искрового разряда. Плазма вызывает эрозию материала электродов, локализованную в месте контакта разряда с электродами. Пространство между электродами обдувается потоком газа со скоростью v , который уносит с собой частицы – продукты эрозии электродов, образуя аэрозоль.

По результатам исследования установлено, что с увеличением энергии запасенной в конденсаторе счетная концентрация частиц увеличивается линейно. Как следствие, повышение энергии запасенной в конденсаторе можно использовать как способ для увеличения массовой производительности газоразрядного синтеза. Также установлено, что с повышением частоты следования разрядов, линейно увеличивается общая концентрация частиц. С учетом полученных данных рассчитано, что на один искровой разряд приходится примерно 10^{10} частиц. Таким образом, управляя частотой следования разрядов можно достаточно просто управлять концентрацией получаемых наночастиц, а как следствие, и массовой производительностью синтеза [3]. По результатам измерений определена массовая производительность газоразрядного генератора при работе на кремниевых электродах (при $W = 10$ Дж, $f = 2$ Гц и $v = 3$ м/с), которая составила 26 мг/ч. По выполненным расчетам для достижения оптимальной массовой производительности в 1 г/ч для аэрозольной печати частоту следования разрядов необходимо увеличить до 80 Гц (для кремниевых электродов при $W = 10$ Дж и $v = 3$ м/с).

В работе также измерено энерговыделение (~72%) при импульсном газовом разряде в коротких межэлектродных промежутках в трех-зазорном газоразрядном генераторе. Установлено, что эффективность выделения энергии увеличивается с 21% до 72% при увеличении числа последовательно включенных электродов с 1 до 3, соответственно.

По данным просвечивающей электронной микроскопии (рис. 2), разработанный генератор позволяет синтезировать наночастицы с характерным размером первичных частиц в 5-10 нм и размерами их агломератов порядка 100 нм, получаемых при эрозии электродов из Si с помощью газоразрядного генератора.

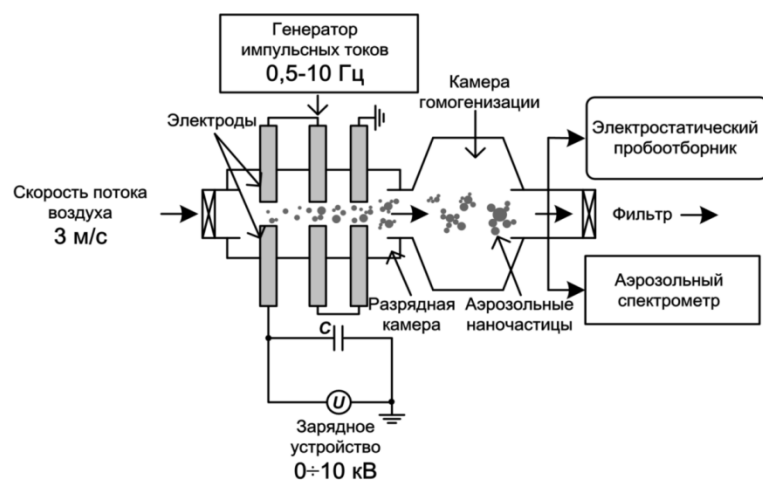


Рис.1 Схема многокамерного газоразрядного генератора для получения наночастиц

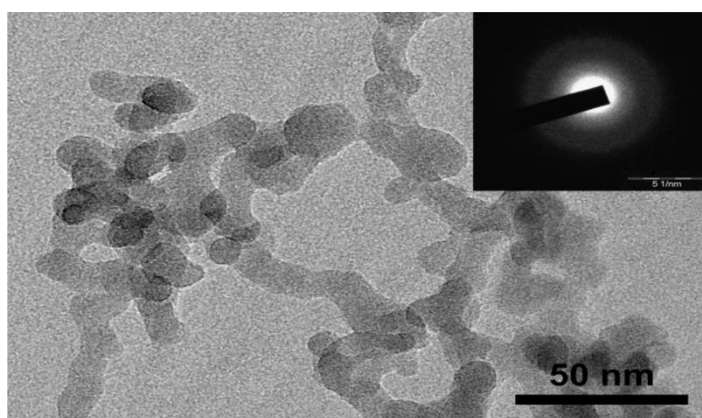


Рис.2 ПЭМ-изображение частиц, получаемых в газоразрядном генераторе аэрозолей ($v = 3,4$ м/с, $W = 8$ Дж и $f = 0.5$ Гц)

Литература

1. *Shipway A.N., Katz E., Willner I.* Nanoparticle Arrays on Surfaces for Electronic, Optical, and Sensor Applications // *ChemPhysChem*. 2000. Vol. 1, № 1. P. 18–52.
2. *Biskos G. et al.* Generation and Sizing of Particles for Aerosol-Based Nanotechnology // *KONA*. 2008. Vol. 26. P. 13–35.
3. *Tabrizi N.S. et al.* Generation of nanoparticles by spark discharge // *J. Nanoparticle Res.* 2008. Vol. 11, № 2. P. 315–332.
4. *Efimov A.A, Lizunova A.A., Volkov I.A., Mylnikov D.A., Arsenov P.V. and Ivanov V.V.* A new approach to the high-yield synthesis of nanoparticles by spark discharge // *Journal of Physics: Conference Series*, 2016. Vol. 741, N. 1.