

ВЛИЯНИЕ МУЛЬТИПОЛЬНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В ПАРЕ МЕДНЫХ НАНОЧАСТИЦ НА РАСЩЕПЛЕНИЕ РЕЗОНАНСА МИ-ФРЕЛИХА

Истомин И. Е. (ФТИ им. Иоффе)

Научный руководитель – доктор физико-математических наук Ястребов С. Г. (ФТИ им. Иоффе)

Введение. Метаматериалы всё чаще используются в различных областях, так как обладают свойствами, не встречающимися в природе. Таким материалом является аморфный углерод, модифицированный металлами. Его можно использовать в таких областях как: коррозионностойкие материалы и оптические покрытия [1]. Свойством этих материалов можно управлять путём внедрения различного количества металлических частиц. При определённых параметрах добавление металлов приводит к образованию наночастиц, в которых появляются поверхностных локализованных плазмонные резонансы [2,3], также известных как резонансы Ми-Фрелиха (МФ).

В работе [4] наблюдалось два пика поглощения со значениями 1,6 eV и 1,8 eV, которые были связаны с наночастицами меди. Однако была возможность объяснить только один пик 1,8 eV, связанный с электростатическим диполь-дипольным взаимодействием пары наночастиц меди. В данной работе исследуется вклад в поглощение взаимодействующими нанокластерами меди мультипольных моментов. Взаимодействие может быть обусловлено электрическими полями, которые создаёт каждая частица под влиянием внешнего поля.

Основная часть.

1) Продемонстрированы ПЭМ изображения, из которых определялись распределения диаметров наночастиц меди и расстояний между наночастицами меди. Так же на основе ПЭМ изображений была сделан вывод, что для дальнейшего моделирования можно считать поверхность наночастиц сферической формы.

2) Продемонстрирован вклад наночастиц меди в спектр поглощения аморфного углерода, модифицированного медью. Спектр в дальнейшем был разложен на две логарифмически нормальных кривых, откуда были определены две резонансные частоты 1,6 eV и 1,8 eV. Сделано предположения, что пики связаны с МФ резонансами в нанокластерах меди.

3) Разработана модель пары электростатически взаимодействующих сферических наночастиц меди. Использовалось уравнение Лапласа для электростатического потенциала. Для получения решения необходимо задать граничные условия: непрерывности потенциала и первой производной на границе каждой сферы, ограниченность внутри сферы, на бесконечности поле от сфер должно равняться нулю. Решение было представлено в сферических координатах в виде разложения на нерегулярные шаровые функции. Из граничных условий получена система уравнений для коэффициентов при шаровых функциях.

4) Выявлено, что диполь-дипольное взаимодействие не обеспечивает возможность сдвига МФ резонанса до 1,6 eV, при диполь-дипольном взаимодействии и расстоянии между частицами $H = 1,5 \text{ \AA}$ частота резонанса становится равной 1,8 eV. При мультипольном взаимодействии частота МФ резонанс сдвигается сильнее и при расстоянии между частицами $H = 1,5 \text{ \AA}$ достигает значения 1,6 eV, также возникает квадрупольный резонанс на частоте 1,95 eV. Учёт мультипольного взаимодействия позволяет при больших расстояниях между частицами достичь частоты резонанса МФ 1,8 eV (расстояние между частицами $H = 4 \text{ \AA}$).

5) Показано, что электростатическое поле концентрируется в просвете между частицами, размер пятна концентрированного поля меньше 1 nm. Также можно отметить, что величина поля для МФ резонанса почти в 200 раз больше величины внешнего падающего поля. Усиление электрического поля для квадрупольного резонанса порядка 170.

Выводы.

Учёт мультипольного взаимодействия между сферическими частицами позволил объяснить возникновение МФ резонанса с частотой 1,6 eV. Для возбуждения резонанса МФ на данной

частоте расстояние между частиц должно быть равным 1.5 Å. Также было выяснено, что происходит возбуждение квадрупольного резонанса при заданном расстоянии с частотой резонанса порядка 1,95 eV. Так же учёт мультипольного взаимодействия позволяет достичь частоты МФ резонанса 1,8 eV при больших значениях расстояний между частицами, чем при диполь-дипольном взаимодействии.

Список использованных источников:

1. A.W. Zia, S.A. Hussain, M.M.F.A. Baig. Optimizing diamond-like carbon coatings - From experimental era to artificial intelligence // *Ceram. Int.* – 2022. – №48(24). – P. 36000-3601. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.10.149>.
2. I.Yaremchuk, Š. Meškiniš, T. Bulavinets, A. Vasiliauskas, M. Andrulevičius, V. Fitio, Ya. Bobitski, S. Tamulevičius. Effect of oxidation of copper nanoparticles on absorption spectra of DLC:Cu nanocomposites // *DRM* – 2019 – №99 – P. 107538. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2019.107538>.
3. S. Tamulevičius, Š. Meškiniš, T. Tamulevičius, H.G. Rubahn, Diamond like carbon nanocomposites with embedded metallic nanoparticles // *Rep. Prog. Phys.* – 2018 – №81(2) – P. 024501. DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-6633/aa966f>
4. I. Istomin, S. Yastrebov and Mahi R. Singh. Splitting of the Mie-Fröhlich resonance in amorphous carbon modified with copper nanoclusters // *Diam. Relat. Mater.* – 2023 – №136 – P. 109962. DOI: [10.1016/j.diamond.2023.109962](https://doi.org/10.1016/j.diamond.2023.109962)