

Изучение резонансных кремниевых и кремниево-золотых наночастиц для эффективного оптического нагрева и одновременного измерения температуры в биологических объектах

Уваров Е.И. (ИТМО), Ярошенко В.В. (ИТМО), Макаров С.В. (ИТМО)

Научный руководитель – PhD Зюзин М.В. (ИТМО), аспирантка Герасимова Е.Н.

Введение.

Фототермическая терапия является методом лечения онкологических заболеваний, заключающимся во введении фоточувствительных материалов в опухоль с последующим её облучением лазером для преобразования излучения в тепло. Однако перегрев клеток может сильно навредить организму, [1] поэтому важно отслеживать температуру внутри клеток и тканей во время оптического нагрева. Одним из способов термометрии в клетках является детектирование сдвига Стоксовой компоненты комбинационного рассеяния света, свойственного кремниевым наночастицам. В то же время кремниевые наночастицы обладают оптически-индуцированными магнитными и электрическими резонансами Ми-типа, [2] что позволяет усилить оптический нагрев, однако при этом они должны обладать узким разбросом по размерам. Это является проблемой, так как кремниевые наночастицы обычно синтезируются методом лазерной абляции, в результате которого получаются наночастицы очень широкого диапазона диаметров. Для преодоления данных ограничений нами были интегрированы плазмонные (золото) и диэлектрические (кремний) наноструктуры в единую гибридную систему, которая позволяет использовать полидисперсные (широкий диапазон диаметров) наноструктуры для одновременных нагрева и термометрии внутри клеток. [3]

Основная часть.

В данной работе сначала нами было проведено математическое моделирование процесса нагрева кремниевых наночастиц, и было заключено, что наиболее эффективный нагрев происходит при диаметре наночастиц в диапазоне 150–180 нм. Далее нами были синтезированы методом лазерной абляции под слоем жидкости кремниевые наночастицы и гибридные наноструктуры, состоящие из кремния с внедренными изолотыми нанокластерами. [4] Суспензия кремниевых наночастиц было разделена на фракции, и для дальнейших экспериментов была выбрана фракция с диапазонами частиц 150-180 нм. Также были проведены *in vitro* эксперименты по изучению поглощения наночастиц клетками при помощи конфокального микроскопа и по определению токсичности методом AlamarBlue. Процент выживаемости клеток понижался на ~40%. при повышении концентрации наночастиц и при облучении лазером (использовался непрерывный He-Ne лазер, $\lambda=633$ нм, $P= 10.1 \cdot 10^5$ Вт/см², максимальная концентрация гибридных наноструктур 10 мкг/мл), что доказывает возможность применения разрабатываемых наноструктур для фототермической терапии. Был исследован нагрев наночастиц вне и внутри клеток V16-F10 с одновременным измерением температуры. Кремниевые наночастицы, нанесенные на стеклянную подложку, грелись до 600°C, тогда как гибридные более чем на 1000°C. В свою очередь, интернализированные в клетках кремниевые наночастицы нагревались до 100°C, тогда как в случае гибридных наночастиц нагрев достигал 160 °C. Значительные различия в нагревательных способностях наночастиц внутри и вне клеток можно объяснить наличием водной среды и соответствующей диссипацией оптического сигнала.

Выводы.

Гибридная наноструктура на основе кремния с внедренными золотыми нанокластерами была сравнена с монодисперсными кремниевыми наночастицами и продемонстрировала более эффективный нагрев как вне, так и внутри клеток.

Список использованных источников:

- [1] Marta Pérez-Hernández Mechanisms of Cell Death Induced by Optical Hyperthermia // *Nanomaterials for Magnetic and Optical Hyperthermia Applications*. - 2019. - Pp. 201-228.
- [2] George P. Zograf, Mihail I. Petrov, Sergey V. Makarov, Yuri S. Kivshar All-dielectric thermonanophotonics // *Advances in Optics and Photonics*. - 2021. - Vol. 13, Issue 3. - Pp. 643-702.
- [3] Elena N. Gerasimova, Egor Uvarov, Vitaly V. Yaroshenko, Olga Epifanovskaya, Alena Shakirova, Lev S. Logunov, Olga Vlasova, Alessandro Parodi, Andrey A. Zamyatnin Jr., Alexander S. Timin, Sergey V. Makarov, and Mikhail V. Zyuzin Single-Step Fabrication of Resonant Silicon–Gold Hybrid Nanoparticles for Efficient Optical Heating and Nanothermometry in Cells // *ACS Applied Nano Materials*. - 2023. - Pp. 18848-18857.
- [4] Stanislav O. Gurbatov, Vladislav Puzikov, Dmitriy Storozhenko, Evgeny Modin, Eugeny Mitsai, Artem Cherepakhin, Alexander Shevlyagin, Andrey V. Gerasimenko, Sergei A. Kulinich, and Aleksandr A. Kuchmizhak Multigram-Scale Production of Hybrid Au-Si Nanomaterial by Laser Ablation in Liquid (LAL) for Temperature-Feedback Optical Nanosensing, Light-to-Heat Conversion, and Anticounterfeit Labeling // *ACS Appl. Mater. Interfaces*. - 2023. - Pp. 3336–3347.