

А.А. БУБНОВ, К.В. ФРОЛОВ, В.Ю. ТИМОШЕНКО

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННЫЙ ФОТОНАГРЕВ И ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ НАНОЧАСТИЦ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ, ЗАГРУЖЕННОГО ЭКЗОГЕННЫМ КРАСИТЕЛЕМ МЕТИЛЕНОВЫМ СИНИМ, ДЛЯ БИМЕДИЦИНСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ

Рассмотрены оптические и фототермические свойства экзогенного красителя метиленового синего различной концентрации. Выполнена загрузка красителя в наночастицы пористого кремния. По фотолюминесценции была проведена оценка выхода препарата из наночастиц при воздействии непрерывного лазерного излучения длиной волны 660 нм. Исследовано влияние импульсного лазерного излучения длиной волны 532 нм и лазерно-индуцированного фотонагрева на величину выхода экзогенного красителя метиленового синего из пор НЧ.

A.A. BUBNOV, K.V. FROLOV, V.YU. TIMOSHENKO

National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

LASER-INDUCED PHOTOHEATING AND PHOTOLUMINESCENCE OF POROUS SILICON NANOPARTICLES LOADED WITH EXOGENOUS DYE METHYLENE BLUE FOR BIOMEDICAL APPLICATION

The optical and photothermal properties of the exogenous dye methylene blue of various concentrations are considered. The dye was loaded into porous silicon nanoparticles. Photoluminescence was used to assess the release of the drug from nanoparticles when exposed to continuous laser radiation with a wavelength of 660 nm. The influence of pulsed laser radiation with a wavelength of 532 nm and laser-induced photoheating on the release of the exogenous dye methylene blue from the pores of NPs was studied.

Быстрое развитие нанотехнологий позволяет активно интегрировать их в различные наукоемкие области: биотехнологии, фармацевтика, биоинженерия и т.д. [1]. Среди всего многообразия применений стоит отметить, что в последние годы использование наночастиц (НЧ) в медицине становится одним из главных трендов данной отрасли [2]. Изготовление НЧ как доставщиков лекарственных препаратов имеет ряд преимуществ: снижение побочных эффектов за счет таргетности и увеличение точности дозирования лекарств при доставке [3]. При этом для целей доставки выгодно использовать пористые наноструктуры, которые способны удерживать лекарственный препарат и высвобождать его в определенном месте организма. Наиболее распространенным материалом, который является основой для таких наноконтейнеров, стал кремний (Si). Среди форм Si для доставки лекарственных препаратов используют пористый кремнезём (pSiO₂) и пористый кремний (pSi) [1,4]. Однако pSi по сравнению с pSiO₂ обладает способностью к фотонагреву при воздействии лазерного излучения, что позволяет применять его не только в качестве наноконтейнера, но и фотоагента локальной лазерно-индуцированной гипертермии [5]. Последнее свойство дает возможность рассматривать pSi в роли доставщика экзогенного красителя метиленового синего, который имеет потенциал для широкого применения в интраоперационной навигации [6].

Целью настоящей работы является исследование лазерно-индуцированного нагрева и фотолюминесценции нанокompозита на основе НЧ pSi, загруженного экзогенным красителем метиленовым синим.

pSi был получен методом электрохимического травления монокристаллического Si (удельное сопротивление 0.005–0.01 Ом·см, электролит HF + этанол в отношении 1:1, плотность тока 50 мА/см²). После проводилось его механическое дробление в спирту для получения НЧ pSi. Далее была проведена загрузка метиленового синего (концентрация 11 мг/мл) в pSi НЧ (концентрация 20 мг/мл). После 4-х фазной очистки методом центрифугирования полученную суспензию загруженных pSi НЧ (объем 200 мкл, концентрация 0.15 мг/мл) облучали непрерывным лазерным излучением мощностью 43 мВт (длина волны 660 нм) и диаметром пятна лазерного луча 4 мм. Для усиления выхода красителя из пор НЧ был использован лазер, работающий в импульсном режиме с длиной волны 532 нм и длительностью импульса <15 нс (максимальная средняя мощность < 20 Вт, диаметр пятна лазерного луча 2 мм). Фотонагрев был измерен тепловизором FLIR-C3 (точность 0.01 °С, частота кадров 9 Гц).

В результате проделанной работы были получены зависимости выхода красителя метиленового синего от времени воздействия лазерного излучения. Было установлено, что слабосвязанный краситель выходит из НЧ в течение 20-30 мин после начала нагрева. Величина выхода составляла 20-30 % при нагреве 3-4 °С. Далее при воздействии на образец импульсным лазерным излучением в комбинации с непрерывным наблюдается рост выхода красителя более чем в 2 раза. В тоже время нагрев составил 5-6 °С. Общий выход красителя за все время облучения составил 0.4 – 0.6 нмоль. Наблюдается усиление выхода красителя из пор НЧ за счет лазерно-индуцированного нагрева.

Таким образом, полученный результат подтверждает предположение о том, что за счет лазерно-индуцированного фотонагрева можно повысить выход красителя метиленового синего в области накопления препарата в организме человека, что усиливает локальную фотогипертермию и фотолюминесценцию.

Список литературы

1. Haidary S. M.; Córcoles E. P.; Ali N. K. Nanoporous Silicon as Drug Delivery Systems for Cancer Therapies // *Journal of Nanomaterials*. 2012, № 2012, p. 15.
2. Mitchell, M.J., Billingsley, M.M.; Haley, R.M. Engineering precision nanoparticles for drug delivery // *Nat Rev Drug Discov*. 2021, № 20, p. 101–124.
3. Jia, L.; Zhang, P.; Sun, H.; Dai, Y.; Liang, S.; Bai, X.; Feng, L. Optimization of Nanoparticles for Smart Drug Delivery: A Review // *Nanomaterials*. 2021, № 11(11), 2790.
4. Kim, J. H.; Cha, B.J; Kim, Y.D.; Seo, H.O. Kinetics and thermodynamics of methylene blue adsorption on the Fe-oxide nanoparticles embedded in the mesoporous SiO₂ // *Advanced Powder Technology*. 2020, № 31 (2), p. 816-826.
5. Fedorov, A.S.; Teplinskaia, A.S. Thermal Properties of Porous Silicon Nanomaterials // *Materials*. 2022. № 15(23), 8678.
6. Cwalinski, T.; Polom, W.; Marano, L.; Roviello, G.; D'angelo, A.; Cwalina, N. Methylene blue-current knowledge, fluorescent properties, and its future use // *J. Clin. Med*. 2020. № 9(11), 3538.