

ТЕПЛОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ НАНОСТРУКТУР С МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ НАНОЧАСТИЦАМИ В НЕСТАЦИОНАРНОМ РЕЖИМЕ ДЛЯ СИСТЕМ ФОТОАКУСТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Л. А. Гаврик

*Белорусский государственный университет, г. Минск;
Luba-gavrik@yandex.ru; науч. рук. – Е. П. Микитчук*

Работа посвящена теоретическому исследованию тепловых режимов фотоакустического преобразователя на основе двумерных металлических наноструктур на торце оптического волокна в окружающей среде (вода, воздух). Установлено, что на тепловые свойства фотоакустического преобразователя оказывает влияние размер и материал наночастиц, плотность заполнения подложки наночастицами, а также тип окружающей среды. Определён диапазон параметров наноструктур, где не происходит перегрева фотоакустического преобразователя. Оценены зависимости температуры в наноструктуре от времени.

Ключевые слова: поверхностная наноструктура; наночастицы, оптическое волокно; фотоакустический преобразователь; ультразвук.

ВВЕДЕНИЕ

Наночастицы (НЧ) и наноструктуры представляют интерес для современной науки. В частности, это связано с возможностью применения НЧ в различных областях: в медицине и фармацевтике для точечной доставки лекарств, в биологии для изучения функциональных клеток, в физике для создания новых солнечных элементов и ультразвуковых генераторов [1–4]. Например, в настоящее время ведутся работы по созданию волоконно-оптических фотоакустических ультразвуковых генераторов [5–7], однако экспериментальные исследования зачастую являются достаточно трудоёмкими, а иногда невозможными, ввиду отсутствия экспериментально-технической базы: затруднительно получить и измерить все возможные комбинации радиусов наночастиц, плотностей заполнения подложки, различных материалов подложек, частиц и сред. Поэтому существует необходимость в проведении компьютерного моделирования для оценки выходных параметров и создания наиболее эффективного широкополосного ультразвукового фотоакустического преобразователя.

В данной работе проводилось моделирование тепловых режимов поверхностных наноструктур с металлическими наночастицами в нестационарном режиме для фотоакустических преобразователей.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОТОАКУСТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Считается, что в оптическом волокне распространяется модулированное лазерное излучение с длиной волны, равной длине волны поглощения этих наночастиц [8, 9]. Из-за модуляции лазерного излучения происходит модулированное тепловыделение в наноструктуре, то есть частицы нагреваются/охлаждаются. Последнее из-за эффекта теплового расширения приводит к увеличению и уменьшению объема, вследствие чего в окружающей среде происходит изменение давления во времени – генерируются звуковые колебания. Рисунок 1 показывает распространение ультразвука в двумерной наноструктуре с металлическими наночастицами на торце оптического волокна в окружающей среде.



Рис. 1. Структура фотоакустического преобразователя с металлическими наночастицами на торце оптического волокна в окружающей среде

Модель, реализованная в программном пакете в CST Studio Suite Student Edition, состоит из трёх материалов и четырёх слоёв. Два слоя выделены для оптического волокна и два для окружающей среды: воды или воздуха. Установлено, что для увеличения вычислительной эффективности возможно использовать слои одного материала с различными вычислительными сетками [9]. Наночастица находится в окружающей среде, основанием касаясь подложки.

В качестве металлических частиц выбирались частицы золота и серебра, так как данные металлы имеют интенсивные максимумы в оптическом спектре и не сильно подвержены влиянию окружающей среды. Считалось, что в оптическое волокно введено лазерное излучение с длиной волны 520 нм для случая с частицами золота и 445 нм для серебряных наночастиц. Диаметр оптического волокна составлял 125 мкм, причем плотность заполнения подложки торца оптического волокна изменялась от 10 % до 70 % (большее заполнение подложки не целесообразно, что связано с тем, что наночастицы начинают перекрываться). Радиусы наночастиц изменялись в диапазоне от 10 нм до 50 нм, причем поглощенная наночастицами мощность составила 50 мВт.

На рис. 2 приведены зависимости максимальной температуры в наноструктуре: с наночастицами Ag и Au в воде и воздухе. Видно, что для всех рассмотренных комбинаций параметров максимальная температура

в наноструктуре уменьшается с увеличением плотности заполнения поверхности при постоянном радиусе наночастиц. При этом окружающая среда также оказывает влияние на температуру наноструктуры. Например: для наночастиц с радиусом 20 нм в воде температура не достигает 90 °С, а в воздухе превышает 400 °С. Работа преобразователя возможна в определённом диапазоне температур, который в воздухе ограничен температурами плавления металлов, а в воде – температурой кипения. Для наночастиц серебра и золота длительности переходных процессов и максимальные температуры составляют близкие значения, так как эти металлы имеют близкие значения объёмной теплоемкости.

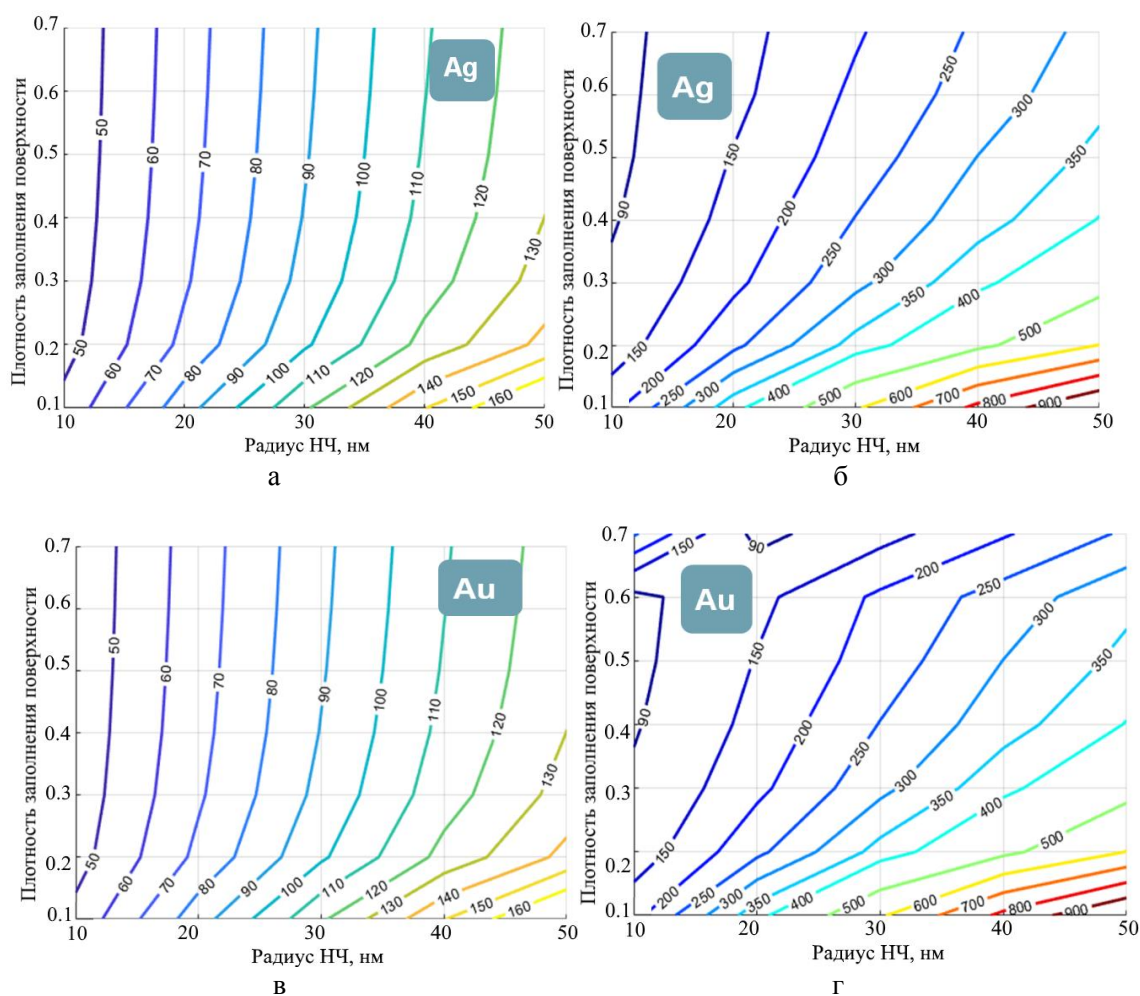


Рис. 2. Максимальная температура в наноструктуре:

- а) с наночастицами Ag в воде, б) с наночастицами Ag в воздухе,
в) с наночастицами Au в воде, г) с наночастицами Au в воздухе

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате моделирования установлено, что максимальная температура в наноструктуре, находящейся в воздухе или воде, уменьшается с

увеличением плотности заполнения поверхности при постоянном радиусе наночастиц. Установлено, что на тепловые свойства фотоакустического преобразователя оказывает влияние размер и материал наночастиц, плотность заполнения подложки наночастицами, а также тип окружающей среды. Определён диапазон параметров наноструктур, где не происходит перегрева фотоакустического преобразователя. Также в работе оценены зависимости температуры в наноструктуре от времени.

Библиографические ссылки

1. Biagi, E., Margheri F., Menichelli D. Efficient laser-ultrasound generation by using heavily absorbing films as targets // IEEE Trans. on ultrason., ferroel., and freq. control. 2001. Vol. 48, №. 6. P. 1669–1679.
2. Characterization of a broadband all-optical ultrasound transducer—from optical and acoustical properties to imaging / Hou Yang [et. al.] // Appl. Phys. Lett. 2007. Vol. 91. Art. № 073507.
3. Fiber optic ultrasound transmitters and their applications. Measurement / Nan Wu [et al.] // Measurement. 2016. Vol. 79. P. 164–171.
4. Hu Chennan, Yu Zhihao, Wang Anbo An all fiber-optic multi-parameter structure health monitoring system // Optics Express. 2016. Vol. 24, № 18. P. 20287–20296.
5. Broadband miniature fiber optic ultrasound generator / X. Zou [et. al.] // Opt. express. 2014. Vol. 22, № 15. P. 18119– 8127.
6. Design and fabrication of nanoscale ultrasonic transducers / R. Smith [et al.] // Journal Phys. Conf. Ser. 2011. Vol. 278. Art. № 012035.
7. Localized surface plasmon resonance for optical fiber-sensing applications / P. J. Rivero [et al.] // Nanoplasmonics – Fundamentals and applications. Rijeka, 2017. P. 399–429.
8. Микитчук Е. П., Козадаев К. В. Моделирование оптических свойств поверхностных наноструктур для фотоакустических преобразователей // Квантовая электроника. 2018. Т. 48, № 7. С. 630–636.
9. Mikitchuk A. P., Kozadaev K. V. Photoacoustic generation with surface noble metal nanostructures // Semiconductors. 2018. Vol. 52, № 14. P. 1839–1842.