

ВЛИЯНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ И ПОДЛОЖКИ НА ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АКТИВНОГО СЛОЯ С НАНОЧАСТИЦАМИ СЕРЕБРА В СОСТАВЕ ФОТОАКУСТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

Работа посвящена определению параметров наноструктуры в составе фотоакустического излучателя, обеспечивающих высокий коэффициент поглощения и ширину спектральной полосы поглощения по уровню 0.9 от максимальной интенсивности в оптическом спектре поглощения. Для изучения зависимости оптических параметров активного слоя в составе фотоакустического излучателя от свойств подложки и окружающей среды исследовались спектры типичных наноструктур в виде монослоя наночастиц Ag на подложках с различными показателями преломления.

В современных системах технической и биомедицинской диагностики существует стойкая необходимость в компактных, размером до нескольких сотен микрон, широкополосных источниках ультразвука, которые позволяют с высокой точностью выявлять пространственное положение, структуру дефекта или на рушения конструкции исследуемого объекта [1, 2]. Ранее продемонстрировано, что фотоакустические излучатели на основе наноструктур, размещенных на поверхности твердого тела, облучаемые модулированным оптическим излучением, позволяют формировать ультразвуковые сигналы с частотой до десятков мегагерц [3, 4]. Такой фотоакустический излучатель в обязательном порядке содержит активный слой: монослой наночастиц (НЧ), нанесенный на поверхность твердого тела. Для обеспечения широкополосного преобразования модулированного по интенсивности оптического излучения в акустический сигнал необходимо выполнение целого ряда требований, одним из которых является обеспечение высокого коэффициента поглощения активным слоем в широком диапазоне длин волн [4, 5]. В общем случае характеристики полосы поглощения, определяемой эффектом поверхностного плазмонного резонанса (ППР) нв НЧ, например, ее спектральное положение и форма, сильно зависят от материала и морфологии наночастиц, которые являются составной частью фотоакустического излучателя, при этом, диэлектрическая система с НЧ, также играют немаловажную роль [6].

Целью является определение параметров наноструктуры в составе фотоакустического излучателя, обеспечивающих высокий коэффициент поглощения и ширину спектральной полосы поглощения по уровню 0.9 от максимальной интенсивности в оптическом спектре поглощения. Для изучения зависимости оптических параметров активного слоя в составе фотоакустического излучателя от свойств подложки и окружающей среды исследовались спектры типичных наноструктур в виде монослоя НЧ Ag с радиусом $r = 25$ нм и плотностью заполнения поверхности $\rho = 50\%$ на подложках с различными показателями преломления в диапазоне $1 \div 3$ в окружающей среде с показателями преломления в диапазоне $1 \div 2$ в конфигурации, когда излучение падает на наноструктуру со стороны НЧ и подложки.

С помощью метода конечных элементов проводился теоретический расчет спектров поглощения наноструктур в составе фотоакустического излучателя для различных значений показателей преломления подложки и окружающей НЧ среды, что необходимо для обеспечения стабильной работы фотоакустического излучателя в различных технических и биологических средах. Параметры спектральной полосы поглощения для различных значений показателей преломления подложки и окружающей НЧ среды образуют двумерные поверхности, далее которые представлены и анализированы в виде линий уровня.

На рисунке 1 приведена длина волны спектрального максимума поглощения для наноструктуры на основе сферических НЧ серебра с радиусом 25 нм при плотности заполнения ими подложки 50%, рассчитанная в зависимости от показателей преломления подложки и

окружающей НЧ среды. Независимо от направления падения излучения, наблюдается следующее: 1. максимум пика ППР сдвигается в длинноволновую область с увеличением показателя преломления подложки с коэффициентами $1,7 \div 7$ нм на единицу изменения показателя преломления подложки в зависимости от величины показателя преломления среды; 2. для диапазона длин волн $350 \div 500$ нм максимум пика ППР сдвигается в длинноволновую область с увеличением показателя преломления среды с коэффициентом ~ 75 нм на единицу изменения показателя преломления. Таким образом, увеличение показателя преломления окружающей среды в большей степени влияет на длинноволновый сдвиг максимума пика ППР, чем увеличение показателя преломления подложки. Это связано с особенностями формирующегося распределения поля в окружающей среде и подложке.

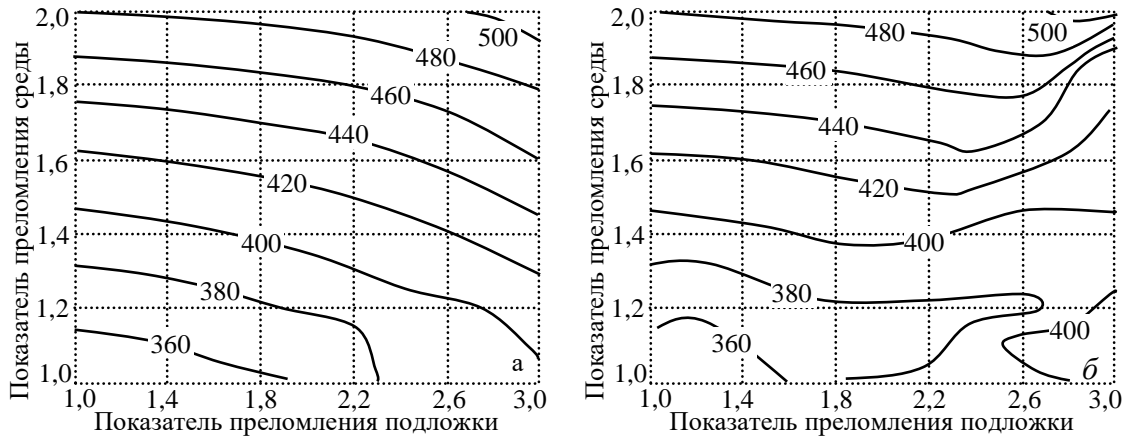


Рисунок 1 – Длина волны спектрального максимума поглощения для наноструктуры на основе сферических НЧ серебра радиусом 25 нм при плотности заполнения ими подложки 50%, рассчитанная в зависимости от показателей преломления подложки и окружающей НЧ среды: излучение падает со стороны НЧ (а) и со стороны подложки (б)

На рисунке 2 приведена зависимость ширины пика ППР по уровню 0,9 в спектре коэффициента поглощения от показателей преломления подложки и окружающей среды. Можно выделить следующие особенности данной зависимости, где показатели преломления окружающей среды $n_{surround}$ и подложки n_{surf} . 1. $1 \leq n_{surround} \leq 1,6$ и $1 \leq n_{surf} \leq 2,1$ (излучение падает со стороны НЧ) и $1 \leq n_{surround} \leq 1,7$ и $1 \leq n_{surf} \leq 1,8$ (излучение падает со стороны подложки) ширина пика ППР по уровню 0,9 в спектре поглощения изменяется незначительно в диапазонах 25–35 нм и 30–40 нм соответственно; 2. $1,6 < n_{surround} \leq 2$ (излучение падает со стороны НЧ), $1,7 < n_{surround} \leq 2$ (излучение падает со стороны подложки) и $1 \leq n_{surf} < 2,4$ имеет место монотонное сужение пика ППР от 45 нм и 30 нм соответственно до 20 нм при увеличении n_{surf} ; 3. $1,6 < n_{surround} \leq 2$ (излучение падает со стороны НЧ), $1,7 < n_{surround} \leq 2$ (излучение падает со стороны подложки) и $2,4 \leq n_{surf} \leq 3$ характерно немонотонное изменение ширины пика ППР по уровню 0,9 в диапазоне значений от 20 нм до $50 \div 60$ нм, что связано с особенностями коллективных взаимодействий в системе «НЧ-соседние НЧ-подложка-окружающая среда» для структур с большим показателем преломления подложки и окружающей среды.

Независимо от направления падения излучения на наноструктуру, с увеличением показателя преломления подложки при $n_{surround} = \text{const}$ характерно монотонное увеличение коэффициента поглощения в максимуме пика ППР. Увеличение коэффициента поглощения достигает значения $\sim 0,05$ на единицу изменения показателя преломления подложки (для случая, когда $n_{surround} = 2$ и излучение падает со стороны подложки). При увеличении показателя преломления окружающей среды (при $n_{surf} = \text{const}$) имеет место изменение величины максимума коэффициента поглощения в пике ППР на величину $\sim 0,09$ (излучение падает со стороны НЧ) и $0,075$ (излучение падает со стороны подложки) на единицу изменения показателя преломления окружающей среды. Из анализа зависимостей следует, что на оптические свойства поглощения наноструктур в монослое металлических НЧ на подложке оказывает большее значение изменение показателя преломления среды, чем подложки.

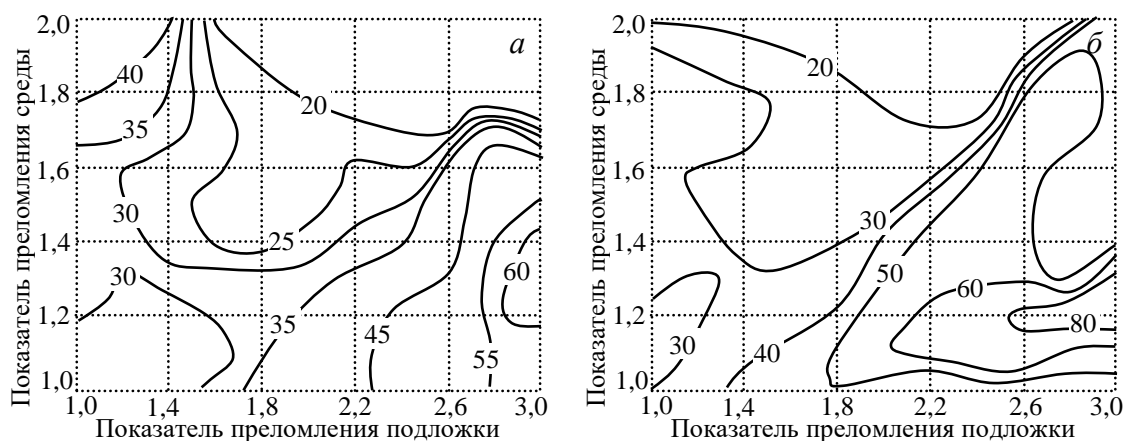


Рисунок 2 – Ширина по уровню 0.9 спектрального максимума поглощения для наноструктуры со сферическими НЧ серебра с радиусом 25 нм при плотности заполнения ими подложки 50%, рассчитанная в зависимости от показателей преломления подложки и окружающей НЧ среды: излучение падает со стороны НЧ (а) и со стороны подложки (б)

В работе продемонстрировано, что показатель преломления окружающей среды оказывает большее влияние на оптические параметры активного слоя фотоакустического излучателя, чем показатель преломления подложки не зависимо от того, с какой стороны падает излучение на наноструктуру. Это проявляется в больших весовых коэффициентах при сдвигах максимумов пиков ППР, изменениях ширины пиков ППР и значений интенсивностей на единицу изменения показателя преломления, при прочих равных условиях, что связано с тем, что на пространственное распределение напряженности электрического поля в системе «НЧ-соседние НЧ-подложка-окружающая среда» большее влияние оказывает окружающая среда, которая имеет большую площадь соприкосновения с НЧ, чем подложка. Следует отметить, что изменение показателя преломления окружающей среды в большей степени влияет на поведение линий уровня (в частности, на положение максимума пика ППР, ширину по уровню 0,9, коэффициент поглощения) в оптических спектрах поглощения, что значительно снижает требования к используемому типу оптического волокна или подслоя на торце последнего, используемого в составе фотоакустического излучателя.

Список литературы

1. Mikitchuk, A. P. Current state of the research on optoacoustic fiber-optic ultrasonic transducers based on thermoelastic effect and fiber-optic interferometric receivers / A. P. Mikitchuk, E. I. Girshova, V. V. Nikolaev // *Computer Optics*. – 2023. – in press.
2. Efficient photoacoustic conversion in optical nanomaterials and composites / Taehwa Lee [et al.] // *Advanced Optical Materials*. – 2018. – Vol. 6, № 24. – P. 1800491–1800491.
3. Prospects for using organic and metal– polymer materials in optoacoustic generators of ultrasound / E. I. Girshova [et al.] // *Bulletin of the Russian academy of sciences: Physics*. – Vol. 86, №7. – 2022. – P. 833–836.
4. Hybrid metal polymer as a potential active medium of an optoacoustic generator / E. I. Girshova [et al.] // *Technical Physics Letters*. – 2022. – Vol. 48, № 2. – P. 32–35
5. Mikitchuk, A. P. Thermophysical and mechanical properties of active membranes for photoacoustic generators of forced acoustic oscillations / A. P. Mikitchuk, E. I. Girshova, M. M. Kugeiko // *Technical Physics Letters*. – 2022. – Vol. 48, № 4. – P. 50 – 53.
6. Zou Xiaotian, Wu Nan, Tian Ye, Zhang Yang, Wang Xingwei Polydimethylsiloxane thin film characterization using all-optical photoacoustic mechanism // *Applied Optics*. – 2013. – Vol. 52. – P. 6239–6244.