

НАНОСТРУКТУРЫ

Моделирование оптических свойств поверхностных наноструктур для фотоакустических преобразователей

Е.П.Микитчук, К.В.Козадаев

Статья посвящена разработке компьютерной модели и теоретическим исследованиям наноструктур в виде двумерного монослоя наночастиц (НЧ) благородных металлов на поверхности торца оптоволокна. Осуществлен подбор параметров фотоакустических преобразователей на основе наноструктур для различных окружающих сред с целью обеспечения высокого коэффициента поглощения оптического излучения, что, в свою очередь, обеспечивает наиболее эффективную генерацию ультразвука. Установлено, что эффективное фотоакустическое преобразование может быть достигнуто в поверхностной наноструктуре из сферических НЧ золота на торце оптического волокна в воде в широком диапазоне микроскопических параметров наноструктуры. Показано, что в случае резонансного поглощения оказывается также большим коэффициент обратного отражения, вследствие чего при построении фотоакустических генераторов необходимо обеспечить оптическую изоляцию применяемого лазера.

Ключевые слова: фотоакустическая генерация, поверхностная наноструктура, монослой металлических наночастиц, оптическое волокно, поверхностный плазмонный резонанс, электромагнитное моделирование.

1. Введение

Повышение интенсивности исследований в области фотоакустической ультразвуковой генерации обусловлено широким спектром возможных применений генераторов широкополосных ультразвуковых сигналов для диагностики различных сред [1–5]. Например, применения в биологии и медицине связаны с необходимостью получения изображений с высоким разрешением при эндоскопических, внутрисосудистых и офтальмологических исследованиях [1, 6], а также при анализе белков и клеток в лабораторных условиях [7, 8]. Не менее важными являются промышленные применения таких генераторов для неразрушающего контроля дефектов деталей, а также для контроля сложных паянных узлов [9–12]. Генерация широкополосных ультразвуковых сигналов может наблюдаться при облучении тонких поглощающих сред мощным модулированным лазерным излучением [13]. Воздействие излучения вызывает циклы расширения–сжатия фотоакустического материала, которые порождают акустические волны в среде, окружающей преобразователь. При этом однородность фронта формируемой акустической волны существенно зависит от толщины поглощающего слоя, поэтому для большинства практических применений фотоакустики необходимо обеспечить поглощение падающего лазерного излучения в максимально тонком слое фотоакустического преобразователя.

Перспективным направлением конструирования ультразвуковых генераторов является разработка волоконно-оптических фотоакустических преобразователей, имеющих ряд преимуществ: компактные размеры и малый

вес (сотни микрометров и доли грамма), высокая устойчивость к электромагнитным помехам, широкая полоса рабочих частот, диэлектрическое исполнение, механическая гибкость, высокая химическая стойкость [13]. Не менее существенным также является качество пучка на выходе оптического волокна (параметр M^2 , фактор близости пространственного распределения плотности мощности в лазерном пучке к гауссову, должен быть близким к единице). Следует отметить, что последнее возможно для одномодового оптического волокна с ультраполированным торцом, строго перпендикулярным оси волокна (современные оптические волокна с W-структурой профиля показателя преломления обеспечивают качество пучка на выходе оптического волокна $M^2 < 1.02$) [14].

Для минимизации толщины слоя фотоакустического материала в волоконно-оптических ультразвуковых преобразователях в качестве поглощающей среды можно использовать поверхностные наноструктуры в виде двумерных массивов наночастиц (НЧ) благородных металлов [13]. Такие наноструктуры имеют огромное аспектное отношение (отношение продольных размеров и толщины) и достаточно высокую фотостойкость (оптическое излучение не вызывает деградации поглощающего слоя НЧ), а необходимый коэффициент поглощения на длине волны падающего лазерного излучения достигается благодаря эффекту поверхностного плазмонного резонанса (ППР) [13]. Синтез подобных структур из НЧ благородных металлов (Ag, Au, Pt, Pd) возможен методами химического осаждения, оптического размещения [15], вакуумного [16] или атмосферного лазерного напыления [17, 18].

Следует отметить, что такие структуры, как правило, используются в жидкой среде, например в воде или в биологических жидкостях, поскольку в жидкости ультразвуковой сигнал затухает намного медленнее, чем в воздухе [13]. В качестве механического защитного слоя для НЧ на оптическом волокне обычно применяют различные полимеры [2–5]. Однако в тех случаях, когда погружать в жид-

Е.П.Микитчук, К.В.Козадаев. Белорусский государственный университет, Республика Беларусь, 220030 Минск, просп. Независимости, 4; e-mail: m.helenay@yandex.by

Поступила в редакцию 4 февраля 2018 г., после доработки – 9 апреля 2018 г.

кость исследуемый образец нельзя, ультразвуковой преобразователь прикладывают непосредственно к твердому телу, так, чтобы оставалась минимальная прослойка воздуха [9].

Формирование экспериментальных образцов в процессе поиска оптимальной наноструктуры для фотоакустических преобразователей является весьма затратным и длительным процессом. Значительно упростить процедуру подбора требуемых параметров наноструктурированной рабочей поверхности торца оптоволокна позволяет компьютерное моделирование ее оптических свойств [19, 20]. Настоящая статья посвящена разработке компьютерной модели и теоретическим исследованиям наноструктур в виде двумерного монослоя НЧ благородных металлов на поверхности торца оптического волокна, а также подбору параметров фотоакустических преобразователей на основе наноструктур для различных окружающих сред с целью реализации высокого коэффициента поглощения оптического излучения, что, в свою очередь, обеспечивает наиболее эффективную генерацию ультразвука.

2. Компьютерное моделирование поверхностных наноструктур и сходимость методов моделирования

Моделирование рабочей области фотоакустического преобразователя (рис.1), состоящей из подложки (торца оптического волокна) с поверхностным массивом монодисперсных металлических НЧ различной формы в окружающей среде (рассматривались воздух и вода), выполнялось в программном пакете CST Microwave Studio SE. Моделирование проводилось для случая однородного возбуждения наноструктур оптическим излучением, что приближенно справедливо для центра пятна моды одномодового оптического волокна (расчеты осуществлялись для одномодовых оптических волокон видимого диапазона, примерами которых могут служить оптические волокна марки Corning RGB 400 или FiberCore SM450). Следует отметить, что рассматриваемый программный пакет исторически развивался как средство моделирования структур и антенн для СВЧ диапазона [21]. По этой причине вычислительные алгоритмы оптимизированы для расчета матриц рассеяния электромагнитного излучения (*S*-параметров), которые связывают падающие и отраженные волны в произвольном комплексном тракте [22].

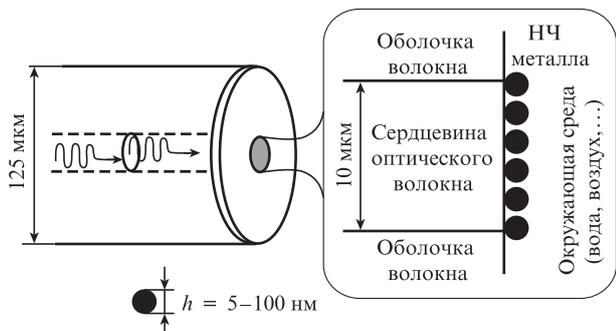


Рис.1. Исследуемая наноструктура: на поверхность подложки (одномодового оптического волокна) нанесены металлические НЧ; показаны размеры сердцевины оптического волокна и сферических НЧ.

Модельная элементарная ячейка минимального размера, отвечающая единичной решеточной точке структуры с трансляционной симметрией в двух измерениях, состоит из двух соприкасающихся параллелепипедов, один из которых образован материалом подложки, а второй содержит НЧ и окружающую среду (рис.2). При этом НЧ располагаются на границе раздела параллелепипедов, своим основанием касаясь подложки. Полуубесконечные (в направлении, перпендикулярном границе раздела) слои подложки и окружающей среды моделируются с использованием поглощающих граничных условий, реализованных в данном случае с помощью портов Флоке, которые в программном пакете CST Microwave Studio SE представляют собой идеально согласованные слои (за пределами моделируемого объема располагается несколько слоев дополнительных ячеек, поля в которых вычисляются с учетом больших виртуальных потерь) [23, 24].

Протяженная в направлениях осей *x* и *y* плоская структура реализуется с помощью граничных условий элементарной ячейки, когда трансляция осуществляется в двух измерениях до бесконечности. При использовании метода конечных интегралов (finite integral technique), реализованного в программном пакете CST Microwave Studio SE, это позволяет учитывать коллективные взаимодействия во всей системе: НЧ – соседние НЧ – подложка – окружающая среда; таким образом, выполняется полное электромагнитное моделирование структуры [25]. Следует отметить, что использование граничных условий для элементарной ячейки дает возможность учесть в общем случае мультипольное взаимодействие в ансамбле периодически расположенных НЧ.

При расчетах применяется тетраэдрическая сетка пространственной дискретизации, которая является наиболее точной при заданных граничных условиях элементарной ячейки [20, 25, 26]. С целью уменьшения влияния параметров сетки дискретизации на результаты моделирования для каждого типа наноструктуры необходимо проводить итерационные расчеты с увеличением густоты расчетной сетки до тех пор, пока результаты не перестанут зависеть от этого параметра.

В ряде предыдущих работ, посвященных исследованию электромагнитных свойств подобных наноструктур с помощью пакета CST Microwave Studio SE, авторы использовали анализ результирующего электромагнитного поля в дальней зоне [19, 20, 25]. Расчеты характеристик

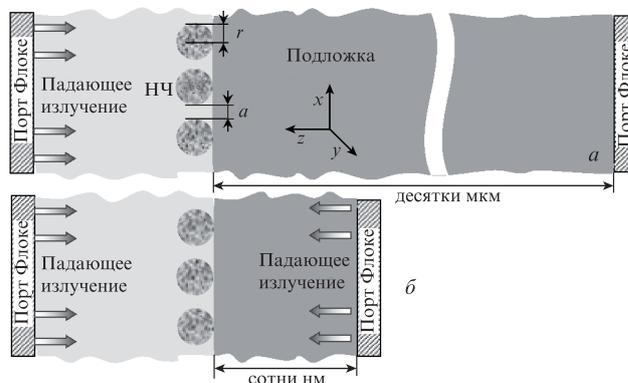


Рис.2. Схемы моделирования поверхностных наноструктур с металлическими НЧ на подложке в окружающей среде (воздух, вода) на основе анализа электромагнитного поля в дальней зоне (*a*) и пересчета матриц *S*-параметров (*b*). Элементарная ячейка показана в плоскостях *xz* и *yz*.

электромагнитного поля показывают, что в подложке достаточно быстро формируется стационарное периодическое распределение электромагнитного поля [25, 27]. Данный эффект наблюдался даже в том случае, когда в пространственном распределении электромагнитного поля вблизи наноструктуры проявляются области аномально высоких напряженностей электрического поля, свидетельствующие об интенсивном резонансном коллективном взаимодействии между НЧ в слое [25]. Для повышения эффективности компьютерного моделирования в настоящей работе предлагается использовать результаты расчета характеристик электромагнитного поля на основе матриц S -параметров для наноструктур с меньшей толщиной подложки, что, в свою очередь, приводит к значительному уменьшению числа ячеек дискретизации структуры (рис.2,б). В работе рассчитаны спектральные зависимости коэффициента поглощения оптического излучения, определяемого диссипацией энергии излучения в моделируемой структуре.

Система универсальных S -параметров позволяет связать падающие и отраженные волны излучения в произвольном комплексном тракте. Связь S -параметров с амплитудами падающих ($a_{1,2}$) и отраженных ($b_{1,2}$) волн дается соотношением [22]

$$\begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{21} \\ S_{12} & S_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix},$$

где S_{11} – коэффициент отражения от подложки в подложку; S_{12} – коэффициент пропускания из внешней среды в подложку; S_{21} – коэффициент пропускания из подложки в слой НЧ; S_{22} – коэффициент отражения от слоя НЧ во внешнюю среду.

На рис.3 представлено определение составляющих матрицы S -параметров при некоторой частоте, когда излучение падает на структуру с двух сторон: со стороны НЧ и со стороны подложки (торца оптического волокна).

Если считать, что лазерное излучение попадает на наноструктуру только из оптического волокна, то коэффициент экстинкции рассчитывается на каждой длине волн с помощью соотношения

$$k = S_{11} + (1 - S_{21} - S_{11}) = 1 - S_{21}.$$

Коэффициент поглощения, в свою очередь, рассчитывается по формуле

$$l = 1 - S_{21} - S_{11}.$$

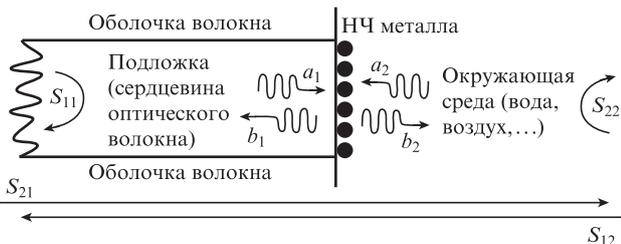


Рис.3. Определение составляющих матрицы S -параметров на некоторой частоте, когда излучение падает на структуру с двух сторон: со стороны НЧ и со стороны подложки (оптического волокна); a_1 и a_2 – комплексные амплитуды волн, падающих на наноструктуру, b_1 и b_2 – комплексные амплитуды волн, отраженных от наноструктуры.

Для компьютерной модели входными данными являются тип материала, форма и размеры НЧ, тип материалов подложки и окружающей среды, параметры падающего излучения. Следует отметить, что дисперсия оптических констант металлов при моделировании учитывается с помощью интерполяции спектральных данных [28].

Степень заполнения поверхности подложки НЧ равна отношению площади проекции НЧ на подложку S_{NP} к площади основания ячейки S_{US} . Например, для НЧ сферической формы степень заполнения поверхности можно определить следующим образом:

$$\rho = \frac{S_{NP}}{S_{US}} = \frac{\pi r^2}{l^2} = \frac{\pi r^2}{(2r + ar)^2} = \frac{\pi}{(2 + a)^2},$$

где a – расстояние между проекциями НЧ на подложку, выраженное через их радиус r [20].

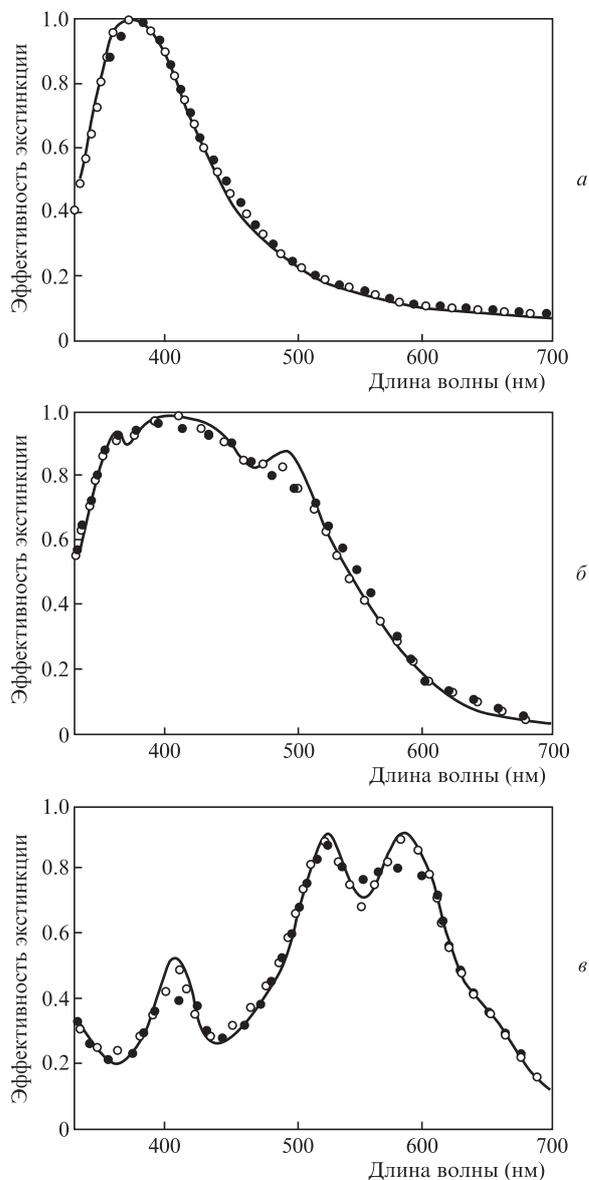


Рис.4. Результаты моделирования эффективности экстинкции на основе анализа электромагнитного поля в дальней зоне (точки) и на основе матриц S -параметров (сплошные кривые) для сферических (а), конических (б) и пирамидальных с восьмиугольным основанием (в) НЧ серебра на подложке. Светлые точки – 25 линий, черные – 35 линий на длину волн.

На рис.4 приведены результаты моделирования эффективности экстинкции на основе анализа электромагнитного поля в дальней зоне (точки) и на основе матриц S-параметров (сплошные кривые) для сферических, конических и пирамидальных с восьмиугольным основанием НЧ серебра на подложке (торце оптического волокна с показателем преломления $n \approx 1.46$) в воздухе (показатель преломления $n_{air} \approx 1$) с радиусом основания НЧ $r = 25$ нм, высотой НЧ $h = 2r = 50$ нм и степенью заполнения поверхности $\rho = 46\%$. При расчете электромагнитного поля в дальней зоне в программном пакете автоматически задаются опорные длины волн (из заданного диапазона длин волн), для которых вычисляются оптические характеристики наноструктуры. Для каждого значения густоты расчетной сетки автоматически формируется новая, отличная от предыдущей последовательность опорных длин волн, значения которых могут не совпасть с реальной длиной волны максимума спектра поглощения. Для того чтобы снизить влияние этого эффекта на результаты моделирования, необходимо увеличивать значения густоты расчетной сетки, что приводит к существенному увеличению длительности расчета каждого из приведенных спектров поглощения. Таким образом, применение анализа электромагнитного поля в дальней зоне не всегда эффективно, поскольку, во-первых, результат моделирования может сильно зависеть от параметров расчетной сетки, а во-вторых, зачастую требуется избыточная дискретизация исследуемой структуры.

Следует отметить, что способом исследования сходимости расчетов является анализ остаточной относительной неопределенности моделирования (невязка). При заданной максимальной величине невязки 10^{-12} для всех исследованных длин волн достигается невязка $10^{-13} - 10^{-12}$, причем на длинах волн вблизи пика ППП ее значение сильно осциллирует, что обусловлено резонансным характером распределения составляющих электромагнитного поля.

3. Оптические характеристики поверхностных наноструктур с металлическими НЧ для волоконно-оптических фотоакустических преобразователей

Моделирование спектра поглощения проводилось в диапазоне длин волн 330–850 нм, в котором коэффициент поглощения оптического излучения НЧ золота и серебра наиболее типичных форм максимален [29]. Например, пик ППП для сферических НЧ серебра и золота находится в диапазоне длин волн 330–550 нм, что позволяет использовать при создании фотоакустических генераторов коммерчески доступные твердотельные лазеры с преобразованием частоты (длина волны 532 нм) и полупроводниковые лазеры с прямой генерацией (длина волны в диапазоне 510–530 нм, а также длины волн 405, 445 и 450 нм) [30].

Возможность эффективного фотоакустического преобразования определяется комплексом факторов, рассмотрение которых (например, термофизические и гидродинамические свойства наноструктуры) выходит за рамки настоящей работы. Для осуществления эффективного (с точки зрения большой мощности оптического излучения, поглощенного в наноструктуре) фотоакустиче-

ского преобразования необходимо одновременное выполнение нескольких условий:

1. Доступность лазера, генерирующего модулированное оптическое излучение в требуемом диапазоне длин волн.
2. Достаточно широкий пик ППП (ширина более 25 нм по уровню 0.9) для обеспечения возможности мультиплексирования излучения различных лазеров по длинам волн.
3. Высокий коэффициент поглощения в пике ППП (50% и более).

Следует отметить, что в данном случае эффективность фотоакустического преобразователя не совсем корректно вводить в виде численной величины, т. к. некоторые из условий не вполне четко формулируются математически.

На рис.5 представлены положения пика ППП в спектре поглощения наноструктуры с НЧ золота на торце оптического волокна в воде в зависимости от радиуса НЧ и степени заполнения поверхности подложки (торца оптического волокна). Серым цветом показана область, для которой существуют коммерчески доступные лазеры, обеспечивающие генерацию модулированного оптического сигнала.

На рис.6 показаны ширины пика ППП по уровню 0.9 в спектре поглощения наноструктуры со сферическими НЧ золота на торце оптического волокна в воде в зависимости от радиуса НЧ и степени заполнения поверхности подложки. Видно, что область, где ширина пика ППП по уровню 0.9 превышает 25 нм, занимает практически весь диапазон параметров, для которых проводились расчеты, за исключением небольшой области. Указанная область расположена от точки со степенью заполнения поверхности $\rho = 55\%$ и радиусом НЧ $r = 2.5$ нм до точки с $\rho = 35\%$ и $r = 13$ нм.

На рис.7 приведены коэффициенты поглощения в пике ППП в спектре поглощения наноструктуры со сферическими НЧ золота в воде в зависимости от радиуса НЧ и степени заполнения поверхности подложки. Видно, что существует значительная область, в которой коэффициент поглощения в пике ППП превышает 49%. Контуром выделена область, в которой выполняются все три необ-

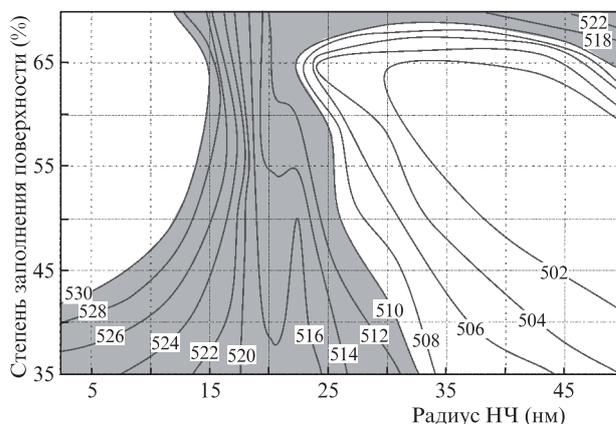


Рис.5. Положения пика ППП в спектре поглощения наноструктуры со сферическими НЧ золота на торце оптического волокна в воде в зависимости от радиуса сферических НЧ и степени заполнения поверхности подложки. Серым цветом показана область, для которой существуют коммерчески доступные лазеры, обеспечивающие генерацию модулированного оптического сигнала. Цифры на кривых – положение пика ППП в нм.

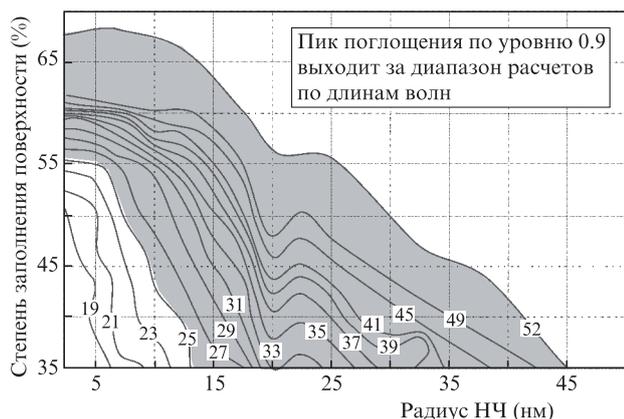


Рис.6. Ширины пика ППР по уровню 0.9 в спектре поглощения наноструктуры со сферическими НЧ золота на торце оптического волокна в воде в зависимости от радиуса НЧ и степени заполнения поверхности подложки. Серым цветом показана область, в которой ширина пика ППР превышает 25 нм. Цифры на кривых – ширина пика ППР в нм.

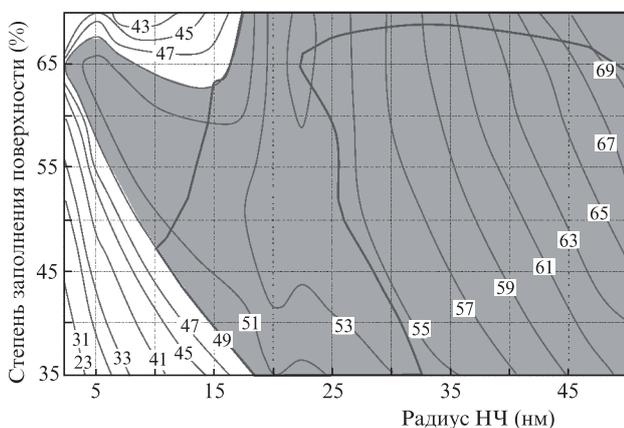


Рис.7. Коэффициенты поглощения в пике ППР в спектре поглощения наноструктуры со сферическими НЧ золота на торце оптического волокна в воде в зависимости от радиуса НЧ и степени заполнения поверхности подложки. Серым цветом показана область, в которой коэффициент поглощения в пике превышает 49%. Контуром выделена область, где выполняются все три необходимых условия для эффективного фотоакустического преобразования. Цифры на кривых – коэффициент поглощения в %.

ходимых условия для эффективного фотоакустического преобразования. Важно, что при радиусах частиц 18–23 нм изменение степени заполнения поверхности в диапазоне 35%–70% не оказывает заметного влияния на эффективность фотоакустического преобразования.

На рис.8 представлены коэффициенты поглощения в пике ППР в спектре поглощения для той же наноструктуры, когда в качестве окружающей среды использовался воздух. В случае наноструктуры с НЧ серебра на торце оптического волокна в воздухе область, где выполняются все три необходимых условия для эффективного фотоакустического преобразования, является очень малой: радиусы НЧ составляют от 8 до 15 нм, степени заполнения – от 57% до 62%.

В оптических спектрах для случая НЧ золота на торце оптического волокна в воде (рис.5–7) при радиусах частиц 18–24 нм для всех рассмотренных степеней заполнения подложки наблюдаются области с выраженными особенностями поведения спектральных характеристик пика ППР для исследуемой наноструктуры. В результате

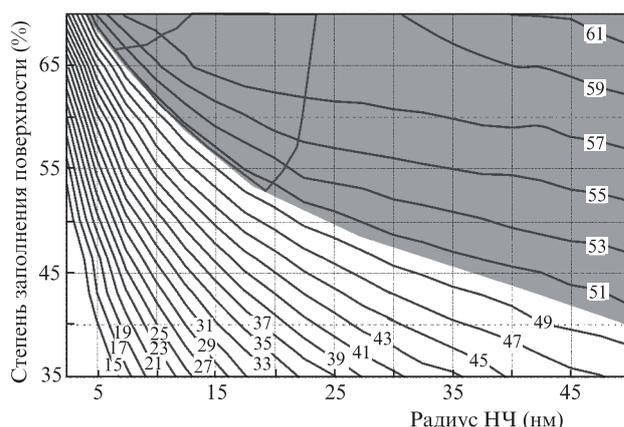


Рис.8. Коэффициенты поглощения в пике ППР в спектре поглощения наноструктуры со сферическими НЧ золота на торце оптического волокна в воздухе в зависимости от радиуса НЧ и степени заполнения поверхности подложки. Серым цветом показана область, в которой коэффициент поглощения в пике превышает 50%. Контуром выделена область, где выполняются все три необходимых условия для эффективного фотоакустического преобразования. Цифры на кривых – коэффициент поглощения в %.

моделирования пространственного распределения напряженности электрического поля (сравнивались распределения поля в одинаковой фазе) в наноструктуре как на длине волны вблизи пика ППР, так и непосредственно в пике поглощения установлено, что в случае малых НЧ, размеры которых сравнимы с глубиной проникновения возмущенного электромагнитного поля в подложку, поле в системе НЧ–окружающая вода–подложка осциллирует как единое целое. Формируется связанная система коллективной электронной плазмы и электромагнитного поля. При этом возмущенное поле подложки оказывает сильное влияние на НЧ. В случае больших НЧ, размеры которых превышают глубину проникновения возмущенного электромагнитного поля в подложку, доля энергии возмущенного электромагнитного поля, сосредоточенного в подложке, оказывается малой по сравнению с энергией в системе НЧ–окружающая среда. Область с выраженными особенностями поведения спектральных характеристик пика ППР – это область перехода от связанной системы электронной плазмы и электромагнитного поля всей структуры к осциллирующей системе НЧ–окружающая среда. Следует отметить, что диэлектрическая проницаемость окружающей среды сильно влияет на пространственное распределение напряженности электрического поля: в случае воздуха возмущенное поле значительно проникает в среду, окружающую НЧ. По этой причине на рис.8 отсутствует переходная область с выраженными особенностями поведения спектральных характеристик пика ППР.

При создании фотоакустических преобразователей также важно учитывать величину обратного отражения от наноструктуры, т. к. отражение может привести к срыву генерации полупроводникового лазера. На рис.9 показаны зависимости коэффициентов поглощения и обратного отражения в оптическое волокно от длины волны для наноструктуры со сферическими НЧ золота на торце оптического волокна в воздухе для различных степеней заполнения поверхности. Видно, что для параметров, обеспечивающих максимальное поглощение оптического излучения в наноструктуре, может наблюдаться высокий коэффициент обратного отражения в оптическое волокно

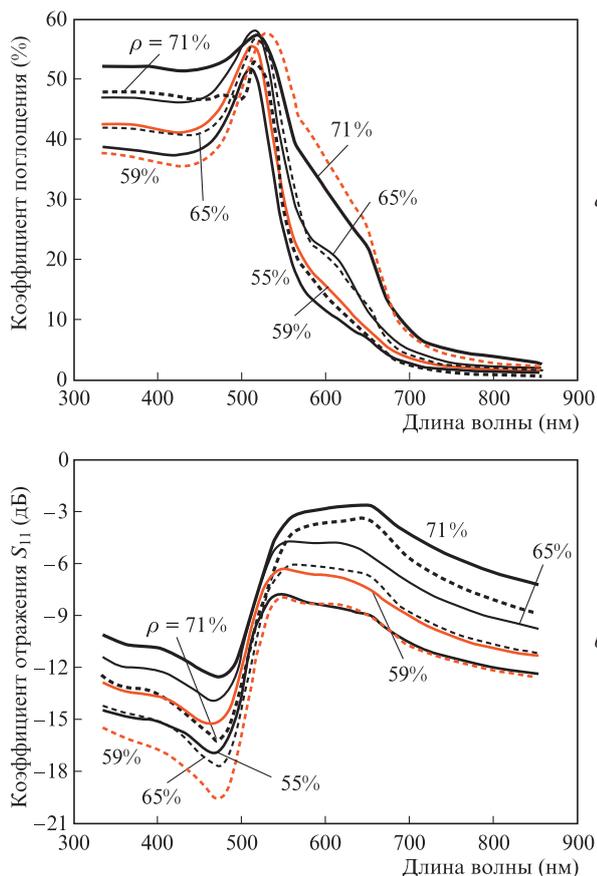


Рис.9. Зависимости коэффициентов поглощения (а) и отражения (б) от длины волны в случае наноструктуры со сферическими НЧ золота на торце оптического волокна в воздухе для различных степеней заполнения поверхности подложки ρ при радиусах частиц 15 нм (штриховые кривые) и 20 нм (сплошные кривые).

но (до -3 дБ) при степени заполнения подложки порядка 70%. С уменьшением последней происходит уменьшение коэффициента отражения. Его максимальные значения имеют место на длинах волн максимумов пиков ППР, а по обе стороны от этих пиков наблюдается резкое уменьшение коэффициента отражения, причем в коротковолновой области длин волн оно больше, чем в длинноволновой. При создании фотоакустических генераторов во избежание обратного отражения в резонатор лазера необходимо обеспечить изоляцию лазера, например с помощью волоконно-оптического изолятора.

Отметим, что на коэффициент поглощения влияет множество факторов, например материал НЧ, показатели преломления сердцевины оптического волокна и среды, окружающей НЧ. На рис.10 показаны зависимости коэффициента поглощения наноструктур со сферическими НЧ золота и серебра с радиусом 20 нм и степенью заполнения подложки 46% на торце оптического волокна от длины волны для различных показателей преломления среды, окружающей НЧ. Видно, что с ростом показателя преломления среды максимум пика ППР для двух типов наноструктур сдвигается в длинноволновую область. В диапазоне длин волн 490–650 нм для наноструктур с НЧ золота положение пика ППР изменяется на ~ 50 нм при изменении показателя преломления на единицу (рис.10,а), а в диапазоне 370–590 нм для наноструктур с НЧ серебра оно изменяется на ~ 110 нм при таком же изменении показателя преломления (рис.10,б). Видно также, что когда

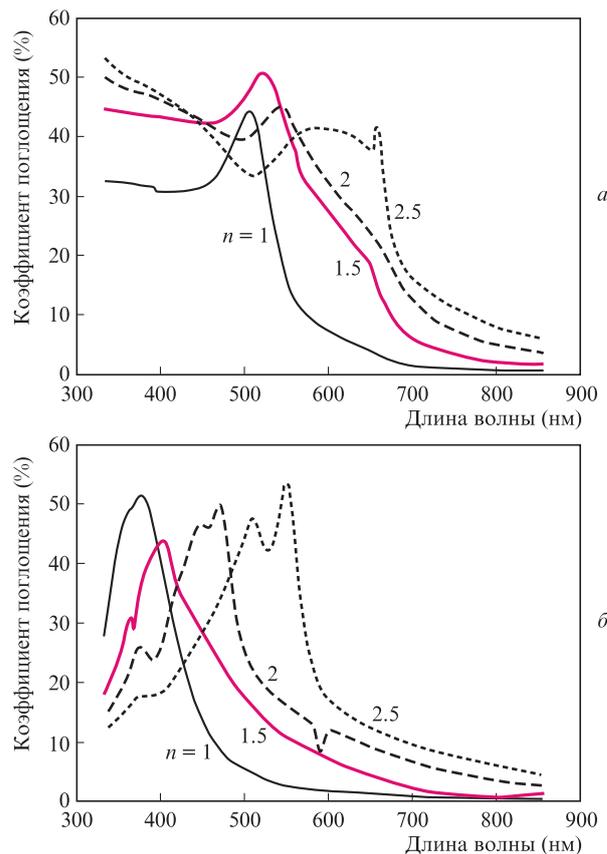


Рис.10. Зависимости коэффициента поглощения от длины волны для наноструктур со сферическими НЧ золота (а) и серебра (б) на торце оптического волокна, рассчитанные для различных показателей преломления n среды, окружающей НЧ.

показатели преломления окружающей среды и подложки сравниваются, в спектрах поглощения наблюдается один максимум, а когда показатель преломления среды начинает увеличиваться, то в спектре появляется второй максимум, вероятно связанный с тем, что возбуждаемые плазмонные колебания взаимодействуют между собой по-разному для различных систем: НЧ и подложки. При этом, как показывает моделирование, электромагнитное поле, возмущенное вследствие плазмонного резонанса, начинает проникать в подложку глубже, чем в среду, окружающую НЧ [20, 27].

4. Заключение

В работе рассмотрен способ компьютерного моделирования оптических свойств наноструктур для волоконно-оптических фотоакустических преобразователей, позволяющий без синтеза тестовых образцов установить физические механизмы, связывающие микроскопические параметры НЧ и наноструктуры с выходными характеристиками всего преобразователя. С этой целью был предложен метод расчета коэффициента поглощения оптического излучения, определяемого собственно диссипацией электромагнитной энергии, на основе вычисления матриц S -параметров.

Установлено, что эффективное фотоакустическое преобразование может быть реализовано в поверхностной наноструктуре из сферических НЧ золота на торце оптического волокна в воде в широких диапазонах микроскопических параметров наноструктуры. Например, при ра-

диусах частиц 18–23 нм изменение степени заполнения поверхности в диапазоне 35%–70% не оказывает заметного влияния на эффективность фотоакустического преобразования. Одновременно имеются еще три достаточно широкие области параметров, в которых обеспечивается высокоэффективное фотоакустическое преобразование. В случае наноструктуры с НЧ золота или серебра на торце оптического волокна в воздухе область параметров, где выполняются все необходимые условия для фотоакустического преобразования, является очень узкой, что существенно ограничивает применимость таких структур.

Показано, что в случае резонансного поглощения оказывается также большим коэффициент обратного отражения, составляющий, в частности, порядка –3 дБ при степени заполнения подложки свыше 70% для наноструктуры с НЧ золота на торце оптического волокна в воздухе, вследствие чего при построении фотоакустических генераторов необходимо обеспечение изоляции применяемых лазеров.

- Gang Tingting, Hu Manli, Rong Qiangzhou, Qiao Xueguang, Liang Lei, Liu Nan, Tong Rongxin, Liu Xiaobo, Bian Ce. *Sensors*, **16**, 2125 (2016).
- Smith R., Arca A., Chen X., Marques L., Clark M., Aylott J., Somekh M. *J. Phys. Conf. Ser.*, **278**, 012035 (2011).
- Rivero P.J., Goicoechea J., Arregui F.J. *Localized Surface Plasmon Resonance for Optical Fiber-Sensing Applications, Nanoplasmonics – Fundamentals and Applications* (Rijeka: Intech, 2017).
- Nan Wu, Ye Tian, Xiaotian Zou, Xingwei Wang. *Proc. SPIE*, **8694**, 86940 (2013).
- Tian Ye, Wu Nan, Zou Xiaotian, Felemban H., Cao Chengyu, Wang Xingwei. *Opt. Eng.*, **52** (6), 065005 (2013).
- Hou Yang, Kim Jin-Sung, Ashkenazi Shai, Huang Sheng-Wen, Guo L.Jay. *Appl. Phys. Lett.*, **91**, 073507 (2007).
- Zou Xiaotian, Wu Nan, Tian Ye, Wang Xingwei, Clark M. *J. Acoust. Soc. Am.*, **137** (1), 219 (2015).
- Belsito L., Vannacci E., Mancarella F., Ferri M., Veronese G.P., Biagi E., Roncaglia A. *J. Micromech. Microeng.*, **24**, 085003 (2014).
- Hu Chennan, Yu Zhihao, Wang Anbo. *Opt. Express*, **24** (18), 20287 (2016).
- Zhou Jingcheng, Wu Nan, Bi Siwen, Wang Xingwei. *Proc. SPIE*, **9803**, 98031 (2016).
- Tian Ye, Wu Nan, Sun Kai, Zou Xiaotian, Wang Xingwei. *J. Comput. Acoust.*, **21** (2), 1350002 (2013).
- Wu Nan, Tian Ye, Zou Xiaotian, Wang Xingwei. *Proc. SPIE*, **8345**, 83453 (2012).
- Chen Sung-Liang. *Appl. Sci.*, **7** (25), 1 (2017).
- Mayeh M., Farahi F. *Phot. Sens.*, **1** (2), 187 (2011).
- Ortega-Mendoza J.G., Chavez F., Zaca-Moran P., Felipe C., Perez-Sanchez G.F., Beltran-Perez G., Goiz O., Ramos-Garcia R. *Opt. Express*, **21** (5), 6509 (2013).
- Bishop C.A. *Vacuum Deposition Onto Webs, Films and Foils* (Amsterdam: Elsevier, 2016).
- Kozadaev K.V. *J. Eng. Phys. Thermophys.*, **87** (3), 704 (2014).
- Kozadaev K.V. *Instrum. Exp. Tech.*, **59** (6), 863 (2016).
- Микитчук Е.П., Козадаев К.В. *ЖПС*, **83** (6), 933 (2016).
- Goncharov V.K., Kozadaev K.V., Mikitchuk A.P. *High Temp. Mater. Processes: An Intern. Quart. High-Technol. Plasma Processes*, **18** (3), 217 (2014).
- Курушин А.А., Пластиков А.Н. *Проектирование СВЧ устройств в среде CST Microwave Studio* (М.: изд-во МЭИ, 2010, с. 47–73).
- Pozar D.M. *Microwave Engineering* (Hoboken: Wiley, 2012).
- Fritzen F., Bohlke T. *Tech. Mech.*, **30** (4), 354 (2010).
- Голованов О.А. *Радиотехника и электроника*, **51** (12), 1423 (2006).
- Микитчук Е.П., Козадаев К.В. *Журн. Бел. гос. ун-та. Сер. Физика*, **1**, 100 (2017).
- Дынич Р.А., Ковтун-Кужель В.А., Понявина А.Н. *ЖПС*, **78** (6), 874 (2012).
- Гончаров В.К., Козадаев К.В., Микитчук Е.П. *Докл. междунар. научной конф. «Актуальные проблемы физики твердого тела ФТТ-2016»* (Минск: Ковчег, 2016, т. 3).
- Palik E.D. *Handbook of Optical Constants of Solids* (New York: Academic Press, 1985).
- Kreibig U., Vollmer M. *Optical Properties of Metal Clusters* (Berlin: Springer-Verlag, 1995).
- Avramescu A., Lermer T., Muller J., Tautz S., Queren D., Lutgen S., Straub U. *Appl. Phys. Lett.*, **95**, 071103 (2009).