

## ОПТИКА КЛАСТЕРОВ, АЭРОЗОЛЕЙ И ГИДРОЗОЛЕЙ

УДК 535.016, 535.361, 535.393

# Оптимизация поглощения оптического излучения многослойными сферическими микрочастицами

Ю.Э. Гейнц, Е.К. Панина, А.А. Землянов\*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН  
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 31.10.2016 г.

Детально исследованы пространственное распределение и амплитудные характеристики поглощенной мощности внутри многослойных частиц-микрокапсул, состоящих из жидкого ядра и одной или нескольких полимерных оболочек, при изменении толщины и показателя преломления внешней оболочки. Определено положение области локализации поля при варьировании данных параметров. Это важно для решения практических задач, связанных с проблемой вскрытия оболочек микрокапсул в нужных пространственных зонах.

*Ключевые слова:* сферическая многослойная микрокапсула, метод численной электродинамики; spherical multilayer microcapsule, numerical electrodynamic method.

### Введение

Одним из важных достижений современных физики и химии является технология создания микро- и наночастиц методом послойного наращивания оболочек. Впервые идея данного метода была предложена в [1]. Для образования пленки использовалось осаждение чередующихся слоев противоположно заряженных неорганических наночастиц. Позднее [2, 3] этот подход был применен для формирования послойного покрытия с использованием полиэлектролитов. Несомненным прорывом в данном направлении исследований стало создание в 1998 г. полых микрокапсул [4, 5]. Начиная с этого момента ученые во всем мире активно работают над синтезом многослойных микрочастиц и исследованием их физико-химических свойств.

Подобный интерес к композитным микрочастицам обусловлен в значительной степени возможностью их широкого практического применения, например в областях, связанных с разработкой оптико-электронных приборов [6–8], активных биологических меток на основе плазмонных нанолазеров (спайзеров) [9, 10], а также в пищевой и косметической промышленности. Уникальные физико-химические свойства гибридных микрочастиц определили еще одно важное направление их использования, а именно в качестве миниатюрных портативных объектов (микрокапсул) для капсулирования и адресной доставки лекарственных препаратов, а также для диагностических целей, в частности визуализации живых клеток.

Разработано несколько технологий послойной сборки подобных организованных структур, например методом полиионной сборки [11], когда на поверхность частицы, содержащей нужное вещество, наносится полимерная или нанокompозитная оболочка путем последовательной адсорбции полимеров и/или наночастиц [5] либо методом синтеза субмикронных шаблонов с последующим удалением их ядер [12]. Образование неорганической оболочки с включениями диоксида кремния ( $\text{SiO}_2$ ) позволяет инкапсулировать малые молекулы, такие как родамин В (Rh-B), внутри неорганических/органических композитных полиэлектролитных капсул. Наночастицы диоксида кремния блокируют поры и вместе с мягкой полимерной составляющей образуют более толстую и более плотную композитную оболочку, которая обеспечивает возможность уплотнения малых молекул груза. Благодаря добавлению наночастиц диоксида кремния микрокапсулы становятся более чувствительными к ультразвуковой диагностике.

Однако, несмотря на разнообразие органосиликоновых нано/микросфер, такие материалы имеют свои ограничения. Так, до сих пор не достигнута высокая эффективность захвата малых молекул груза внутрь полых сферических частиц с кремниевой оболочкой. Кроме того, почти все работы, касающиеся исследования полых кремниевых сфер, показали, что подобные материалы являются весьма чувствительными к изменению кислотности, а следовательно, возникает проблема не только адресной доставки лекарственных препаратов к клеткам и тканям [13–15], но и неконтролируемого вскрытия микрокапсул.

В последнее время в качестве альтернативного материала при разработке и создании гибридных

\* Юрий Эльмарович Гейнц (ygeints@iao.ru); Екатерина Константиновна Панина (pek@iao.ru); Александр Анатольевич Землянов (zaa@iao.ru).

микрокапсул рассматривают наночастицы диоксида титана ( $\text{TiO}_2$ ), встроенные в полимерные оболочки [16, 17]. Такие частицы экологически чистые, недорогие и, что особенно важно, биологически совместимые с органическими тканями. Еще одним преимуществом композитных составляющих с  $\text{TiO}_2$  является чувствительность не только к ультразвуковому излучению, но и к ультрафиолету (УФ), что делает их более функциональными. Однако следует заметить, что использование УФ не всегда безопасно для организма человека и осуществляется под строгим контролем. В этом плане значительно менее опасным для живых тканей является излучение ближнего ИК-диапазона (0,7–1 мкм). Микрокапсулы с полимер-титановой оболочкой могут быть использованы также в ряде специальных областей, связанных с доставкой лекарственных средств в терапии кожи, а также для систем доставки лекарственных средств с точным контролем выдачи груза [18], так как включение наночастиц  $\text{TiO}_2$  не только увеличивает механическую прочность оболочки микрокапсулы, но и уменьшает ее проницаемость.

Не менее актуальной остается проблема своевременного вскрытия микрокапсул. Ее решение позволит точно воздействовать на целевые клетки, не повреждая окружающие их ткани. Здесь важно контролировать не только положение, но и размер области разрыва оболочек, чтобы убрать побочные эффекты, связанные с передозировкой лекарственных препаратов. При этом воздействие излучения на содержимое микрокапсул также должно быть сведено к минимуму, дабы не нарушить их функциональные свойства.

Таким образом, на повестке дня стоит задача создания многофункциональных «интеллектуальных» микрокапсул, которые были бы чувствительными к внешнему воздействию различной физико-химической природы, например к лазерному излучению. Чувствительность оболочки капсулы к электромагнитному излучению обычно обеспечивается присутствием в ней веществ, активно поглощающих оптическое излучение в определенном спектральном диапазоне. В видимой и ближней ИК-областях спектра это могут быть наночастицы благородных металлов (серебро, золото, сульфид золота) или же красители [19]. В УФ-диапазоне активное поглощение обеспечивают, например, частицы  $\text{TiO}_2$  [15].

Ранее нами было проведено теоретическое исследование распределения оптических полей внутри облученных лазерным излучением композитных сферических частиц, состоящих из жидкого ядра и поглощающей полимерной оболочки, что представляет собой аналог простейшего класса микрокапсул для использования в медицине [20, 21]. С помощью численного моделирования было показано, что толщина оболочки сферической микрокапсулы и величина коэффициента ее собственного поглощения определяют характер пространственного распределения и амплитудные характеристики поглощенной мощности.

Целью данной работы является поиск новых эффективных способов повышения уровня и управ-

ления локализацией поглощенной энергии внутри оболочки. С помощью метода численной электродинамики (FDTD) проводится моделирование пространственной структуры поглощенной мощности световой волны в более сложных трехслойных сферических частицах различного размера при изменении толщины и оптических свойств оболочек. Установлено, что варьирование данных параметров позволяет менять положение и пиковые значения областей эффективного объемного поглощения частицы и таким образом обеспечивать благоприятные условия для вскрытия оболочек в нужных пространственных зонах с целью освобождения содержимого микрокапсул.

## Методика и результаты численного моделирования

Все численные расчеты, результаты которых представлены ниже, проведены с помощью созданного авторами программного пакета, ядром которого является программный модуль 3D FDTD-X2 с открытым кодом, написанным на языке C++ [22] и модифицированным под конкретные счетные конфигурации. Использовался метод численного решения дифференциальных уравнений Максвелла (FDTD) [23].

Рассматривалась многослойная сферическая частица, состоящая из непоглощающего жидкого ядра фиксированного радиуса  $a_1$  с показателем преломления  $n_1 = 1,33$  (вода) и двух оптически более плотных оболочек различной толщины (рис. 1), из которых свойством поглощать излучение обладала только внутренняя оболочка. Толщина  $h_2$  и действительная часть показателя преломления  $n_2$  этой внутренней оболочки были неизменными. Отметим, что вопрос о влиянии мнимой части коэффициента преломления оболочки частицы, т.е. коэффициента поглощения, на перераспределение ее оптического поля ранее подробно исследовался в [20], поэтому в данной работе мы ограничились выбором только двух значений коэффициента поглощения  $\kappa_2 = 0,1$  и  $1$ . В реальных условиях, как отмечалось выше, управление величиной оптического поглощения микрокапсул осуществляется путем добавления в оболочку неорганических наночастиц (металлы, диэлектрики), поглощающих излучение в требуемом диапазоне длин волн.

Для удобства анализа в расчетах всегда оставался фиксированным также и радиус  $a_0$  двуслойной структуры «ядро + поглощающий слой», который равнялся длине волны падающего излучения  $\lambda$ . Сама длина волны была выбрана в «дружественном» для живой ткани спектральном диапазоне,  $\lambda = 0,8$  мкм. Внешний слой микрокапсулы считался оптически прозрачным. Его толщина  $h_3$  и показатель преломления  $n_3$  варьировались в достаточно широких диапазонах значений. Среда, окружающая композитную частицу, считается водой с показателем преломления  $n_0 = n_1$ . Сконструированная таким образом модельная частица может служить

аналогом поликомпонентных микрокапсул, например  $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ -полиэлектролит, созданных с использованием метода полиионной сборки [11].

Последовательность расположения поглощающих/непоглощающих оболочек микрокапсулы также выбрана нами неслучайно. Основная идея здесь заключается в том, что если внутреннюю оболочку с достаточно высоким коэффициентом поглощения расположить между оптически прозрачными ядром и внешней оболочкой капсулы, то при облучении такой композитной частицы возникает локализация пространственного распределения поглощенной мощности в определенных пространственных зонах, расположенных, как правило, в пределах оболочек микросфер. Это позволяет свести к минимуму воздействие излучения на содержимое ядра, не нарушая функциональные свойства микрокапсул. Реализация подобной модели, основанной на использовании эффекта, обратного известному эффекту оптического просветления поверхностей, позволяет расширить эффективность применения микрокапсул, а также повысить их безопасность.

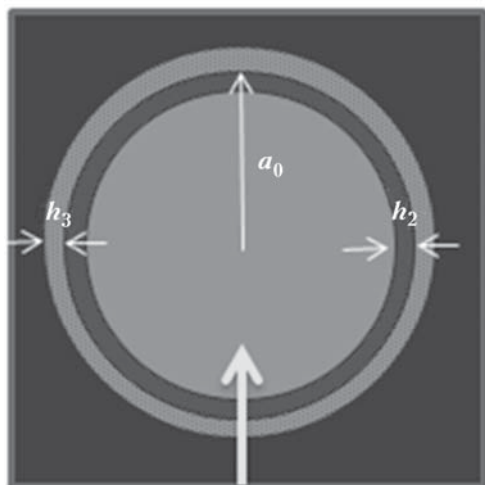


Рис. 1. Конфигурация модельной многослойной частицы. Вертикальной стрелкой показано направление падения световой волны

Для определения пространственного профиля поглощенной внутри микрокапсулы мощности излучения модельная частица заключалась в кубический объем с линейными размерами  $2 \times 2 \times 2 \text{ мкм}^3$ . На нижней грани счетного объема задавалась плоская линейно поляризованная волна с длиной волны  $\lambda$  и единичной амплитудой электрического поля  $E_0 = 1 \text{ В/м}$ , которая затем дифрагировала на частице. Объемная плотность поглощенной мощности  $P_a$  (омических потерь) вычислялась путем временного усреднения оптических полей согласно стандартному выражению [24]:

$$P_a(\mathbf{r}) = \frac{\pi c \epsilon_0}{\lambda} \epsilon''(\mathbf{r}) |\mathbf{E}(\mathbf{r})|^2,$$

где  $\epsilon_0$  — диэлектрическая проницаемость вакуума,  $\epsilon''$  — мнимая часть комплексной диэлектрической

проницаемости среды (поглощающего слоя частицы);  $\mathbf{r}$  — радиус-вектор точки внутри частицы;  $c$  — скорость света в вакууме. Как видно, на величину  $P_a$  оказывает влияние не только неоднородность распределения интенсивности оптического поля в объеме микрокапсулы, но и конфигурация поглощающих областей.

На рис. 2 представлены тоновые изображения распределения относительной интенсивности оптического поля  $B(\mathbf{r}) = |\mathbf{E}|^2/E_0^2$  (рис. 2, а, б) и пространственного профиля поглощенной мощности излучения  $P_a$  (рис. 2, в, г) по экваториальному сечению двух- и трехслойных сферических частиц. В дальнейшем двухслойная микрокапсула будет использована в качестве реперной частицы. Трехслойная сфера образована путем наращивания на двухслойную частицу радиусом  $a_0$  внешнего оптически более плотного *непоглощающего* неорганического слоя толщиной  $h_3$ . На рис. 2, б, г толщина внешнего слоя равнялась  $\lambda/5$ . Цифры, приведенные в каждом двумерном распределении, отражают соответствующие максимальные значения параметров  $B_m$  и  $P_{am}$ , достигаемых в пределах показанного сечения.

Видно, что при изменении конфигурации микрочастицы (наращивании слоя) существенным образом модифицируется структура пространственных профилей  $B(\mathbf{r})$  и  $P_a$ , следовательно, меняются и физико-химические (оптические) свойства микрокапсул. Переход от двух- к трехслойной частице в данном случае позволяет более чем в 2 раза увеличить пиковые значения интенсивности и в 3,5 раза — поглощаемую мощность. Представляется важным исследовать, как зависят данные значения от оптических параметров внешнего слоя.

Показатель преломления  $n$  большинства оптических полимерных материалов в видимой и ближней ИК-областях спектра, как правило, не превышает 1,7. Использование композитных материалов, состоящих из полимера с добавлением органических/неорганических наночастиц различных веществ, позволяет существенно повысить значение  $n$ . Так, согласно табличным данным, показатель преломления диоксида титана ( $\text{TiO}_2$ ) в фазе анатаза составляет 2,5, а в фазе рутила 2,7. Исходя из этого, показатель преломления внешнего слоя микрокапсулы  $n_3$  при численном моделировании варьировался нами в достаточно широком диапазоне значений.

На рис. 3 представлены результаты численных расчетов, иллюстрирующие влияние параметра  $n_3$  на максимально достижимые значения поглощенной мощности  $P_{am}$  и интенсивности оптического поля  $B_m$  в объеме трехслойных сферических микрочастиц различного размера. Радиус  $a_0$  внутренней двухслойной структуры «ядро + поглощающий слой», как и ранее, оставался фиксированным,  $a_0 = 0,8 \text{ мкм}$ , а толщина внешней оболочки варьировалась:  $h_3 = \lambda/3, \lambda/5, \lambda/10$ . Для удобства анализа значения  $P_{am}$  и  $B_m$  на графиках нормировались на соответствующие величины для двухслойной сферической частицы, что устанавливало единичный реперный уровень параметров.

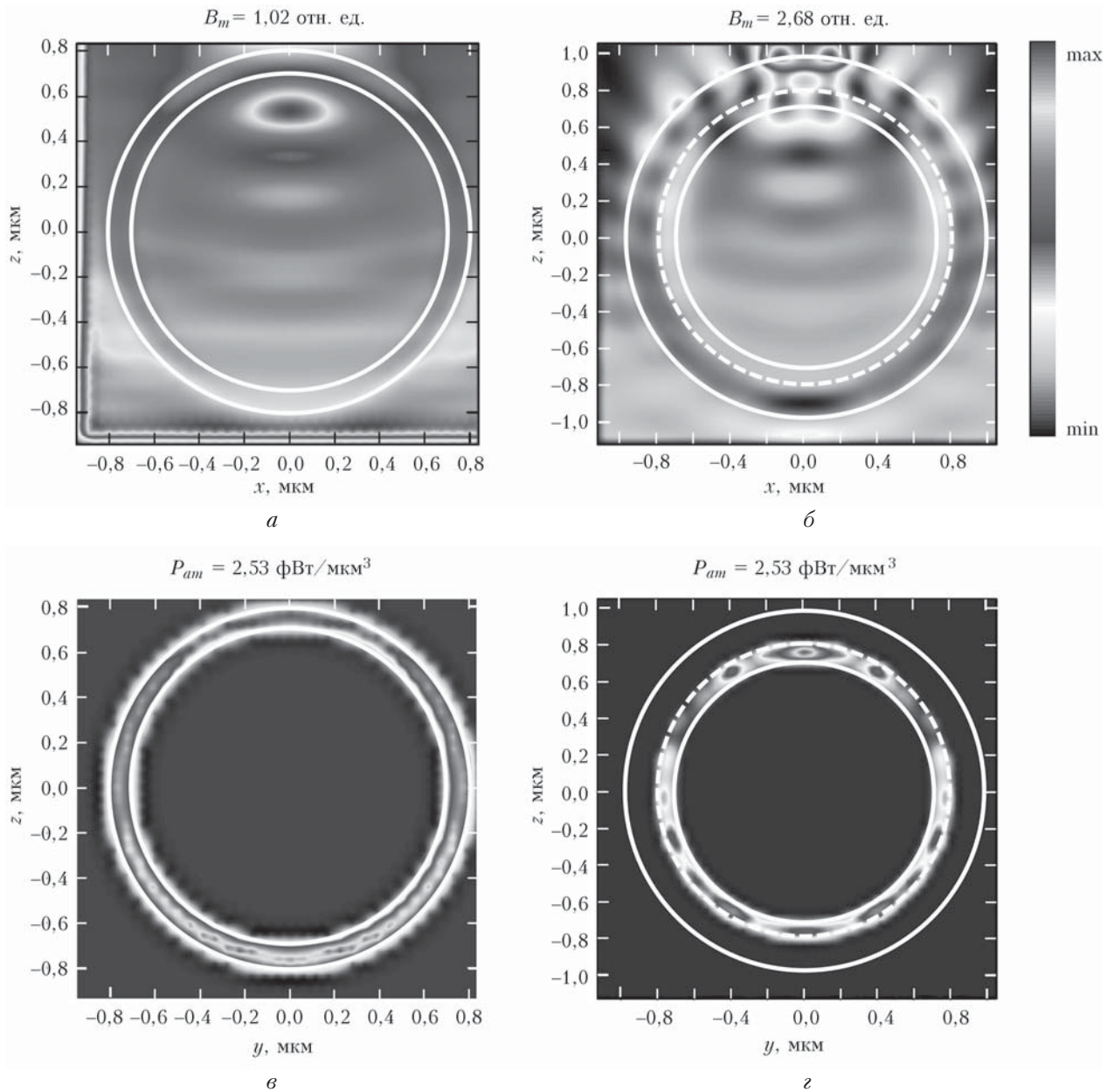


Рис. 2. Распределение оптического поля  $B(\mathbf{r})$  (*a*, *б*) и поглощенной мощности излучения  $P_a$  (*в*, *г*) в двух- (*a*, *в*) и трех-слойных (*б*, *г*) композитных частицах, облучаемых излучением с  $\lambda = 0,8$  мкм. Параметры внутренней поглощающей оболочки:  $h_2 = \lambda/10$ ,  $\kappa_2 = 0,1$ ,  $n_2 = 1,4$ . Параметры внешней непоглощающей оболочки трехслойной частицы:  $h_3 = \lambda/5$ ,  $n_3 = 2,1$ . Излучение падает снизу

Из рис. 3, *a* следует, что зависимость  $P_{am}(n_3)$  имеет пульсирующий характер. В случае более тонких внешних оболочек микрокапсул (кривые 2 и 3) формируется несколько явно выраженных максимумов, в то время как для частиц с толстой внешней оболочкой (кривая 1) данная зависимость сглажена. Кроме того, пиковые значения поглощенной по объему мощности излучения при  $h_3 = \lambda/3$  в несколько раз ниже соответствующих значений для более тонкостенных микрокапсул. Абсолютный максимум в зависимостях наблюдается при толщине внешнего слоя  $h_3 = \lambda/5$  и значении показателя

преломления  $n_3 = 2,2$ , следовательно, именно при этих параметрах достигается экстремальное повышение уровня локализации поглощенной энергии внутри многослойной частицы. Как будет видно ниже, данный факт объясняется специфическим характером формирования пространственной структуры внутреннего поля микрокапсулы.

Несколько иные закономерности наблюдаются в зависимостях  $B_m(n_3)$  (рис. 3, *б*). Отчетливо видны максимумы интенсивности, возникающие при некоторых значениях  $n_3$ , не равных соответствующим координатам максимумов для плотности по-

глощенной мощности. Интересно, что чем тоньше внешний слой микрокапсулы, тем сильнее смещается максимум интенсивности в сторону больших  $n_3$ . Это связано с особенностями фокусировки излучения сферической поверхностью многослойных частиц, которая действует как линза. Если толщина такой «линзы» уменьшается, то для удержания фокальной перетяжки на заданном расстоянии (внутри частицы) необходимо повысить оптическую плотность материала. Следовательно, для достижения оптимального тепловыделения в микрокапсуле требуется строгий контроль не только за параметром толщины оболочки, но и за ее показателем преломления.

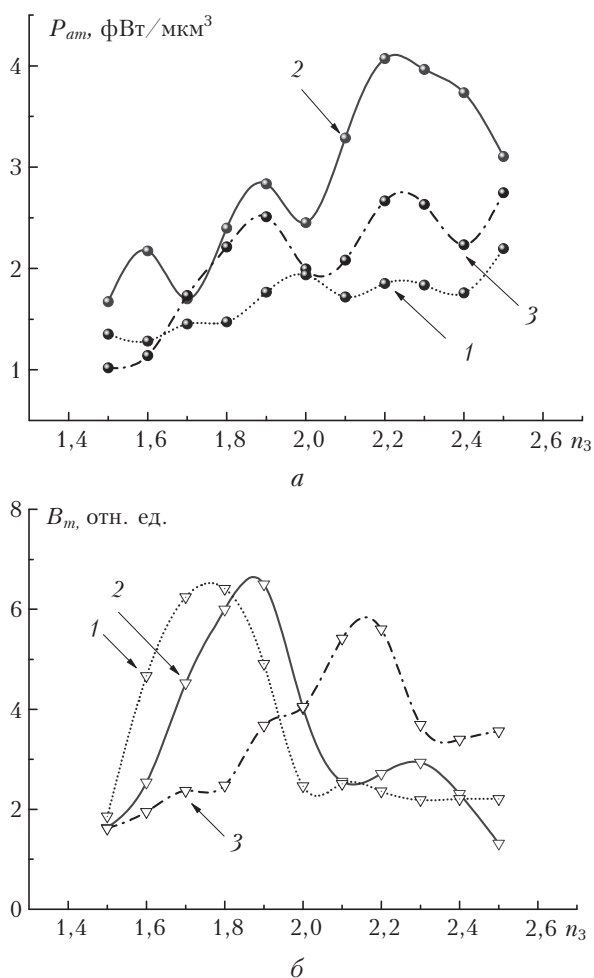


Рис. 3. Зависимость максимальных значений поглощенной мощности по объему капсулы  $P_{am}$  (а) и интенсивности оптического поля  $B_m$  (б) от показателя преломления внешнего слоя  $n_3$  трехслойных микрочастиц. Толщина внешнего слоя  $h_3 = \lambda/3$  (1),  $\lambda/5$  (2),  $\lambda/10$  (3)

Следует заметить, что увеличение коэффициента поглощения внутреннего слоя  $\kappa_2$  на порядок не меняет установленных ранее закономерностей, изменяются лишь абсолютные значения  $B_m$  и  $P_{am}$ . Так, для  $\kappa_2 = 1$  пиковые значения данных параметров, достигаемые в объеме микрокапсулы, в сред-

нем понижаются в два раза по сравнению со случаем  $\kappa_2 = 0,1$ . Кроме того, при более высоких значениях  $\kappa_2$  поглощение излучения происходит преимущественно в поглощающем слое в освещенной полусфере капсулы [20].

Радиальные распределения интенсивности оптического поля  $B(\mathbf{r})$  и пространственного профиля поглощенной мощности излучения  $P_a$  в частицах полного радиуса  $a = 0,96$  мкм представлены на рис. 4. Толщина внешнего оболочечного слоя и его показатель преломления соответствуют значениям, установленным нами в процессе численного моделирования, и являются оптимальными для достижения максимального уровня поглощения в пределах объема капсулы (см. рис. 3).

Сравнение фрагментов рис. 4, а–г показывает, что одним из основных факторов, влияющих на величину тепловыделения, является пространственное положение максимума поля в объеме частицы. Видно, что зона локализации поля в случае, когда реализуется наибольшее значение  $B_m$  ( $n_3 = 1,9$ , рис. 4, а) расположена в теневой поверхности микрокапсулы на границе раздела частица/окружающая среда и не попадает в пределы слоя поглощения. Это приводит к невысоким значениям параметра  $P_a$  на рис. 4, в. Для сравнения на рис. 4, б показано соответствующее распределение поля  $B(\mathbf{r})$  для  $n_3 = 2,2$ , что соответствует теперь максимуму в зависимости  $P_{am}(n_3)$ , показанной на рис. 3, а. Здесь происходит формирование нескольких выраженных максимумов поля, расположенных как у внешней поверхности капсулы, так и внутри поглощающей оболочки. Эти максимумы интенсивности поля обеспечивают сильное поглощение микрокапсулы и повышают пиковые значения  $P_a$  (рис. 4, г).

Данные рассуждения иллюстрирует рис. 5, на котором показана радиальная координата абсолютного максимума нормированной интенсивности оптического поля  $B(\mathbf{r})$  в зависимости от  $n_3$  (толщина  $h_3$  считается неизменной). Остальные параметры расчета соответствовали кривой 2 на рис. 3, б. Видно, что при увеличении оптической плотности внешней оболочки максимум поля начинает смещаться сначала к краю частицы, в слой с нулевым поглощением. Это понижает величину  $P_{am}$ . Затем, при  $n_3 > 2,1$ , происходит обратное движение максимума зависимости  $B(\mathbf{r})$  в сторону слоя с поглощением (заштрихованная область), что приводит к росту значений поглощенной мощности.

При  $n_3 \approx 2,2 + 2,3$  реализуются наиболее близкое размещение максимума поля к поглощающей зоне частицы и, соответственно, наибольшие значения  $P_{am}$ . Это подтверждает, что совокупность двух факторов, а именно расположение поглощающего слоя внутри композитной микрокапсулы, которое определяется толщиной внешней оболочки, и пространственное положение максимума оптического

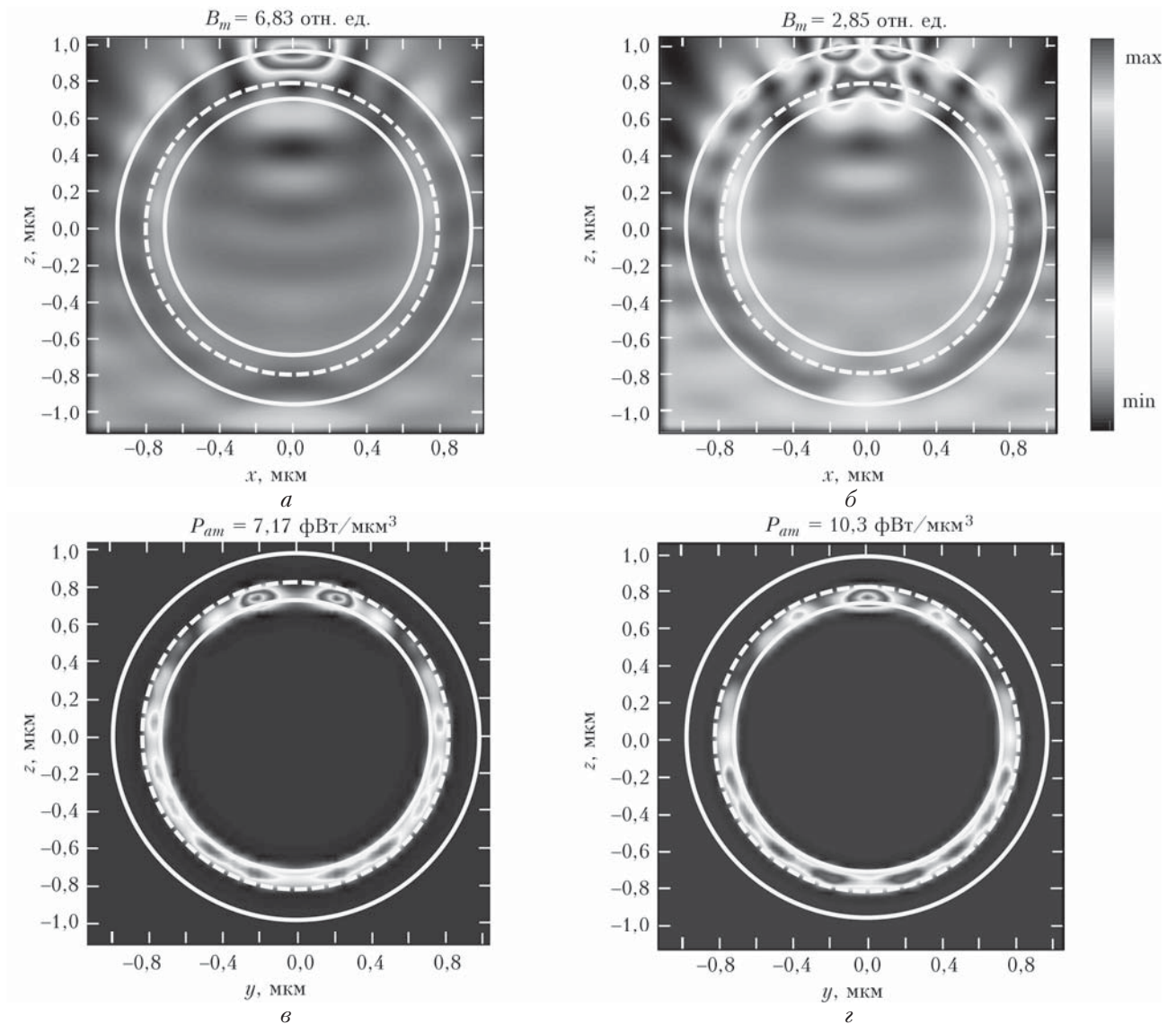


Рис. 4. Распределение поля  $B(\mathbf{r})$  и поглощенной мощности  $P_a$  в микросферах радиусом  $0,96 \text{ мкм}$ . Параметры ядра и поглощающей оболочки соответствуют представленным на рис. 3, толщина внешнего слоя  $h_3 = \lambda/5$ . Показатель преломления внешнего слоя  $n_3 = 1,9$  (а, в),  $2,2$  (б, г). Длина волны падающего излучения  $\lambda = 0,8 \text{ мкм}$ . Излучение падает снизу

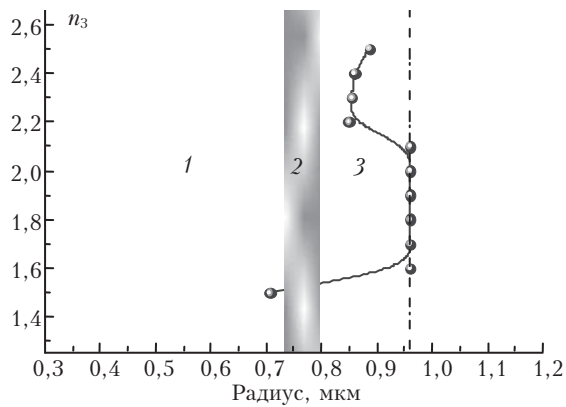


Рис. 5. Положение максимума поля  $B_m$  в композитной частице радиусом  $0,96 \text{ мкм}$  при изменении показателя преломления внешней оболочки  $n_3$ : 1 – ядро; 2 – поглощающий слой ( $\kappa_2 = 0,1$ ); 3 – непоглощающая оболочка. Пунктирная линия – край частицы

поля определяют характер пространственного распределения поглощенной мощности излучения, а также ее амплитудные характеристики.

### Заклучение

Теоретически исследованы особенности формирования оптического поля в композитных трехслойных сферических частицах (микрокапсулах) при освещении их оптическим излучением с  $\lambda = 0,8 \text{ мкм}$ . Проведено сравнение с двухслойными микрокапсулами с заданными оптическими свойствами.

С помощью численного моделирования наглядно продемонстрировано, что наращивание на двухслойную частицу внешнего непоглощающего слоя позволяет в несколько раз повысить пиковые значения объемного поглощения частицы и интенсивности ее оптического поля. Установлено, что основными факторами, влияющими на характер

пространственного распределения и амплитудные характеристики поглощенной мощности внутри оболочки микрокапсулы (при фиксированных параметрах ядра и поглощающего слоя), являются толщина внешней оболочки и положение максимума поля. Установлены оптимальные соотношения этих параметров, позволяющие контролируемо локализовать падающее на частицу излучение в различных пространственных зонах микрокапсулы.

- Iler R.K. Multilayers of Colloidal Particles // J. Colloid Interface Sci. 1966. V. 21. P. 569–594.
- Decher G., Hong J.D., Schmitt J. Buildup of ultrathin multilayer films by a self-assemble process // Thin Solid Films. 1992. V. 210–211. P. 831–835.
- Decher G. Fuzzy nanoassemblies: Toward layered polymeric multicomposites // Science. 1997. V. 277, N 5330. P. 1232–1237.
- Donath E., Sukhorukov G.B., Caruso F., Davis S.A., Mohwald H. Nowel hollow polymer shells by colloid-templated assemble of polyelectrolytes // Angew. Chem., Int. Ed. 1998. V. 37. P. 2201–2205.
- Sukhorukov G.B., Donath E., Davis S., Lichtenfeld H., Caruso F., Popov V.I., Mohwald H. Stepwise polyelectrolyte assembly on particles surface: A novel approach to colloid design // Polym. Adv. Technol. 1998. V. 9, N 10–11. P. 759–767.
- Feldheim D.L., Keating C.D. Self-assembly of single electron transistors and related devices // Chem. Soc. Rev. 1998. V. 27. P. 1–12.
- Dabbousi B.O., Bawendi M.G., Onitsuka O., Rubner M.F. Electroluminescence from CdSe quantum-dot/polymer composites // Appl. Phys. Lett. 1995. V. 66, N 11. P. 1316–1318.
- Colvin V.L., Schlamp M.C., Alivisatos A.P. Light-emitting diodes made from cadmium selenide nanocrystals and a semiconducting polymer // Nature. 1994. V. 370, iss. 6488. P. 354–357.
- Bergman D.J., Stockman M.I. Surface plasmon amplification by stimulated emission of radiation: Quantum generation of coherent surface plasmons in nanosystems // Phys. Rev. Lett. 2003. V. 90, N 2. P. 027402.
- Galanzha E.I., Weingold R., Nedosekin D.A., Sarimolaoglu M., Kuchyanov A.S., Parkhomenko R.G., Plekhanov A.I., Stockman M.I., Zharov V.P. Spaser as novel versatile biomedical tool // arXiv:1501.00342 (2015).
- Decher G., Hong J.D. Buildup of ultrathin multilayer films by a self-assembly process. 1. Consecutive adsorption of anionic and cationic bipolar amphiphiles on-charged surfaces // Macromol. Chem. Sym. 1991. V. 46. P. 321–327.
- Parakhonskiy B.V., Haase A., Antolini R. Sub-micrometer vaterite containers: synthesis, substance loading, and release // Angew. Chem., Int. Ed. 2012. V. 51, N 5. P. 1195–1197.
- Koker S.De, Lambrecht B.N., Willart M.A., Van Kooyk Y., Grooten J., Vervaeet C., Remon J.P., De Geest B.G. Designing polymeric particles for antigen delivery // Chem. Soc. Rev. 2011. V. 40, N 1. P. 320–339.
- Cock L.J., Koker S. De, Geest B.G., Grooten J., Vervaeet C., Remon J.P., Sukhorukov G.B., Antipina M.N. Polymeric multilayer capsules in drug delivery // Angew. Chem. Int. Ed. 2010. V. 49, N 39. P. 6954–6973.
- Бородина Т.Н., Руми Л.Д., Кунижев С.М., Сухоруков Г.Б., Ворождов Г., Фельдман Б.М., Марквичева Е.А. Полиэлектrolитные микрокапсулы как системы доставки биологически активных веществ // Биомед. химия. 2007. Т. 53, № 5. С. 557–565.
- Xu W., Choi I., Plamper F.A., Synatschke C.V., Muller A.H.E., Tsukruk V.V. Nondestructive light-initiated tuning of layer-by-layer microcapsule permeability // ACS Nano. 2013. V. 7, N 1. P. 598–613.
- Yi Q., Sukhorukov G.B. UV-induced disruption of microcapsules with azobenzene groups // Soft Matter. 2014. V. 10, N 9. P. 1384–1391.
- Gao H., Wen D., Tarakina N.V., Liang J., Bushby A.J., Sukhorukov G.B. Bifunctional ultraviolet/ultrasound responsive composite TiO<sub>2</sub>/polyelectrolyte microcapsules // Nanoscale. 2016. V. 8. P. 5170–5180.
- Skirtach A.G., Antipov A.A., Shchukin D.G., Sukhorukov G.B. Remote activation of capsules containing Ag nanoparticles and IR dye by laser light // Langmuir. 2004. V. 20, N 17. P. 6988–6992.
- Гейнц Ю.Э., Землянов А.А., Панина Е.К. Моделирование пространственного распределения поглощенной энергии лазерного излучения внутри сферических микрокапсул // Квант. электрон. 2016. Т. 46, № 9. С. 815–820.
- Гейнц Ю.Э., Землянов А.А., Панина Е.К. Влияние размера сферических микрокапсул на пространственное распределение поглощенной энергии лазерного излучения // Оптика атмосф. и океана 2016. Т. 29, № 5. С. 443–448; Geints Yu.E., Zemlyanov A.A., Panina E.K. The influence of spherical microcapsules on the spatial distribution of absorbed laser radiation power // Atmos. Ocean. Opt. 2016. V. 29, N 5. P. 477–482.
- Taflove A., Hagness S. Computational electrodynamics: The finite-difference time-domain method. Boston: Artech House Pub., 2000. 852 p.
- Yee K.S. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media // IEEE Trans. Antennas Propag. 1966. AP-14. P. 302–307.
- Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1970. 856 с.

**Yu.E. Geints, E.K. Panina, A.A. Zemlyanov. Optimization of optical radiation absorption by multilayer spherical microparticles.**

The spatial distribution and amplitude characteristics of the absorbed power inside multilayer particle-microcapsules consisting of a liquid core and one or more polymer shells when changing the thickness and refractive index of the external shell was studied in detail. The position of the field localization when varying these parameters was defined. This is important for the solution of practical tasks associated with opening the microcapsule shells in appropriate spatial areas.