

УДК 535.421

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОННЫХ НАНОСТРУЙ В ДИФРАКЦИОННЫХ ВОЛНОВЫХ ПОЛЯХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

Полецук Н.Н., Рудницкий А.С.

Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

На эффект формирования фотонных наноструй (ФНС) впервые было обращено внимание в работе [1] при изучении пространственной структуры ближнего поля рассеяния светового пучка на прозрачном кварцевом цилиндре микронных размеров. Спецификой ФНС является достаточно высокая пространственная локализация светового поля в перпендикулярном падению излучения направлении, что приводит к субволновым размерам фотонного потока. Интерес к этому эффекту обусловлен перспективами его практического применения в нанофотонике, биологии, медицине, наноэлектронике, системах хранения данных. Сообщается о возможности создания сенсоров высокого пространственного разрешения (нанометровый масштаб) [2], оптического скальпеля для прецизионной хирургии, оптического пинцета для манипулирования нанообъектами; возможна разработка устройств хранения данных с ультравысокой плотностью записи информации [3] и технологией безмасочного (прямого) нанесения нанопленок на поверхность фотосенсоров [4]. Первые эксперименты по прямому наблюдению фотонных струй были проведены в СВЧ-диапазоне. При помещении в зоне ФНС металлической наночастицы наноструя вызывала огромное усиление обратного рассеяния этой частицы [6]. Для различных приложений требуются различные типы фотонных струй. Все это выдвигает на первый план проблему формирования ФНС с заданными параметрами для оптимальной реализации конкретных устройств. В работе [5] показано, что, варьируя оптический контраст оболочек сферической частицы, можно управлять параметрами ФНС. В то же время для управления полным набором параметров ФНС и оптимизации их характеристик необходимы дополнительные свободные параметры. Одним из таких параметров является геометрическая форма частицы. В работе [7] приведены примеры численного моделирования фотонных струй от частиц в виде осесимметричного конуса, пирамиды, бруска с треугольным профилем.

В данной работе представлены результаты исследования влияния небольших изменений формы частицы на параметры ФНС.

Рассмотрим двумерную задачу дифракции плоской волны

$$\vec{E}_0 = [0, u_0, 0], \quad \vec{H}_0 = [u_0 \sin \theta, 0, u_0 \cos \theta], \quad (1)$$

$$u_0(x, z) = \exp[-ik(x \cos \theta + z \sin \theta)]$$

на диэлектрическом цилиндре. Исходное интегральное уравнение представим в виде:

$$u(r) = u_0(r) + \int_S u(r') K(r, r') dr', \quad (2)$$

$$K(r, r') = -0,25k^2(\varepsilon - 1)iH_0^{(2)}(k|r - r'|).$$

Приближенное решение ищем в виде линейной комбинации базисных функций

$$u(r') = \sum_{n=1}^N c_n \psi_n(r') \quad (3)$$

В качестве базисных функций выбирается система характеристических функций Хаара. Чтобы ввести их, разобьем область поперечного сечения S на N непересекающихся множеств S_n . Тогда базисная функция полагается равной единице 1, если переменная интегрирования принадлежит области S_n , и равной нулю, если не принадлежит. Система уравнений для определения коэффициентов c_n принимает в этом случае вид:

$$\sum_{n=1}^N c_n A_{mn} = u_{0m}, \quad (4)$$

$$A_{mn} = \delta_{mn} + \int_S K(r, r') dr'.$$

При вычислениях полагали, что падающая волна распространяется вдоль диагонали квадратного сечения ($\theta = \pi/4$). Диэлектрическая проницаемость материала цилиндра равна 2, а для окружающей среды 1. Размеры сечения в длинах волн равны:

$$1 \leq x \leq 2, 1 \leq z \leq 2.$$

На рисунке 1 показано распределение интенсивности дифракционного волнового поля в области

$$1 \leq x \leq 3, 1 \leq z \leq 3.$$

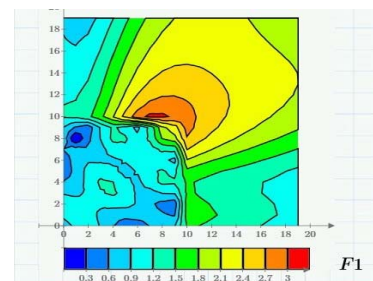


Рисунок 1 – Распределение интенсивности волнового поля для частицы квадратной формы

Она включает сечение цилиндра и ближнюю зону на расстоянии длины волны от его поверхности. Видно, что при заданном угле падения,

который раньше не рассматривался в литературе, область повышенной интенсивности волнового поля формируется вблизи вершины угла с внешней стороны поверхности. Максимальное превышение интенсивности падающей волны равно примерно четырем.

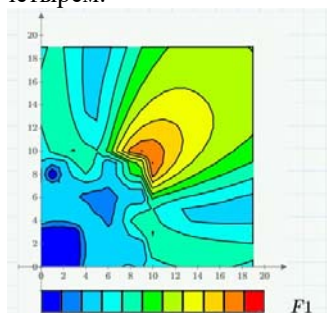


Рисунок 2 – Распределение интенсивности волнового поля для частицы сложной формы

Второй рисунок относится к измененной форме поперечного сечения. Для этого в области $1 \leq x \leq 1.3; 1 \leq z \leq 1.3$

диэлектрическая проницаемость полагается равной единице. Эта область относится уже к свободному пространству. Наблюдается в этом случае уменьшение поперечного размера ФНС.

Для сравнения продольных размеров требуются дополнительные расчеты в расширенной ближней зоне.

Таким образом, при отклонении формы диэлектрической изолированной частицы от заданной (в рассмотренном случае правильной) возможно улучшение параметров ФНС. Дополнительным фактором оптимизации структуры ФНС

является направление распространения падающей волны.

Литература

1. Chen Z., Taflove A., Backman V. Potonic nanojet enhancement of backscattering of light by nanoparticles // *Optics Express*. – 2004. – № 12(7). – P. 1214–1220.
2. Chen Z., Taflove A., Backman V. Optical analysis of nanoparticles via enhanced backscattering facilitated by 3-D photonic nanojets// *Optics Express*. – 2005. – № 13(2) – P. 526–533.
3. Kong S.-C., Sahakian A., Heifetz A., Taflove A., Backman V. Robust detection of deeply sub-wavelength pits in simulated optical data-storage disks using potonic jets // *Appl. Phys. Lett.* – 2008. – Vol. 92. – P. 211102.
4. Соффер В.А. Дифракционная нанофотоника и перспективные информационные технологии // *Вестн. РАН.* – 2014. – Т. 84, № 1. – С. 11 – 22.
5. Гейнц Ю.Э., Землянов А.А., Панина Е.К. Эффект фотонных наноструй в многослойных микронных сферических частицах // *Квантовая электроника.* – 2011. – Т. 41, № 6. – С. 520–525.
6. Heifetz A., Huang K., Sahakian A., Li X., Taflove A., Backman V. Experiment confirmation of backscattering enhancement induced by a potonic jets // *Appl. Phys. Lett.* – 2006. – Vol. 89. – P. 221118.
7. Минин И.В., Минин О.В. Фотоника изолированных диэлектрических частиц произвольной трехмерной формы – новое направление оптических информационных технологий // *Вестн. Новосибир. гос. ун-та* – 2014. – Т. 12, вып. 4. – С. 59–70.

УДК 536.46

ОГНЕЗАЩИТНЫЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ФУТЕРОВКИ ТЕПЛОВЫХ АГРЕГАТОВ

Дятлова Е.М.¹, Шамкалович В.И.¹, Попов Р.Ю.², Мухлядо В.И.²

¹Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

²Белорусский государственный технологический университет, Минск, Республика Беларусь

Особый интерес для практического использования применительно к алюмосиликатным огнеупорам представляют новые покрытия, полученные по СВ-технологии (самораспространяющегося высокотемпературного синтеза), получившие название защитно-упрочняющих оксидно-керамических (ОКП). ОКП предназначены для нанесения их на поверхность алюмосиликатных изделий и теплоизоляционных материалов, используемых в футеровках металлургических печей и котельных установок, печей по производству строительных материалов и др. Оксидно-керамические покрытия, нанесенные на поверхность огнеупоров, расширяют область температурного применения огнеупорной основы, при-

водят к значительному уменьшению физико-химической и механической эрозии ее поверхности, заметно (на 50–100 °С) повышают температурные ресурсы огнеупоров в условиях статических и динамических (в том числе циклических) воздействий агрессивных сред и высокотемпературных газовых и пылевых потоков.

ОКП образуются на поверхности шамотных огнеупоров, в том числе легковесных и ультра-легковесных, в процессе инициирования реакции СВС в обычном режиме эксплуатации тепловых агрегатов при 700–850 °С. Толщина огнеупорного покрытия может быть различной (1–4 мм) в зависимости от производственной необходимости. Сочетание специально подобранных компо-