

В.А. Зацепин, Н.Р. Садыков, М.О. Садыкова, В.К. Филиппов, А.Н. Щербина

О возможности создания нестационарного волноводного канала на основе удлинённых наночастиц

*Российский федеральный ядерный центр –
Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики,
подразделение – Центр проблем безопасности ядерной энергетики,
г. Снежинск, Челябинская обл.*

Поступила в редакцию 8.12.2005 г.

Для СВЧ-излучения в диапазоне длины волны $\lambda = 1\div 10$ см показана возможность создания нестационарного многомодового волноводного канала из проводящих вытянутых вдоль одного направления наночастиц, исходя из их концентрации в воздухе 1 г на 1 м³. Показано, что если длина частиц превосходит поперечные размеры в 10–20 раз, то величина апертуры вводимого излучения составляет 13–22°, что в 4–7 раз больше, чем для наночастиц сферической формы. Резкое увеличение поляризуемости вытянутых наночастиц позволяет уменьшить их объемную концентрацию. При стократном удлинении наночастиц напряженность поля волны может достигать $\sim 10^4$ В/см, при этом не будет режима воспламенения наночастиц за счет полевой эмиссии.

В [1] был рассмотрен волноводный канал в воздухе на основе примеси наночастиц сферической формы и было показано, что если в длинном воздушном цилиндре L радиуса ρ_0 в газообразной среде с диэлектрической проницаемостью ϵ_1 (для воздуха $\epsilon_1 = 1$) распылены наночастицы радиуса R с диэлектрической проницаемостью ϵ_2 , то диэлектрическую проницаемость смеси $\epsilon_{см}$ можно найти по формуле [2, с. 69]:

$$\epsilon_{см} = \epsilon_1 + c_1 \frac{3(\epsilon_2 - \epsilon_1)}{\epsilon_2 + 2\epsilon_1} \epsilon_1, \quad (1)$$

где концентрация наночастиц n намного меньше концентрации молекул воздуха; $c_1 = nv$; $v = (4\pi/3)R^3$ – объем наночастицы. Если наночастицы являются незаряженными проводниками, то в (1) надо положить $\epsilon_2 \rightarrow \infty$. В этом случае диэлектрическая проницаемость смеси

$$\epsilon_{см} = \epsilon_1 + 3c_1\epsilon_1. \quad (2)$$

В [1] также было указано на возможность создания с помощью вихря квазистационарного волноводного канала на основе устойчивого объемного образования из наночастиц, а также оценено время существования вихря.

В данной статье показано, что использование удлинённых в одном направлении наночастиц позволяет при той же их массовой концентрации значительно увеличить в отличие от (2) диэлектрическую проницаемость смеси.

Для вытянутых наночастиц в соответствии с [2, с. 69] получим

$$\epsilon_{см} = \epsilon_1 + c_2 \frac{(\epsilon_2 - \epsilon_1)}{\epsilon_1 + (\epsilon_2 - \epsilon_1)N_x} \epsilon_1, \quad (3)$$

где $c_2 = n\tilde{v}$; \tilde{v} – объем вытянутой наночастицы; N_x – коэффициент деполаризации вытянутой наночастицы вдоль оси OX (поле считается также направленным вдоль оси OX). В общем случае коэффициенты деполаризации всегда удовлетворяют равенству

$$N_x + N_y + N_z = 1.$$

Для вытянутого эллипсоида $a \gg b = c$ с эксцентриситетом $e = \sqrt{1 - 1/p^2}$, $p = a/b$, имеет место [2, с. 44]:

$$N_x = \frac{1 - e^2}{e^3} (\text{Arth } e - e). \quad (4)$$

При $p \gg 1$ соотношение (4) может быть преобразовано к виду

$$N_x \approx \frac{1}{p^2} [\ln(2p) - 1], \quad (5)$$

где при выводе (5) учтено, что если при $p \gg 1$ положить $e = \text{th } \xi$, то имеет место $\xi = \ln(4p^2)$. Из (5) при $p = 10$ получим $N_x \approx 0,02$, а при $p = 20$ – $N_x \approx 0,0067$.

В случае $\epsilon_2 \gg \epsilon_1$ (например, наночастица состоит из проводящего материала) формула (3) запишется в виде

$$\epsilon_{см} = \epsilon_1 + 3c_2\epsilon_1/N_x. \quad (6)$$

При $c_2 = 10^{-3}$, $p = 10$ (это равносильно тому, что усредненная плотность графитовых наночастиц равна $1,7 \text{ кг/м}^3$) получим апертуру вводимого в волноводный канал электромагнитного излучения $\alpha \approx \sqrt{c_2/N_x} = 12,8^\circ$, а при $c_2 = 10^{-3}$ и $p = 20$ апертура $\alpha = 22,1^\circ$. В то же время для сферически симметричных наночастиц [1] апертура вводимого излучения (для сферических частиц $N_x = 1/3$) $\alpha \approx \sqrt{3c_1} = 3,1^\circ$. Поскольку при малых α вводимая в волноводный канал мощность пропорциональна телесному углу $\Omega = 4\pi \sin^2(\alpha/2) \approx \pi\alpha^2$, то при $10 \leq p \leq 20$ вводимая мощность по сравнению со сферически симметричными частицами увеличится в $17 \div 51$ раз.

При распространении излучения в световодах существует одномодовый и многомодовый режимы распространения излучения [3]. Для одномодового режима возможно только волновое (модовое) описание процесса распространения излучения. Для многомодового режима процесс распространения излучения можно описать как на основе метода геометрической оптики, так и на основе метода мод. При использовании метода мод роль апертуры для вводимого излучения выполняет оптический объем световода V ([1] или [3, с. 192]):

$$V = k\rho_0 \sqrt{n_{co}^2 - n_{cl}^2} = k\rho_0 \sqrt{3c_2\varepsilon_1/N_x}, \quad (7)$$

где $k=2\pi/\lambda$, λ — длина электромагнитной волны; n_{co} , n_{cl} — соответственно показатели преломления сердцевин и оболочки световода; ρ_0 — радиус сердцевин световода. Считая $p = 10$, $\lambda = 3 \text{ см}$, $\varepsilon_1 = 1$, $c_2 = 10^{-3}$, $\rho_0 = 10 \text{ см}$, получим $V = 8,1$. Это означает, что в таком волноводе можно генерировать моды вплоть до HE_{41} и EH_{21} мод (см. [1] или [3, с. 273]). Аналогичные результаты расчетов для $p = 20$ при прочих одинаковых условиях дают $V = 14,0$. Видно, что оптический объем чувствителен в величине p . При этом $1,7 \text{ кг}$ графитовых наночастиц, изготовленных в виде вытянутых эллипсоидов, позволяет создать волноводный канал протяженностью $L \approx 19 \text{ м}$.

Теперь оценим характерное время, за которое под влиянием внешнего поля наночастица будет развернута вдоль поля. Для этого достаточно определить период или, что то же самое, циклическую

частоту малых колебаний частицы. В соответствии с [2, с. 66] в однородном электрическом поле E_0 действующий на проводящий эллипсоид вращающий момент K при $p \gg 1$ можно записать в виде

$$K = vE_0^2 \sin 2\alpha / (8\pi N_x).$$

Учитывая при $p \gg 1$ момент инерции эллипсоида вращения $I \approx ma^2/5$, получим, что циклическая частота малых колебаний

$$\omega = \sqrt{\frac{E_0^2}{4\pi N_x \rho a^2} \cdot 5}.$$

Считая, что $E_0^2/(4\pi) = 10 \text{ Дж/м}^3$, $N_x = 0,01$, $\rho = 2 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ — плотность вещества наночастиц, $a = 100 \text{ нм} = 10^{-7} \text{ м}$, получим $\omega \approx 3 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$. Это означает, что в случае излучения сантиметровой длины поле не влияет на изменение ориентации вытянутых наночастиц. Поэтому можно считать, что наночастицы имеют изотропное распределение по углу.

Таким образом, полученные оценки совместно с результатами работы [1] показывают возможность создания волноводного канала с использованием наночастицы типа графита. При этом наночастицы с вытянутой мононаправленной геометрией позволяют увеличить оптический объем, что в свою очередь приводит к уменьшению массовой концентрации наночастиц при фиксированном числе направляемых мод, либо, при неизменной массовой концентрации, к увеличению числа направляемых мод (к увеличению апертуры). Кроме того, рассмотренная в работе задача представляет самостоятельный интерес при движении излучения по волноводному каналу, оставляемому самолетом. В этом случае при соответствующей апертуре возможны захват и отражение излучения от самолета, находящегося на большем расстоянии, чем исследуемый объект.

1. Зацепин В.А., Смыслов В.П., Садыков Н.Р., Садыкова М.О., Филиппов В.К., Щербина А.Н. О возможности создания нестационарного волноводного канала на основе наночастиц // Оптика атмосф. и океана. 2004. Т. 17. № 2–3. С. 168–170.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. М.: Наука, 1982. 656 с.
3. Снайдер А., Лав Дж. Теория оптических волноводов. М.: Радио и связь, 1987. 620 с.

V.A. Zatsepin, N.R. Sadykov, M.O. Sadykova, V.K. Filippov, A.N. Shcherbina. On a possibility of producing a nonstationary waveguide channel based on extended nanoparticles.

For microwave radiation at $\lambda = 1 \div 10 \text{ cm}$, a possibility was shown to produce a nonstationary multimode waveguide channel of conducting nanoparticles extended in one direction at their concentration in air of 1 g/м^3 . It was shown that if the length of the particles is 10–20 times then greater their cross dimensions, the aperture for input radiation is 13–22°, what is 4–7 times larger than for spherical nanoparticles. The rapid increase in polarizability of extended nanoparticles allows the volume concentration of nanoparticles to be decreased. At the hundred-fold extension of nanoparticles, the wave-field intensity can reach $\sim 10^4 \text{ V/cm}$, at which the mode of nanoparticles ignition is impossible.