

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

## **О возможности создания нестационарного волноводного канала на основе наночастиц**

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

Поступила в редакцию 4.12.2003 г.

Для СВЧ-излучения в диапазоне длины волны  $\lambda = 1 + 10$  см показана возможность создания нестационарного волноводного канала из проводящих наночастиц, исходя из их концентрации в воздухе 1 г на 1 м<sup>3</sup>. Из расчетных оценок следует, что для создания канала протяженностью 100 м достаточно 1 + 10 кг наночастиц. Диапазон мощности передаваемого излучения зависит от величины эллипсоидальности частиц. При распространении электромагнитного излучения для сильно вытянутых наночастиц возможен режим воспламенения волнового канала.

В технике в последние годы нашли широкое применение волноводы со световедущей сердцевинной и прозрачной для излучения оболочкой [1]. Как сердцевина, так и оболочка являются диэлектриками, т.е. такие волноводы (световоды) не содержат электропроводящей области. Локализация излучения в световедущей сердцевине происходит за счет того, что диэлектрическая проницаемость сердцевины больше диэлектрической проницаемости оболочки. Например, в случае световода для излучения в видимом диапазоне относительная разность диэлектрических проницаемостей сердцевины и оболочки составляет  $(2 + 3) \cdot 10^{-3}$ . Такая небольшая разность показателей преломления сердцевины и оболочки означает, что в однородной среде наличие локализованного в протяженном цилиндре небольшого количества вещества другого сорта с большей диэлектрической проницаемостью приведет к наличию волноводного канала. В качестве однородной среды рассмотрим воздух, а в качестве другого вещества рассмотрим наночастицы из диэлектрика. Для получения эффекта оценим оптимальную концентрацию частиц в волноводном канале. Следует отметить, что для создания стационарного или квазистационарного волноводного канала необходимо устойчивое объемное образование наночастиц. Квазистационарный волноводный канал может быть создан с помощью вихря. В этом случае в работе будет оценено время существования вихря.

Приступим к рассмотрению сформулированной задачи. Предположим, что в длинном воздушном цилиндре  $L$  радиуса  $\rho_0$  распылены наночастицы радиуса  $R$  с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_2$ . Пусть диэлектрическая проницаемость газообразной среды  $\epsilon_1$  (для воздуха  $\epsilon_1 = 1$ ), а концентрация наночастиц намного меньше концентрации молекул

воздуха. В этом случае диэлектрическая проницаемость смеси  $\epsilon_{см}$  будет равна [2, с. 69]:

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

где  $\nu = (4\pi/3)R^3$  — объем наночастицы;  $n$  — концентрация наночастиц. Когда наночастицы являются незаряженными проводниками, в (1) надо положить  $\epsilon_2 \rightarrow \infty$ . Тогда

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

Рассмотрим случай  $n\nu = 10^{-3}$  (это равносильно тому, что осредненная плотность наночастиц равна 1,7 кг/м<sup>3</sup>). Предположим, что в цилиндре концентрация наночастиц не зависит от координат. Тогда функция показателя преломления среды  $\tilde{n} = \sqrt{\epsilon}$  будет иметь вид ступенчатой функции:

$$\tilde{n}^2 = \begin{cases} n_{co}^2 \epsilon_1 = (1 + 3n\nu), & 0 \leq r \leq \rho_0 \\ n_{cl}^2 = \epsilon_1, & r \geq \rho_0 \end{cases}, \quad (3)$$

где предполагается, что у наночастиц  $\epsilon_2 \rightarrow \infty$  (здесь  $n_{co}$  и  $n_{cl}$  — показатели преломления, соответственно, сердцевины и оболочки волновода).

В волноводе (3) в зависимости от  $\rho_0$  и длины волны  $\lambda$  могут распространяться одна и более направляемых мод. Направляемые моды могут практически без потерь распространяться на большие расстояния.

Теперь определим для одномодового режима величину  $\rho_0$  и оценим долю мощности излучения, которая приходится на направляемую моду, а также оценим длину волновода  $L$  для  $c = n\nu = 10^{-3}$ . Введем оптический объем

$$V = n_{co} k \rho_0 \sqrt{2\Delta} \equiv k \rho_0 \sqrt{n_{co}^2 - n_{cl}^2}, \quad (4)$$

где  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $\lambda$  — длина электромагнитной волны;  $\Delta = \text{const}$ . Известно, что одномодовый режим волновода определяется из условия  $0 < V \leq 2,405$  [1, с. 272]. При  $V \rightarrow 0$  на направляемую моду приходится маленькая доля мощности, поскольку в этом случае пятно моды стремится к бесконечности, а при  $V \rightarrow 2,405$  начинает появляться другая направляемая мода. Поэтому оптимальным условием является  $V \approx 1$  (см. Приложение). В этом случае из (4) получим

$$\rho_0 = \lambda / (2\pi \sqrt{n_{co}^2 - n_{cl}^2}). \quad (5)$$

Предположим, что распыляется графит весом  $m = 1,7$  кг (плотность графита  $\rho_r = 1,7 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>). Тогда длина волновода канала  $L$  будет равна

$$L = \Lambda / (\pi \rho_0^2), \quad (6)$$

где  $\Lambda = m / (n v \rho_r) = 10^6$  см<sup>3</sup>;  $\rho_0$  — в сантиметрах.

Пусть  $\lambda = 1 \div 10$  см. Тогда в соответствии с (5) при  $n v = 10^{-3}$  получим радиус сердцевины  $\rho_0$  (радиус волноводного канала), равный  $2,9 \div 29$  см, а длина волноводного канала  $L$  соответственно будет меняться в интервале  $379 \div 3,79$  м.

Для придания устойчивости волноводному каналу можно создать вихревое вращение волноводного канала с примесью наночастиц. В этом случае волноводные свойства такого канала практически не изменятся, а система станет намного устойчивей [3, с. 143]. Оценим характерное время существования вихревого канала  $\tau$ . Предположим, что во вращающемся волновом канале линейная скорость точек имеет только  $\phi$ -ю компоненту, газ несжимаем. Тогда из уравнения Навье—Стокса получим для  $\phi$ -й компоненты скорости  $v$

$$\rho_r \frac{\partial v_\phi}{\partial t} = \eta \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial v_\phi}{\partial r} \right). \quad (7)$$

Предположим, что  $v_\phi$  изменяется по экспоненциальному закону:

$$v_\phi \sim \exp(-t/\tau). \quad (8)$$

Из (7) и (8) получим  $v_\phi$ , которая удовлетворяет уравнению

$$\frac{\partial^2 v_\phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\phi}{\partial r} + \frac{\rho_r}{\eta \tau} v_\phi = 0. \quad (9)$$

В окрестности  $r = 0$  решение (9) будет представлять собой функцию Бесселя

$$v_\phi = J_0 \left( \sqrt{\frac{\rho_r}{\eta \tau}} r \right), \quad (10)$$

где  $J_0(x)$  — функция Бесселя от переменной  $x$ .

Пусть радиус волноводного канала равняется  $\rho_0$ . Полагая, что при  $r = \rho_0$   $v_\phi \approx 0,5$ , где  $v_\phi(0) = 1$ ,

из (10) получим  $\sqrt{\rho_r / (\eta \tau)} \rho_0 \approx 1,5$ . Окончательно  $\tau \approx \rho_r \rho_0^2 / 1,5^2 \eta$ . Для воздуха  $\rho_r = 1,3$  кг/м<sup>3</sup>,  $\eta = 1,8 \cdot 10^{-5}$  кг/(м·с). Пусть  $\rho_0 = 6$  см (это соответствует случаю  $\lambda = 2,1$  см,  $L \approx 88$  м), тогда  $\tau \approx 116$  с. Аналогичные время дают результаты математического моделирования. Численно решалось уравнение (7) со следующими начальными и крайними условиями:

$$\frac{\partial}{\partial r} v_\phi(r=0) = 0, \quad v_\phi(r=a_r) = 0, \quad a_r = 5\rho_0.$$

На рис. 1 приведена зависимость  $v_\phi$  от  $r$  при  $t = 0$ ; 120 и 240 с. Из рис. 1 видно, что максимальное значение  $v_\phi$  уменьшается в два раза при  $t \approx 120$  с.

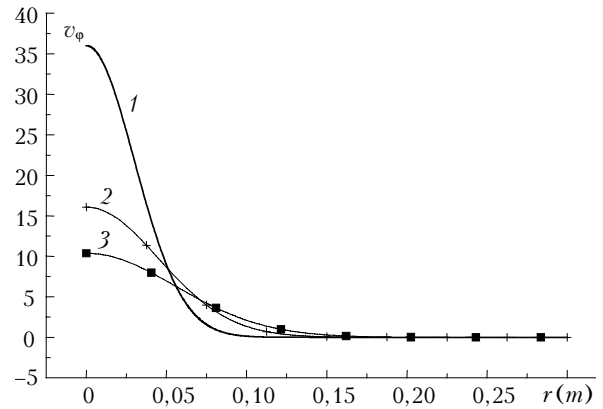


Рис. 1. Зависимость  $\phi$ -й компоненты линейной скорости точек среды от  $r$  в вихревом канале при  $t = 0$  (кривая 1),  $t = 120$  с (2) и  $t = 240$  с (3)

По мере увеличения  $\rho_0^2$  в зависимости от  $t$  концентрация наночастиц будет уменьшаться, причем при  $L = \text{const}$  будет иметь место соотношение  $\rho_0^2 n = \text{const}$ . Из (3) и (4) видно, что величина  $V^2$ , определяющая одномодовый режим распространения излучения, пропорциональна  $\rho_0^2 n$ . Это, в свою очередь, означает, что со временем одномодовый режим распространения излучения не будет меняться.

Таким образом, данные оценки показывают возможность создания волноводного канала с помощью наночастиц типа графита. Следует отметить, что волноводный канал, с которым мы часто сталкиваемся, является шлейфом за самолетом на большой высоте. Этот шлейф можно, например, использовать в качестве волноводного канала для излучения метровой длины. Длительность такого канала в зависимости от метеоусловий может достигать до 100 км.

## Приложение

Рассмотрим волноводный канал со ступенчатым профилем показателя преломления (ППП) при  $\lambda = 1$  см и при  $\rho_0 = 5$  см:

$$\tilde{n}^2 = \begin{cases} n_{co}^2 = 1,01, & 0 \leq r \leq \rho_0, \\ n_{cl}^2 = 1, & \rho_0 \leq r \leq 10\rho_0. \end{cases} \quad (\text{П.1})$$

В этом случае оптический объем равняется  $V = 3,14$ . Волновод будет содержать две моды —  $m = 0, N = 1$  и  $m = 1, N = 1$ . Постоянные распространения равняются  $\beta_{m=0, N=1} = 6,3043 \text{ см}^{-1}$  и  $\beta_{m=1, N=1} = 6,29 \text{ см}^{-1}$ . На рис. 2 приведены зависимости интенсивностей этих мод от радиуса, где нормировка функций выбиралась из условия  $\max \Psi_{m, N} = 1$ .

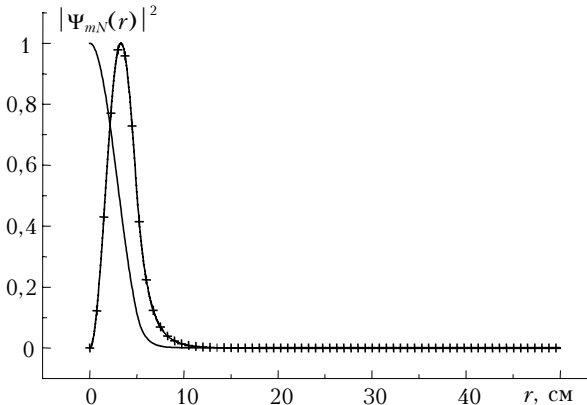


Рис. 2. Зависимости нормированных интенсивностей мод  $|\Psi_{m=1, N=1}|^2$  от  $r$  моды с  $m = 0, N = 1$  (сплошная кривая) и с  $m = 1, N = 1$  (кривая с маркером «+»)

Рассмотрим волноводный канал со следующим ступенчатым ППП при  $\lambda = 1 \text{ см}, \rho_0 = 5 \text{ см}$ :

$$\tilde{n}^2 = \begin{cases} n_{co}^2 = 1,001, & 0 \leq r \leq \rho_0, \\ n_{cl}^2 = 1, & \rho_0 \leq r \leq 10\rho_0. \end{cases} \quad (\text{П.2})$$

В этом случае оптический объем равняется  $V = 0,993$ . Волновод содержит одну моду  $m = 0,$

$N = 1$ . Постоянная распространения равняется  $\beta_{m=0, N=1} = 6,2833 \text{ см}^{-1}$ . Зависимость интенсивности такой моды от радиуса приведена на рис. 3.

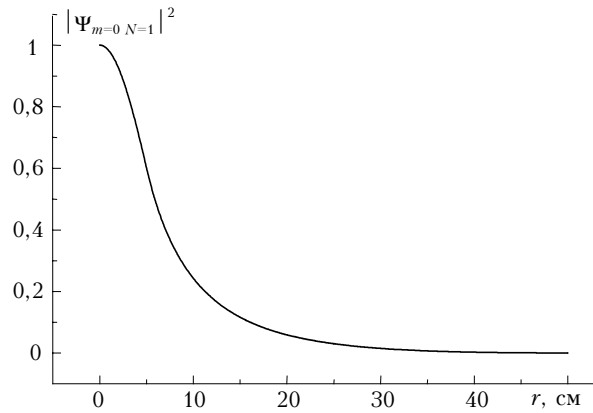


Рис. 3. Зависимость интенсивности основной моды ( $m = 0, N = 1$ ) от  $r$

Рассмотрим волноводный канал со следующим ППП:

$$\tilde{n}^2 = \begin{cases} n_{co}^2 = 1,0003, & 0 \leq r \leq \rho_0, \\ n_{cl}^2 = 1, & \rho_0 \leq r \leq 10\rho_0. \end{cases} \quad (\text{П.3})$$

Волновод содержит одну моду  $m = 0, N = 1$ . Постоянная распространения моды равняется  $\beta_{m=0, N=1} = 6,2831 \text{ см}^{-1}$ . В этом случае  $V$  равняется  $0,77$ .

1. Снайдер А., Дж. Лав. Теория оптических волноводов. М.: Радио и связь, 1987. 620 с.
2. Ландау Л.Д. и Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. М.: Наука, 1982. 656 с.
3. Ландау Л.Д. и Лифшиц Е.М. Гидродинамика. М.: Наука, 1988. 733 с.

*V.A. Zatsepin, V.P. Smyslov, N.R. Sadykov, M.O. Sadykova, V.K. Filippov, A.N. Shcherbina.*  
**On the possibility of creating a non-stationary waveguide channel based on nanoparticles.**

For microwave-radiation in the wavelength range  $\lambda = 1 \div 10 \text{ cm}$ , the possibility of creating of non-stationary waveguide channel from conducting nanoparticles is shown based on their concentration in air  $1 \text{ g/m}^3$ . The estimates show that for creation of a channel with the length of  $100 \text{ m} \div 10 \text{ kg}$  of nanoparticles is enough. The power range of transmitted radiation depends on how ellipsoidal are the particles. At electromagnetic radiation propagation for strongly prolate nanoparticles, the condition of the wave channel ignition is possible.