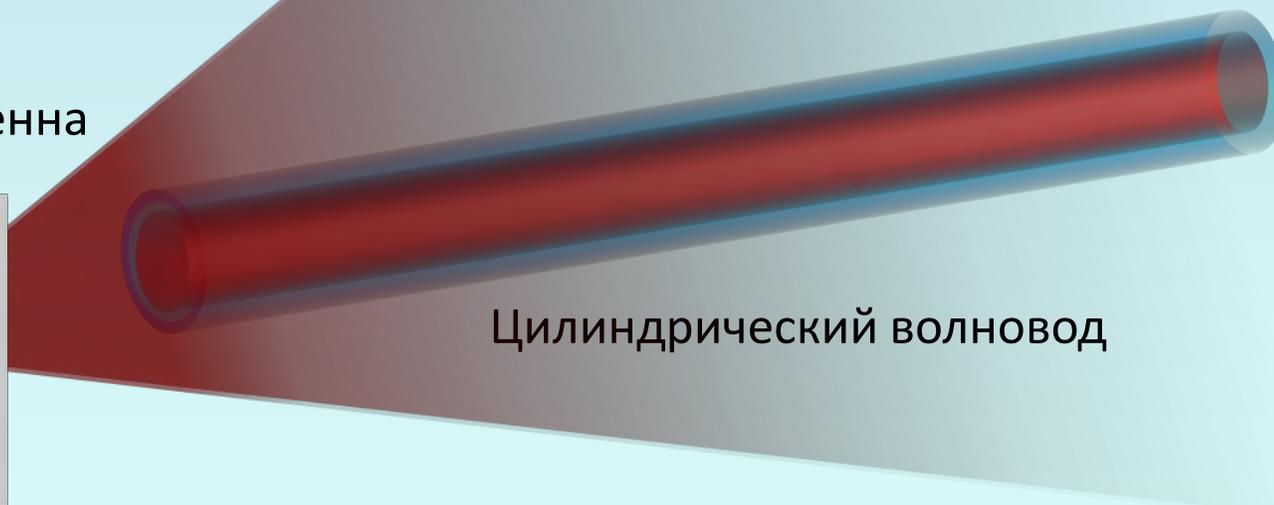

11.4 Виртуальный СВЧ волновод

Динамические СВЧ волноводы

Возможно ли создание эффективного волновода из плазменных каналов фемтосекундных лазерных филаментов?

СВЧ Антенна



Цилиндрический волновод

$$\lambda = 1 \text{ м} - 1 \text{ мм}$$

$$\nu = 300 \text{ МГц} - 300 \text{ ГГц}$$

Типичные параметры плазменных каналов филаментов в воздухе

- Диаметр канала $d_{pl} = 20 \div 50$ мкм

- Электронная плотность $N_e = 10^{15} \div 10^{16}$ см⁻³

- Мгновенная длина канала $L_{pl} = c\tau_{ei} = 1 \div 3$ м, где
 $\tau_{ei} = 3 \div 10$ нс — время электрон-ионной рекомбинации

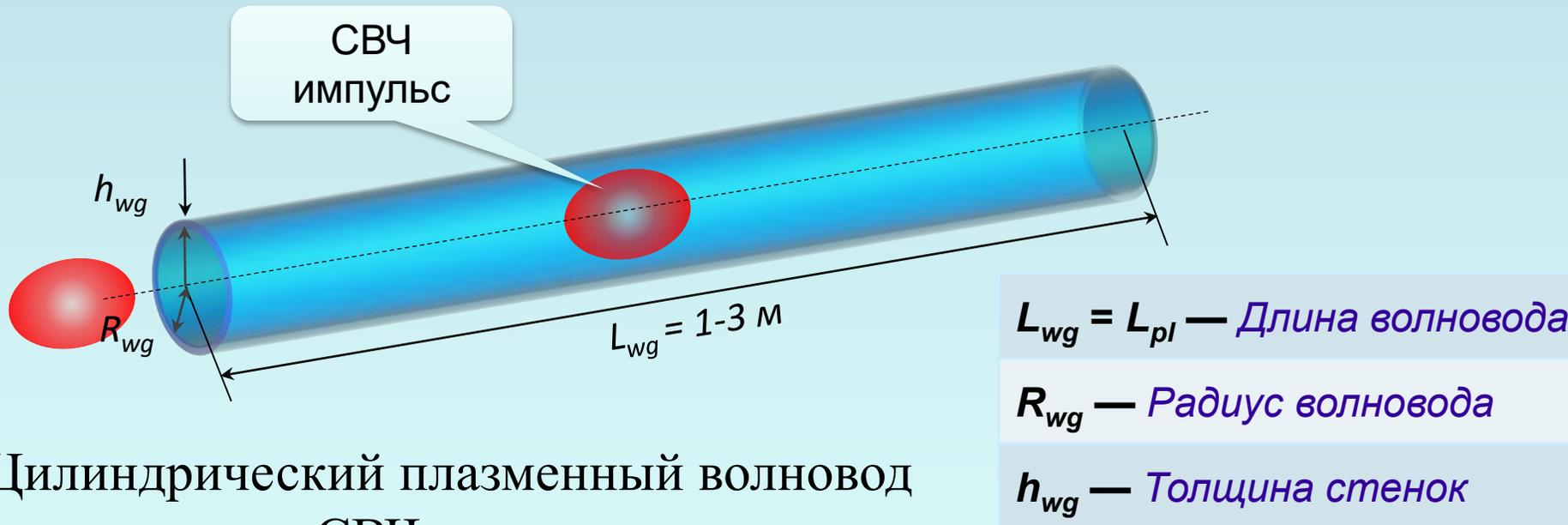
- Длина распространения вплоть до 100 м

- Плазменная частота $\omega_p = \sqrt{4\pi e^2 N_e / m_e} = (3 \div 9) \times 10^{12}$ с⁻¹

- Эффективная частота столкновений $\nu_m \sim 10^{12}$ с⁻¹

Распространение СВЧ импульса в волноводе из плазменных каналов филаментов

Распространение СВЧ импульса в плазменном волноводе длиной несколько метров, летящим со скоростью света, эквивалентно распространению в неограниченном волноводе



Цилиндрический плазменный волновод для СВЧ излучения.

Диэлектрическая проницаемость и проводимость плазмы для СВЧ излучения

$$\varepsilon = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega_{MW}^2 + \nu_c^2}$$

$$\sigma = \frac{1}{4\pi} \frac{\omega_p^2 \nu_c}{\omega_{MW}^2 + \nu_c^2}$$

Толщина скин-слоя

$$\delta = c / \sqrt{2\pi\sigma\omega_{MW}}$$

$$\omega_p = (4\pi e^2 N_e / m_e)^{1/2}$$

$\nu_c = N_0 v_e \sigma_c$ – *эффективная частота упругих столкновений электронов с нейтральными частицами среды*

В плазме филаментов в воздухе при атмосферном давлении частота столкновений $\nu_c \approx 0.5 \times 10^{12}$ Гц, сравнима с плазменной частотой $\omega_{pl} \approx (1...5) \times 10^{12}$ Гц при концентрации электронов $N_e = 10^{15} \dots 10^{16}$ см⁻³

Оценка длины волны СВЧ излучения и толщины стенок плазменного волновода

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \frac{4\pi}{c} \vec{j} + \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \frac{4\pi}{c} \left(\vec{j} + \frac{1}{4\pi} \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right)$$

$$\vec{j} = \sigma \vec{E}; \quad \vec{D} = \varepsilon \vec{E}; \quad \vec{E} = \vec{E}_0 e^{i\omega_{MW} t}$$

$$\vec{j} + \frac{1}{4\pi} \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \left(\sigma + \frac{i}{4\pi} \varepsilon \omega_{MW} \right) \vec{E}$$

Ток проводимости

Ток смещения

Проводящие свойства преобладают над диэлектрическими, если

$$\frac{4\pi\sigma}{|\varepsilon|\omega_{MW}} > 1$$

$$\lambda_{MW} > 0,5 \text{ см}$$

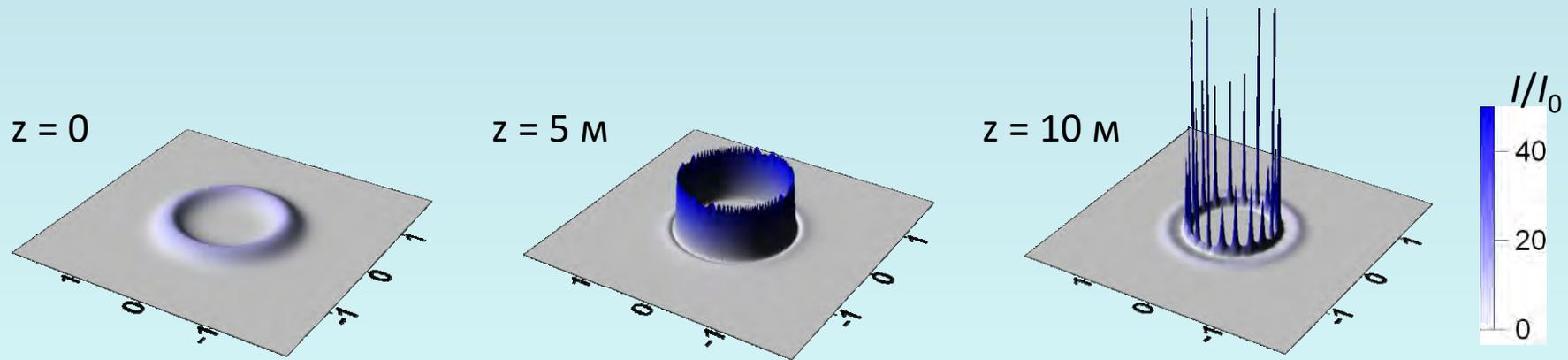
$N_e, \text{ см}^{-3}$	$\lambda_{MW} = 1 \text{ см}$		$\lambda_{MW} = 3 \text{ см}$	
	$\sigma, \text{ Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$	$\delta, \text{ мкм}$	$\sigma, \text{ Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$	$\delta, \text{ мкм}$
10^{15}	0,47	420	0,52	700
10^{16}	4,71	135	5,22	220
10^{17}	47,1	42	52,2	70
Медь (10^{22})	$6 \cdot 10^5$	0,4	$6 \cdot 10^5$	0,7

Толщина стенок h_{wg} должна превышать глубину скин-слоя δ :

$$h_{wg} > \delta \sim 1 \text{ мм}$$

Филаментация кольцевого пучка

Эволюция интенсивности в центральном слое импульса
 $I_0 = 10^{11} \text{ ВТ/см}^2$, $R_{WG} = 3 \text{ см}$



Вследствие модуляционной неустойчивости
кольцо распадается на отдельные нити

Регулярный кольцевой пучок, состоящий из узких гауссовских пучков, расположенных по кругу

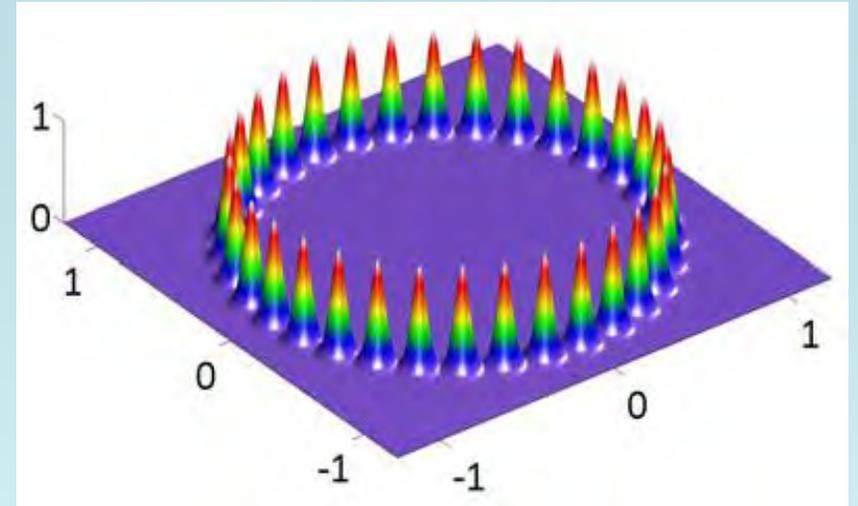
Начальное распределение интенсивности:

$$I(x, y, z = 0) = \sum_{l=0}^{N-1} I_l, \quad I_l = I_0 \exp\left(-\frac{(x - x_l)^2}{r_0^2} - \frac{(y - y_l)^2}{r_0^2}\right),$$

где $x_l = R_{wg} \cos(2\pi l/N), \quad y_l = R_{wg} \sin(2\pi l/N),$

r_0 — радиус отдельных гауссовских пучков,

N — количество гауссовских пучков

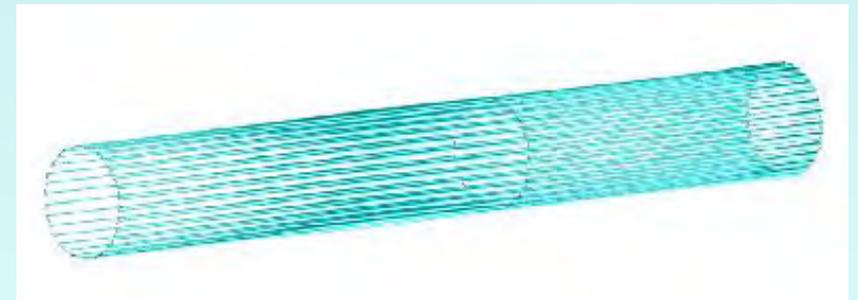


Если $P_l = I_0 \pi r_0^2 > P_{cr}$, получаем дискретный цилиндрический набор плазменных каналов

Толщина стенки «цилиндра»

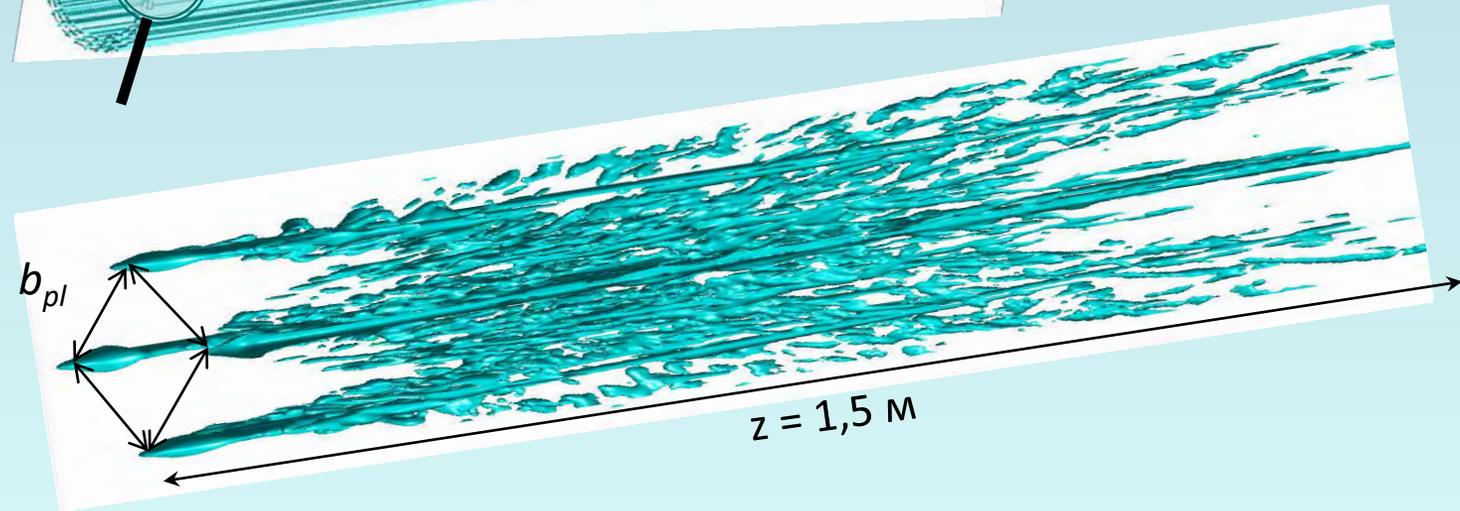
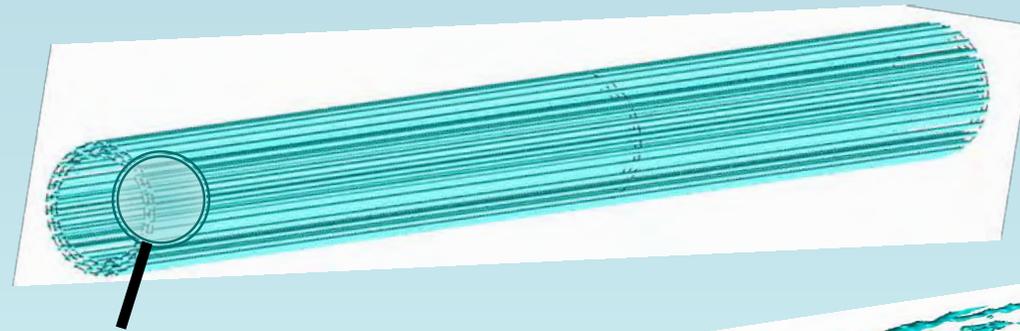
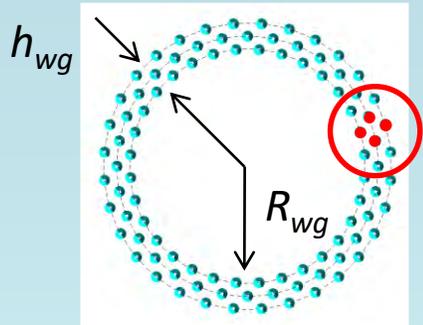
$$h = d_{pl} = 20 \div 50 \text{ мкм}$$

$$h \ll \delta = 1 \text{ мм}$$



- много меньше глубины скин-слоя

Тройное кольцо филаментов



$$b_{pl} = 0,7 \text{ мм}$$

$$P_i \approx 3P_{cr}$$

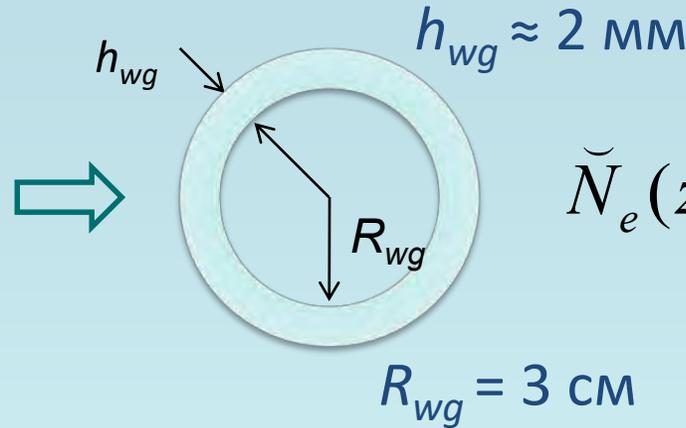
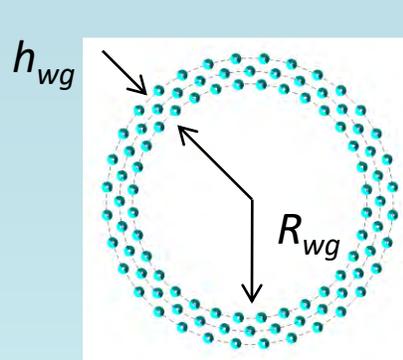
$$N = 900$$

Поверхности равной концентрации электронов $N_e = 10^{15} \text{ см}^{-3}$

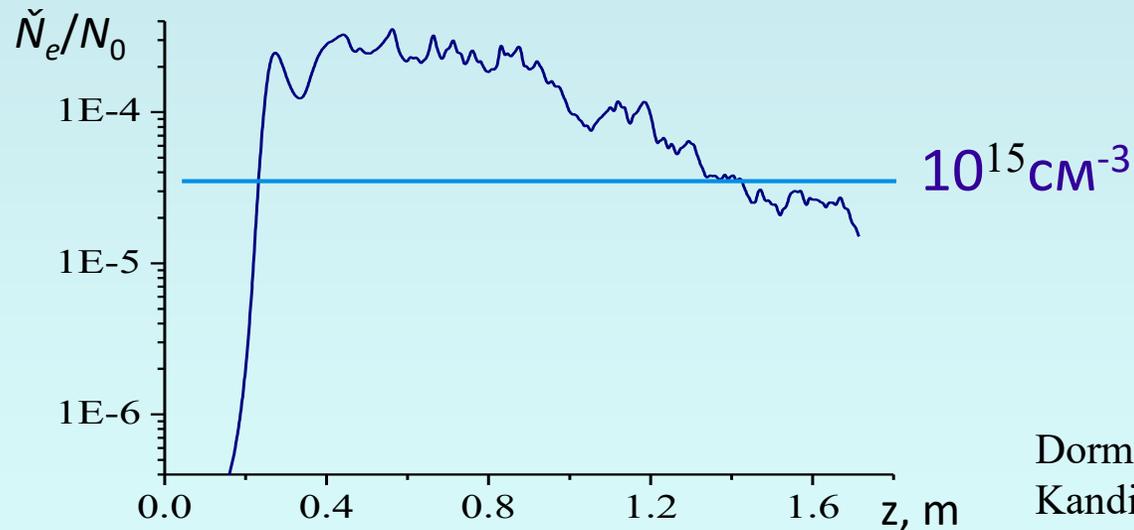
$$h_{wg} > \delta \sim 2 \text{ мм}$$

Эффективная электронная плотность плазменного волновода

$$\lambda_{MW} = 3 \text{ см} \gg b_{pl} \approx 0,7 \text{ мм} \Rightarrow$$



$$\tilde{N}_e(z) = \frac{1}{S_{\text{кольца}}} \int_0^{2\pi} d\varphi \int_{R_{wg}}^{R_{wg}+h_{wg}} N_e(r, \varphi, z) r dr$$

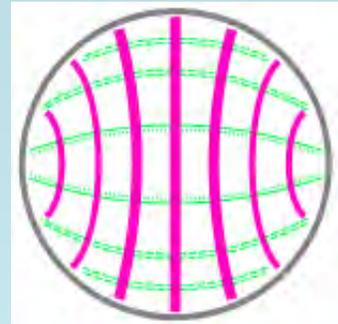


$$P = N \cdot P_i \approx 3000 P_{cr} \approx 5 \text{ ТВт}$$

Dormidonov A.E., Valuev V.V., Dmitriev V.L., Shlenov S.A., Kandidov V.P. Proc. SPIE. 2007. V. 6733. P. 67332S.

Валуев В.В., Дормидонов А.Е., Кандидов В.П., Шленов С.А. и др. Радиотехника и электроника, том 55, № 2, с. 222-229 (2010)

Энергетические потери СВЧ излучения. TE₁₁ мода цилиндрического волновода



Продольное волновое число

$$h = h' + ih''$$

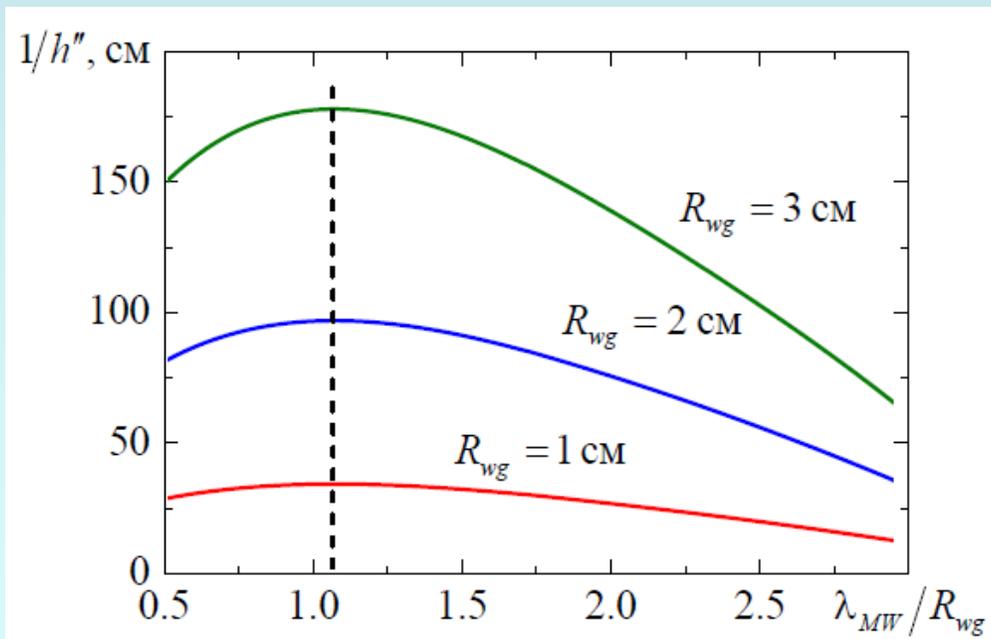
Виноградова М.Б., Руденко О.В.,
Сухоруков А.П. Теория волн.

$$h' = \sqrt{k_0^2 - k_{cr}^2}, \quad h'' = \frac{\delta}{2(\mu_{11}^2 - 1)R_{wg}h'} \left(k_0^2 + \mu_{11}^2(\mu_{11}^2 - 1)/R_{wg}^2 \right),$$

где $k_0 = \omega_{MW}/c$, $k_{cr} = \mu_{11}/R_{wg}$

$$\mu_{11} \approx 1.84$$

$$\lambda_{MW} < \lambda_{cr} = 2\pi/k_{cr} \approx 3.4R_{wg}$$



Длина экстинкции для $\check{N}_e = 10^{16} \text{ см}^{-3}$

$$\check{N}_e \approx 10^{15} \div 10^{16} \text{ см}^{-3}$$

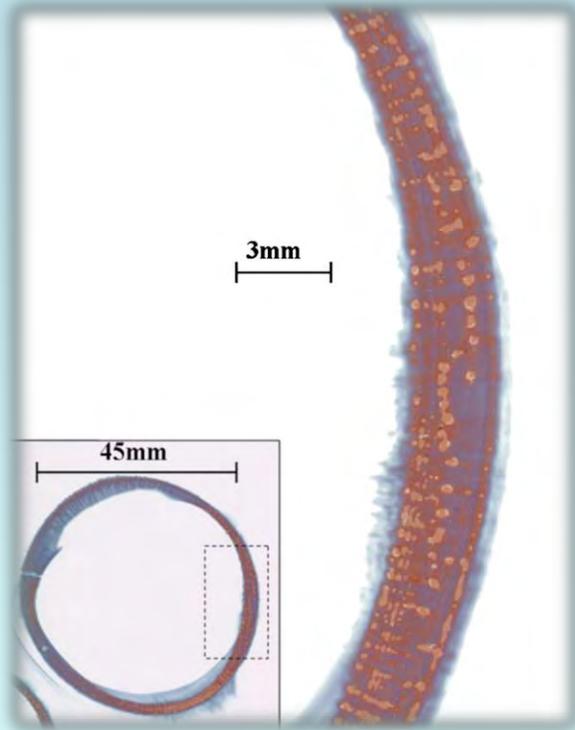
Длина экстинкции $\sim 1,5$ м

$$z_{диф} = \frac{2\pi}{\lambda_{WG}} R_{WG}^2 = \frac{6,28}{3} 9 \text{ см} \approx 20 \text{ см}$$

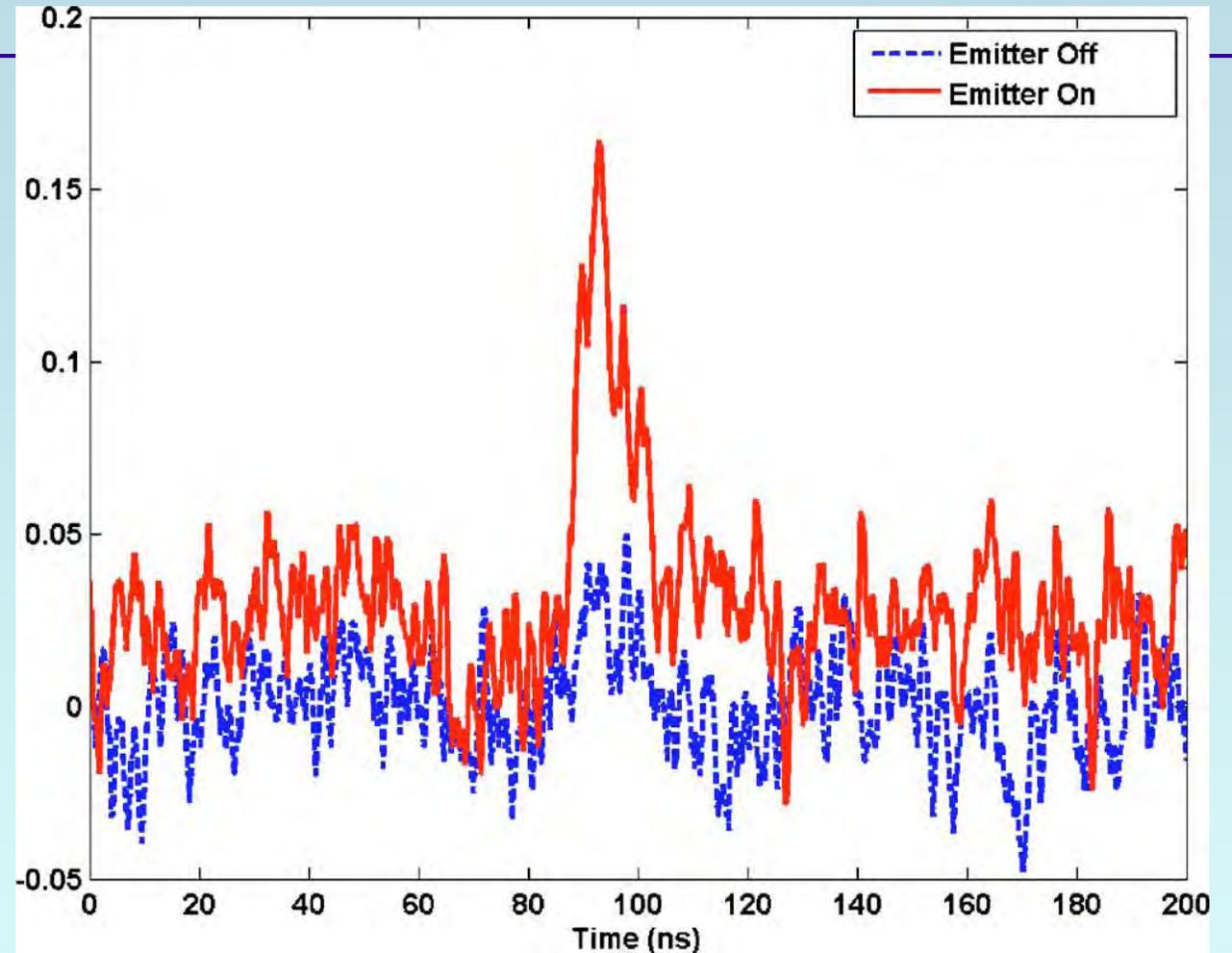
Длина экстинкции в 7-8 раз больше, чем дифракционная длина при свободном распространении

Экспериментальное подтверждение

Châteauneuf M., Payeur S., Dubois J., Kieffer J.-C.
// Appl. Phys. Lett., v. 92, 091104 (2008).

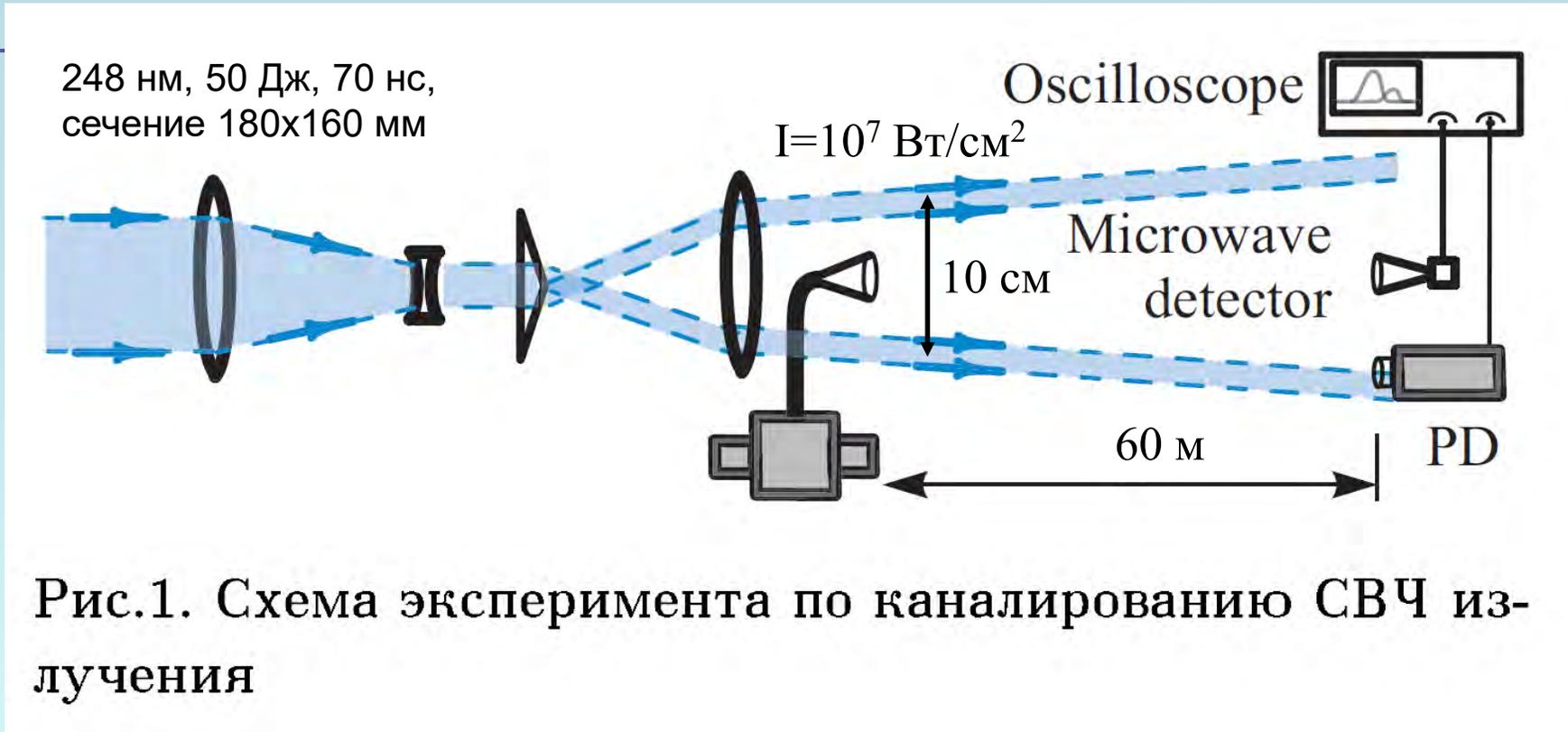


С помощью биморфного зеркала в импульсе (800 нм, 27 фс, 1.5 Дж, **100 ТВт**, 10 Гц) формировалась цилиндрическая структура из 1030 филаментов.



При возникновении с частотой 10 Гц динамического волновода СВЧ сигнал возрастал в 6 раз по сравнению со свободным распространением.

Протяженные СВЧ волноводы



Плазменный волновод большого радиуса создавался при фотоионизации примесной добавки УФ-излучением KrF-лазера. Наблюдалась транспортировка СВЧ сигнала на частоте 35,3 ГГц ($\lambda = 8 \text{ мм}$) на расстояние до 60 м.

$N_e = 10^9 \text{ 1/см}^3$ в чистом воздухе

$N_e = 10^{12} \text{ 1/см}^3$ с добавкой летучих углеводородов

Зворыкин В.Д., и др. // Письма в ЖЭТФ. 2010. № 91, С. 244-248.

Основные свойства фемтосекундных филаментов, используемые в атмосферных приложениях

Высокая плотность энергии

FIBS

Генерация суперконтинуума

**Широкополосный
фемтосекундный лидар**

Формирование плазменных каналов

**Управление разрядом,
динамический СВЧ волновод**