



Объединенный институт высоких температур РАН

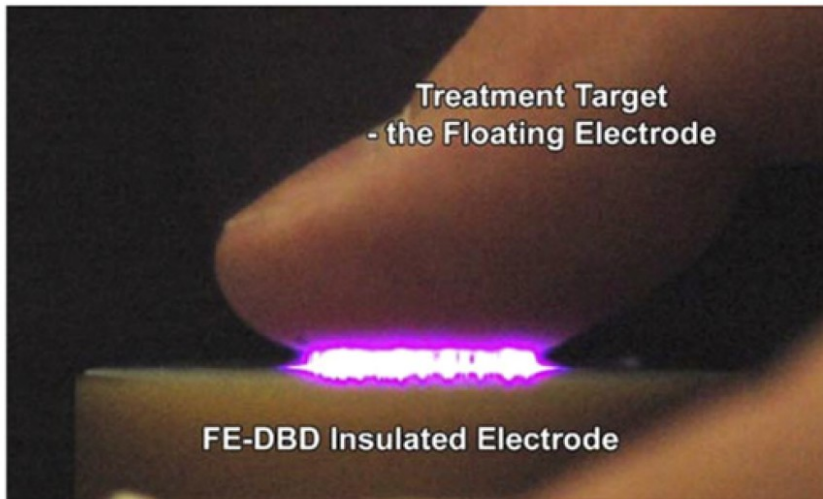
Моделирование холодных плазменных струй

Г.В. Найдис

Ученый совет ОИВТ РАН, 16 октября 2014 г.

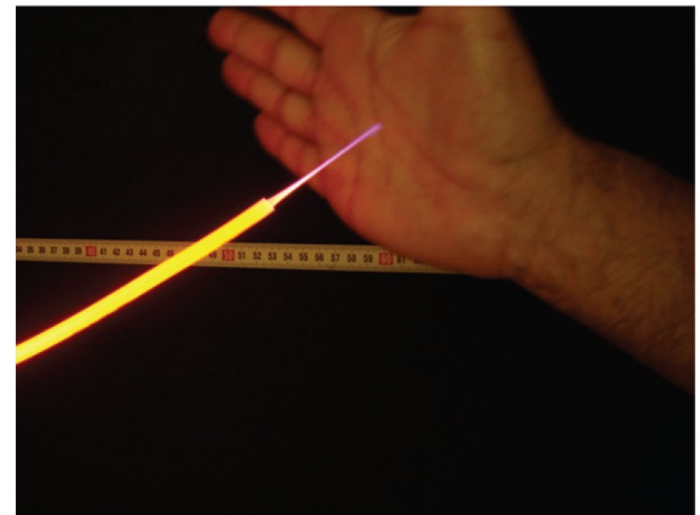
Генераторы плазмы для биомедицинских приложений

Fridman e.a. (2007)



Барьерный разряд

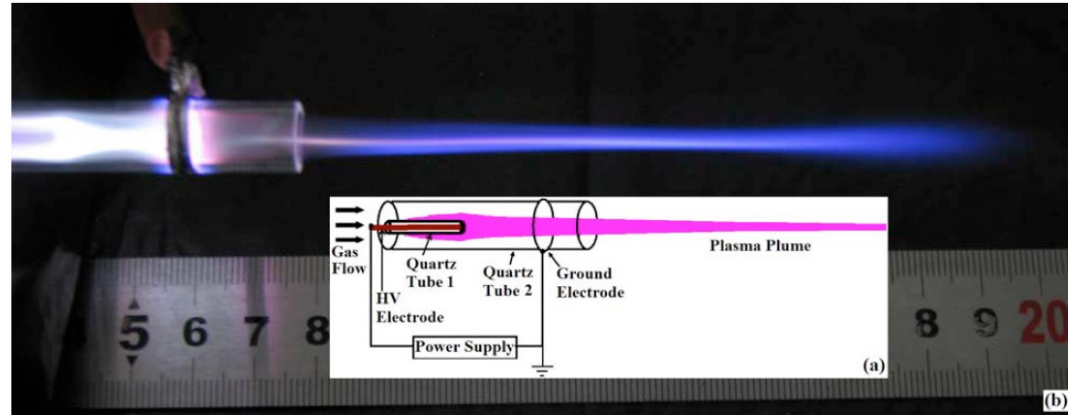
Robert e.a. (2009)



Плазменная струя

Плазменные струи

Lu e.a. (2008)



Weltmann e.a. (2010)

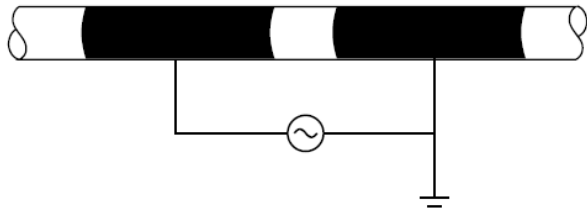


Glass capillary penetration

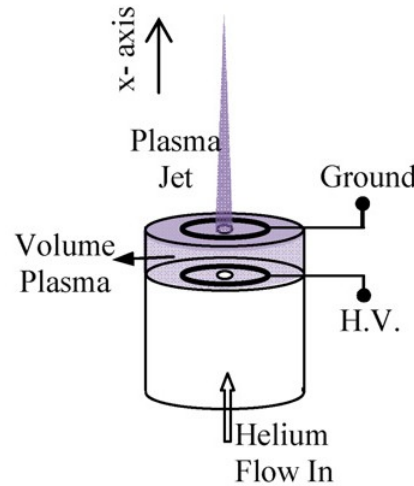


Elastic plastic tubing penetration

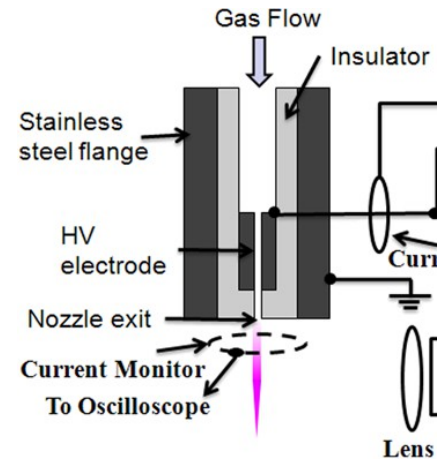
Конфигурации разрядов, генерирующих плазменные струи



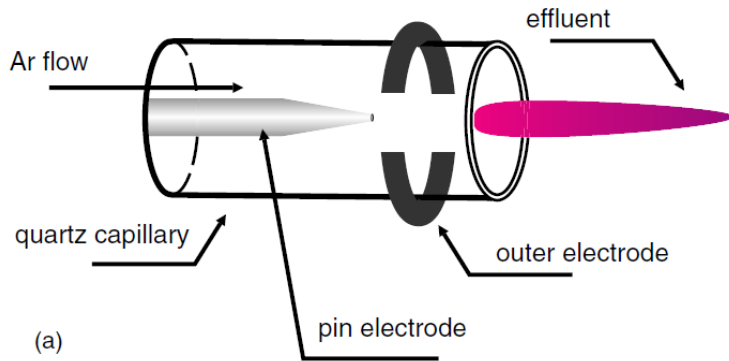
Teschke e.a. (2005)



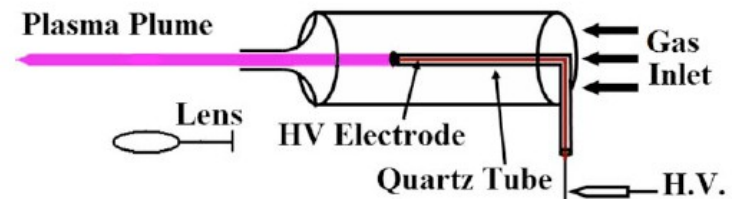
Laroussi e.a. (2006)



Jiang e.a. (2009)



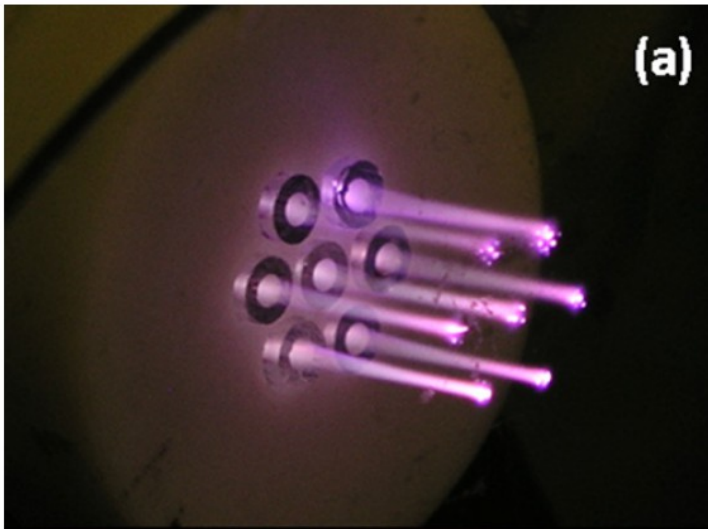
Bussiahn e.a. (2010)



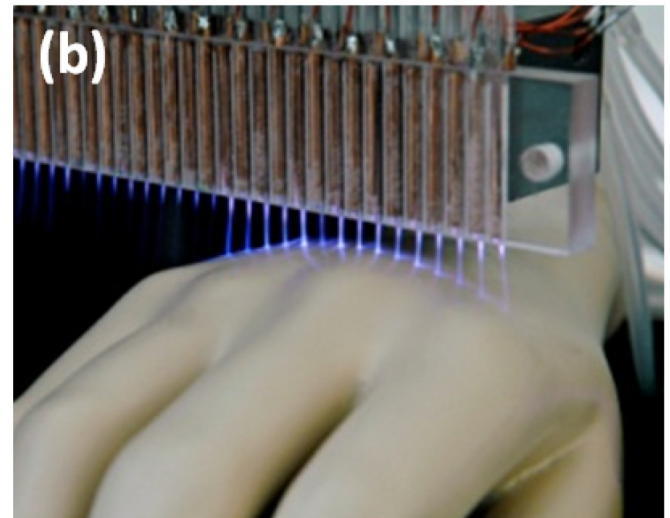
Xiong e.a. (2010)

Наборы плазменных струй

Сао е.а. (2010)



Kong е.а. (2011)



Обработка поверхностей

Forster e.a. (2005)

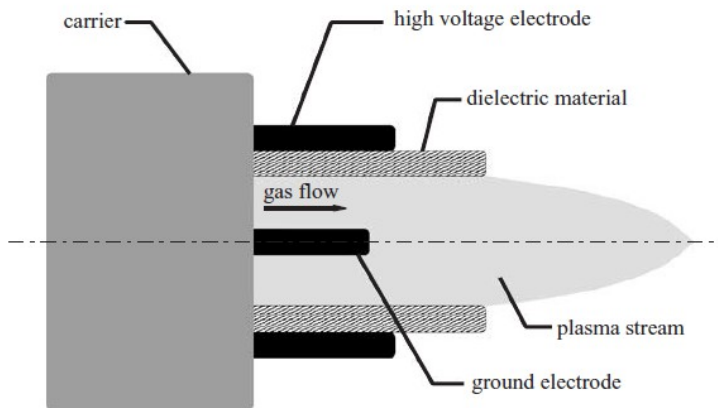
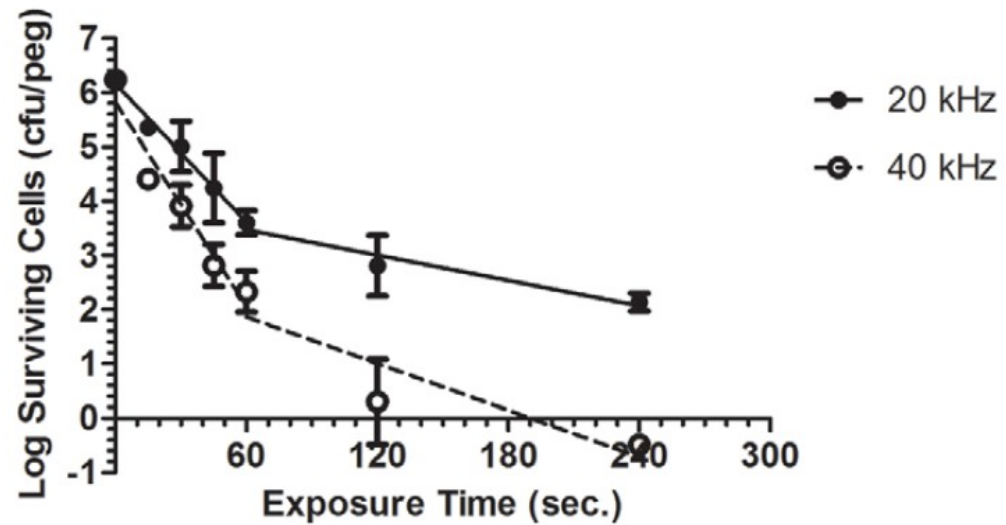
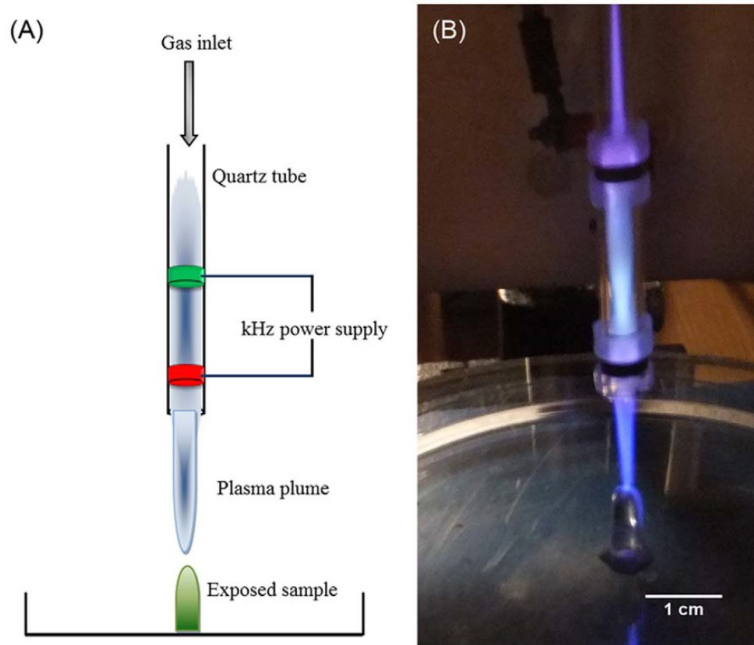


Fig. 9. Application for the DBD plasma jet: surface modification of wood (left: waterdroplet on untreated wood, right: waterdroplet after the plasma jet treatment).

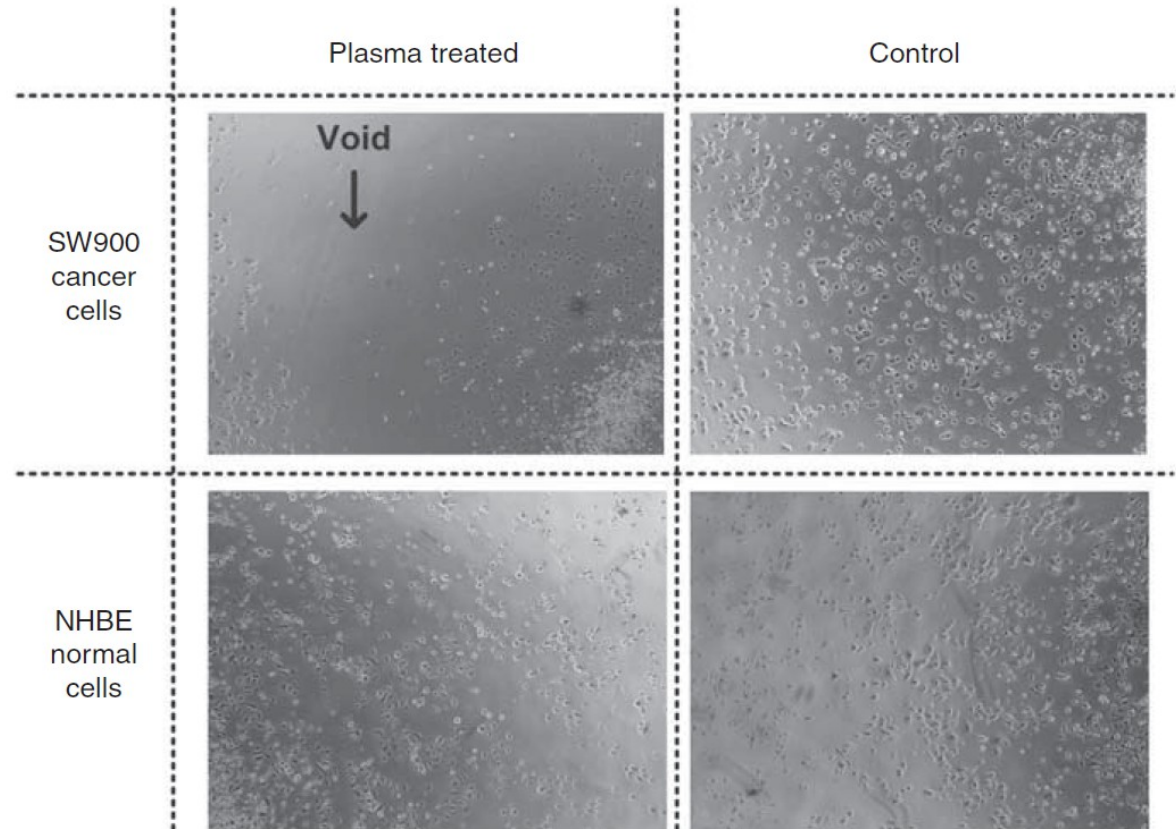
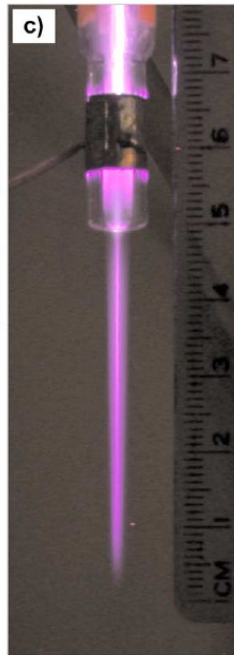
Уничтожение бактерий

Alkawareek e.a. (2012)



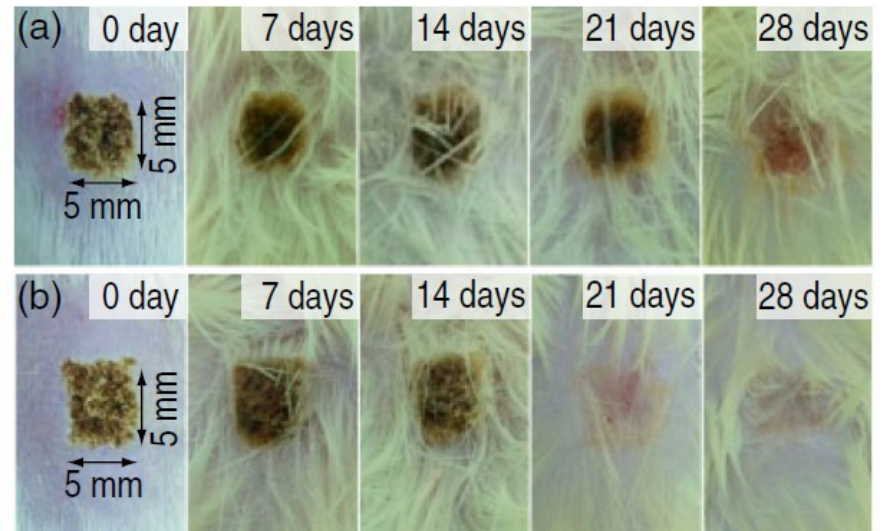
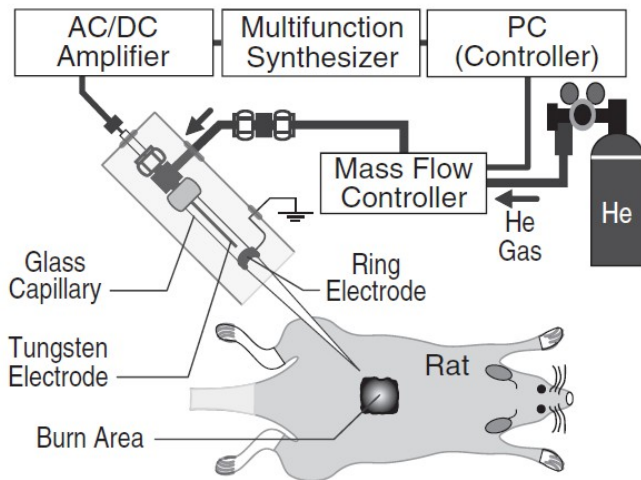
Селективное воздействие на раковые клетки

Keidar e.a. (2011)



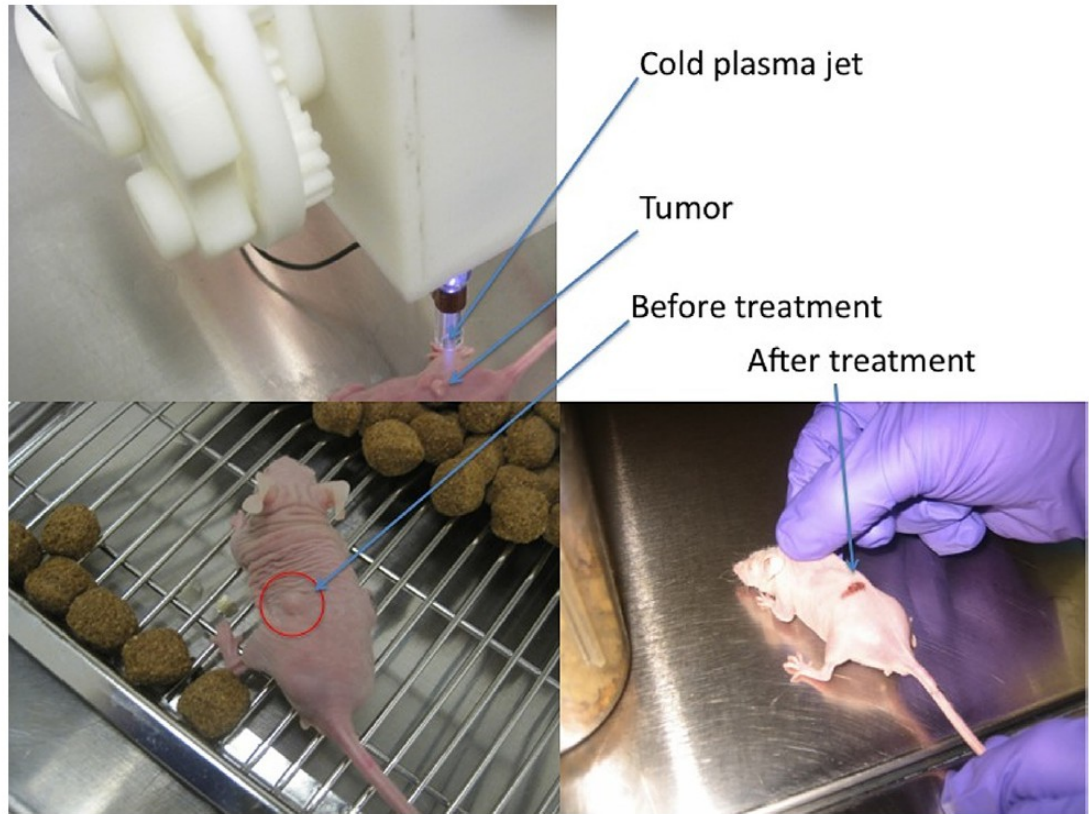
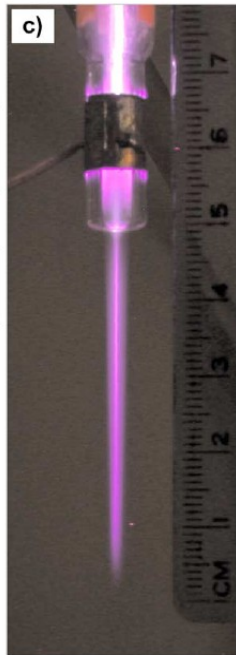
Лечение ожогов

Hirata e.a. (2014)

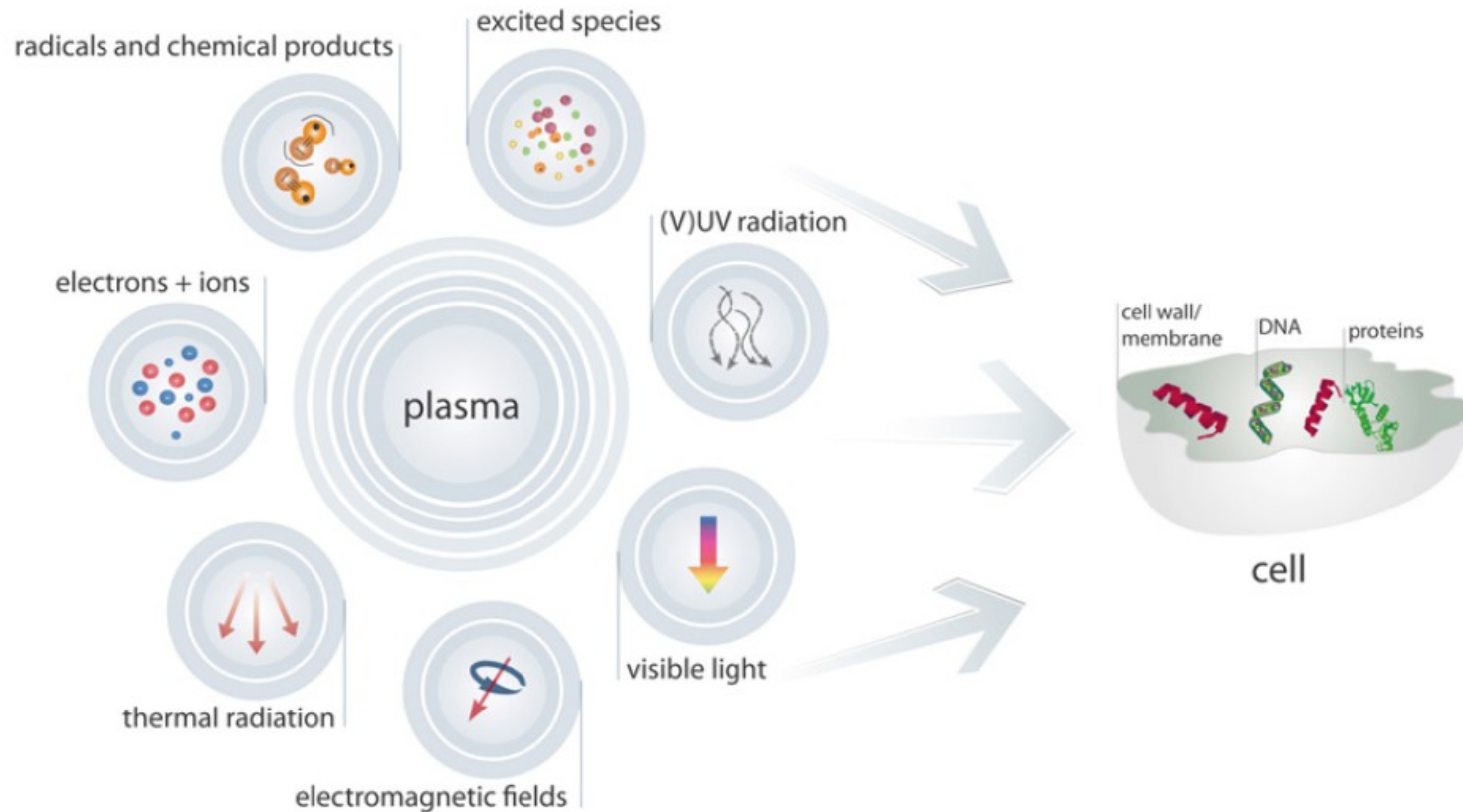


Удаление опухолей

Keidar e.a. (2013)



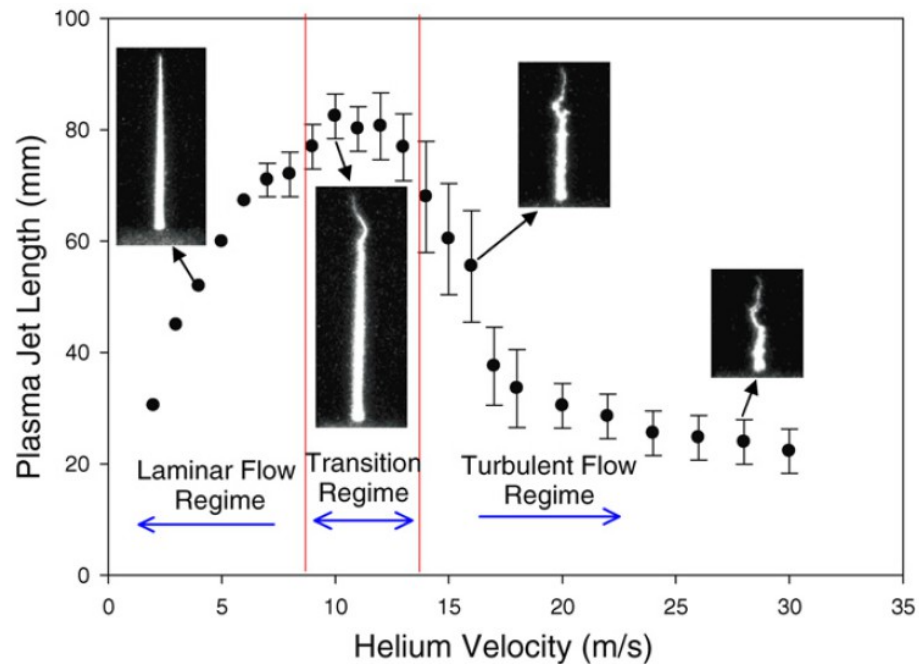
Факторы, воздействующие на биологические объекты



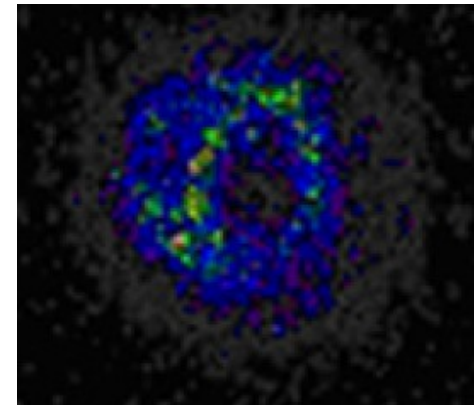
Woedke e.a. (2013)

Длина и форма плазменной струи

Karakas e.a. (2010)

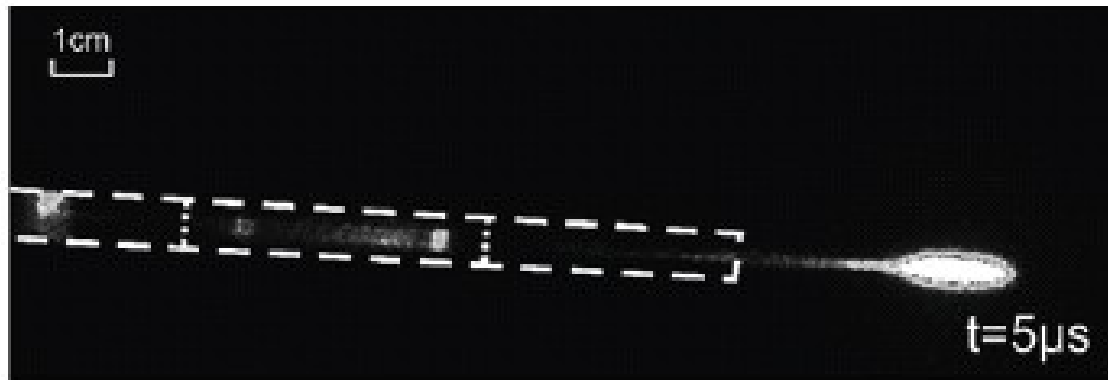


Merica-Bourdet e.a. (2009)



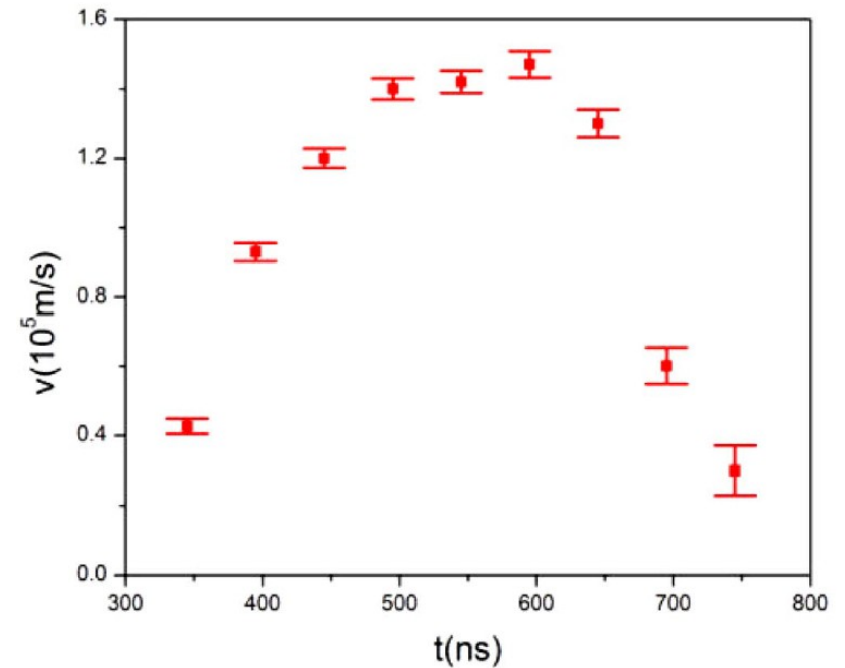
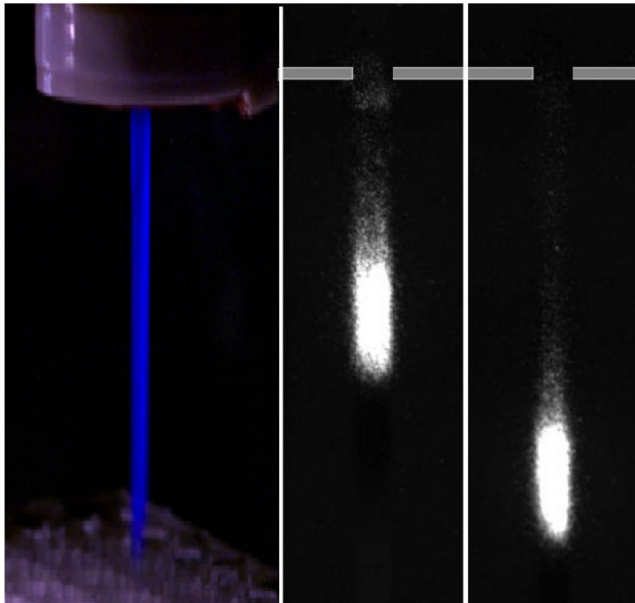
Структура плазменной струи

Teschke e.a. (2005): обнаружение “плазменных пуль”



Скорость плазменных сгустков

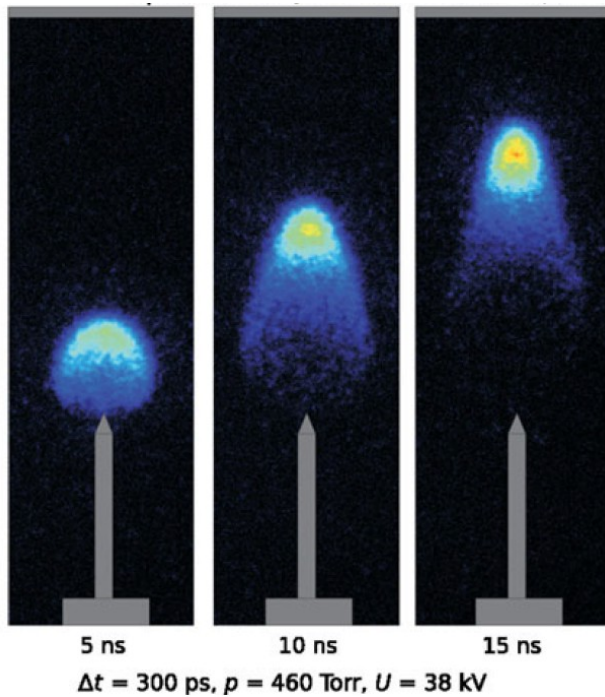
Laroussi e.a. (2008)



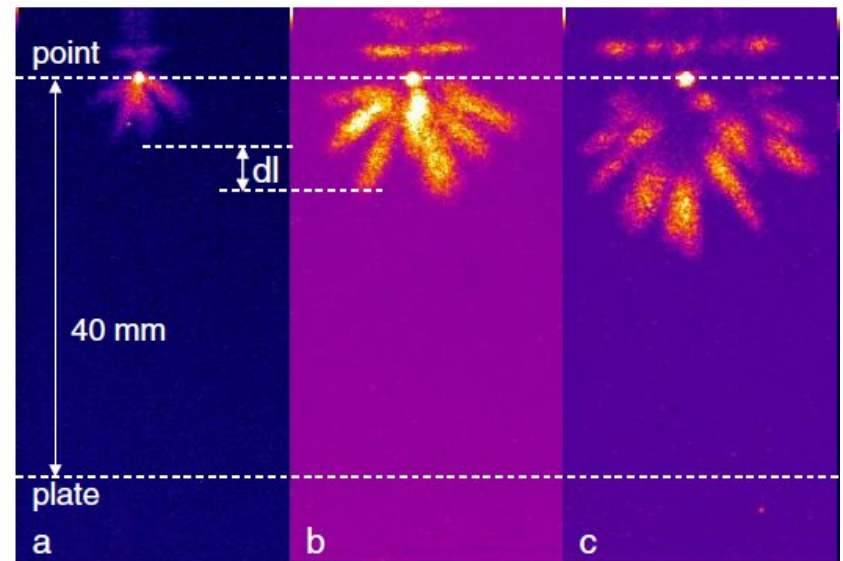
“Плазменные пули” – волны ионизации (стримеры)?

Стримеры в воздухе

Nudnova e.a. (2008)

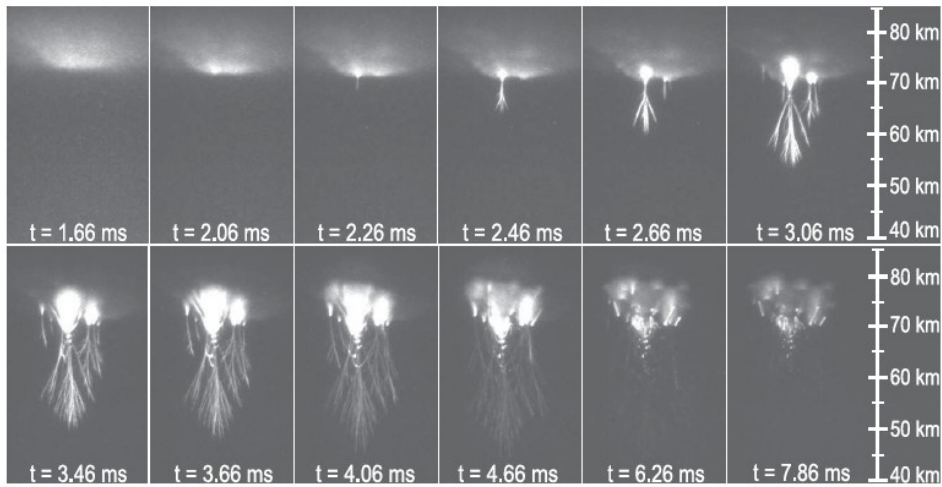


Briels e.a. (2008)

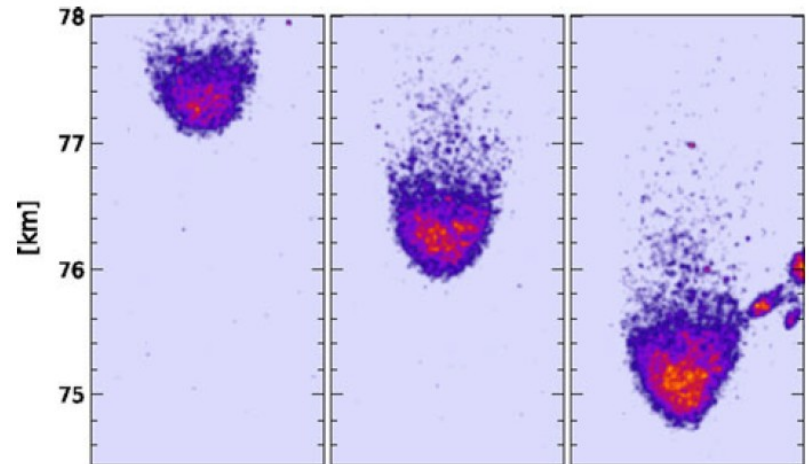


Стримеры в верхней атмосфере

Cummer e.a. (2006)



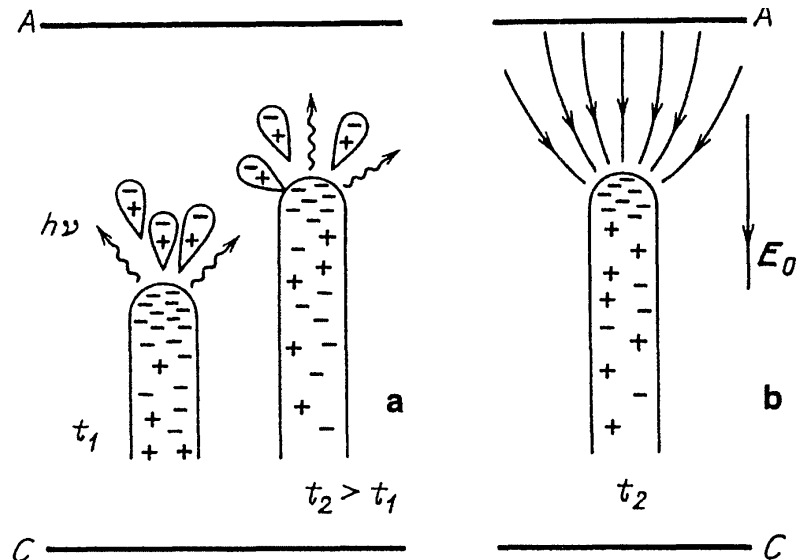
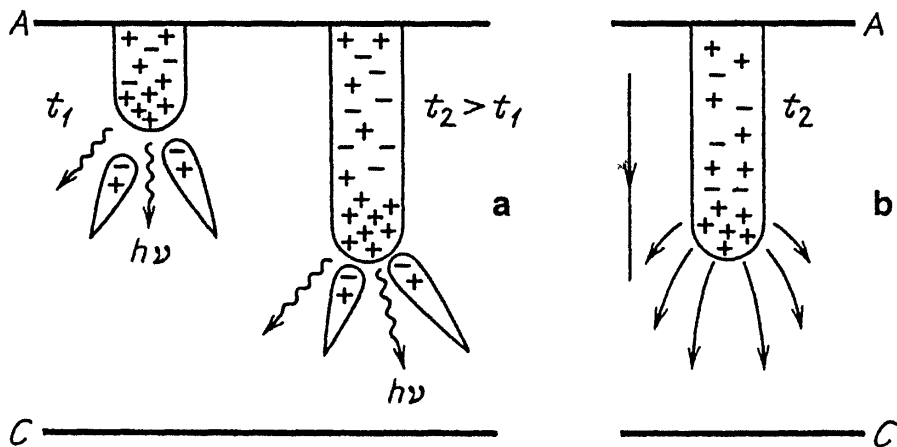
Stenbaek-Nielsen e.a.
(2013)



Волны ионизации - стримеры

Ю.П. Райзер, Физика газового разряда

положительный стример



отрицательный стример

Моделирование стримеров

Модель включает уравнения баланса для концентраций электронов n_e и ионов n_p

$$\partial n_j / \partial t + \nabla \cdot (n_j \mathbf{V}_j) = F + S, \quad \mathbf{V}_j = \mu_j \mathbf{E} - D_j \nabla \ln(n_j)$$

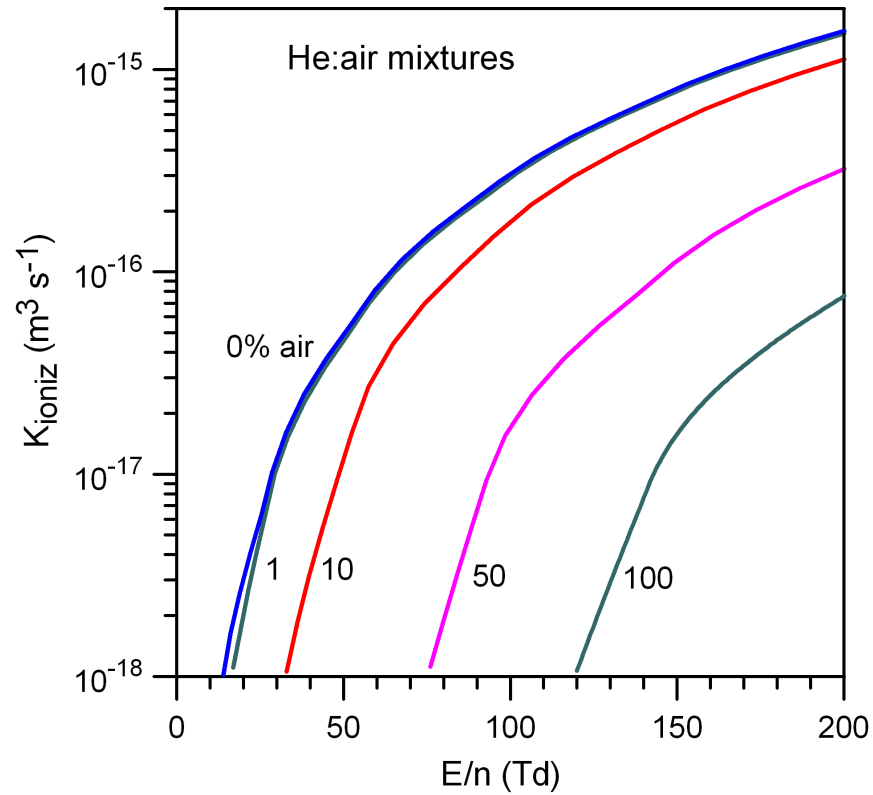
и уравнение Пуассона

$$\mathbf{E} = -\nabla \Phi, \quad \nabla^2 \Phi = -4\pi \rho, \quad \rho = e(n_p - n_e)$$

Константы кинетических процессов в источнике F определяются локальными значениями E/n и состава газа. Фотоионизационный член S имеет вид

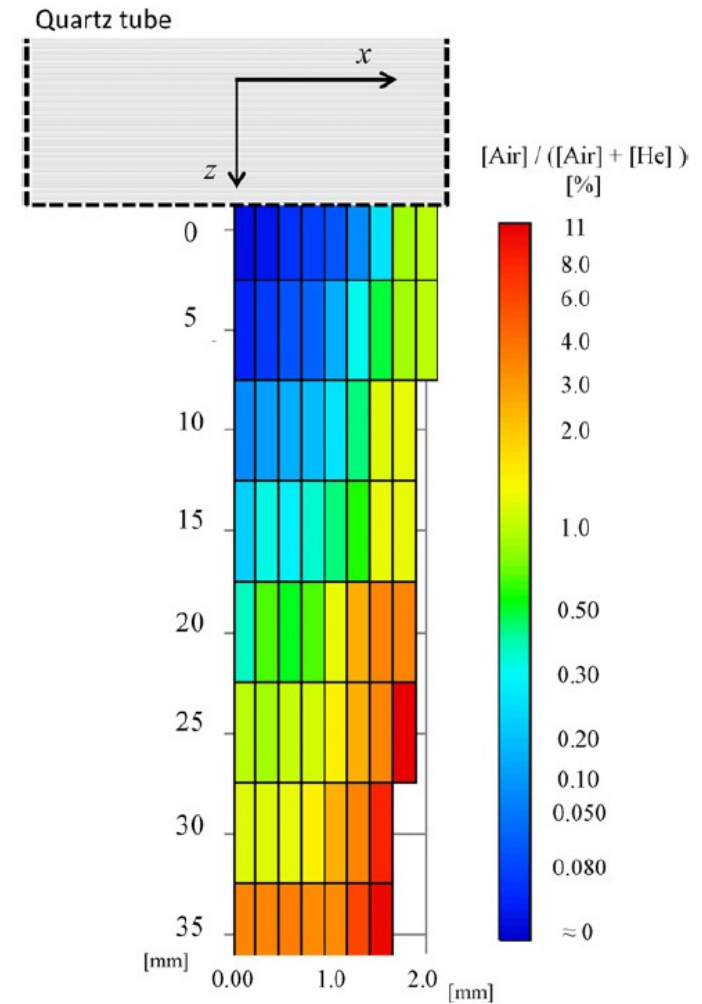
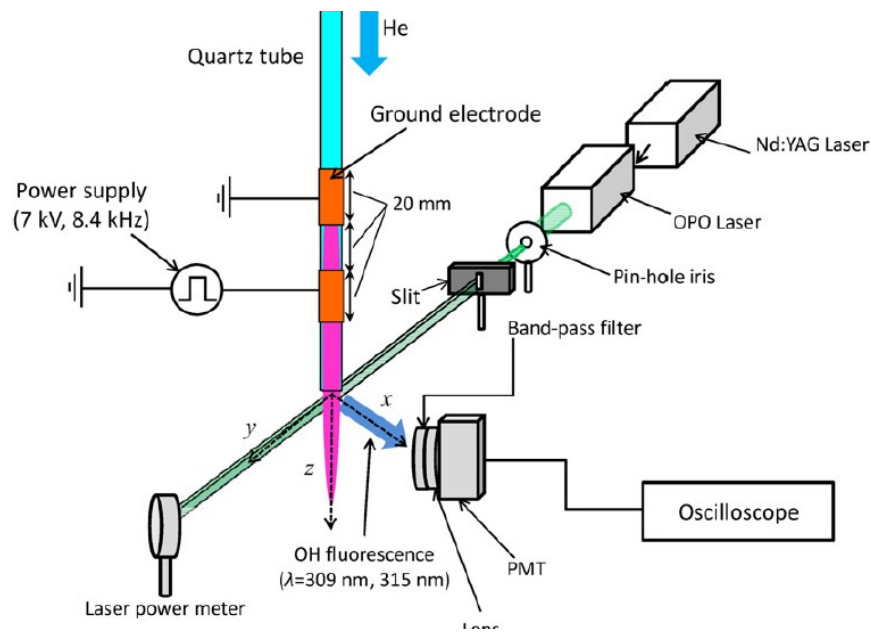
$$S(\mathbf{r}) = \int J_{\text{ph}}(\mathbf{r}') K(|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|) d\mathbf{r}'$$

Константа скорости ионизации в смесях гелия с воздухом



Состав газа в струе гелия, инжектированной в воздух

Yonemori e.a. (2012)



Расчет состава газа в струе

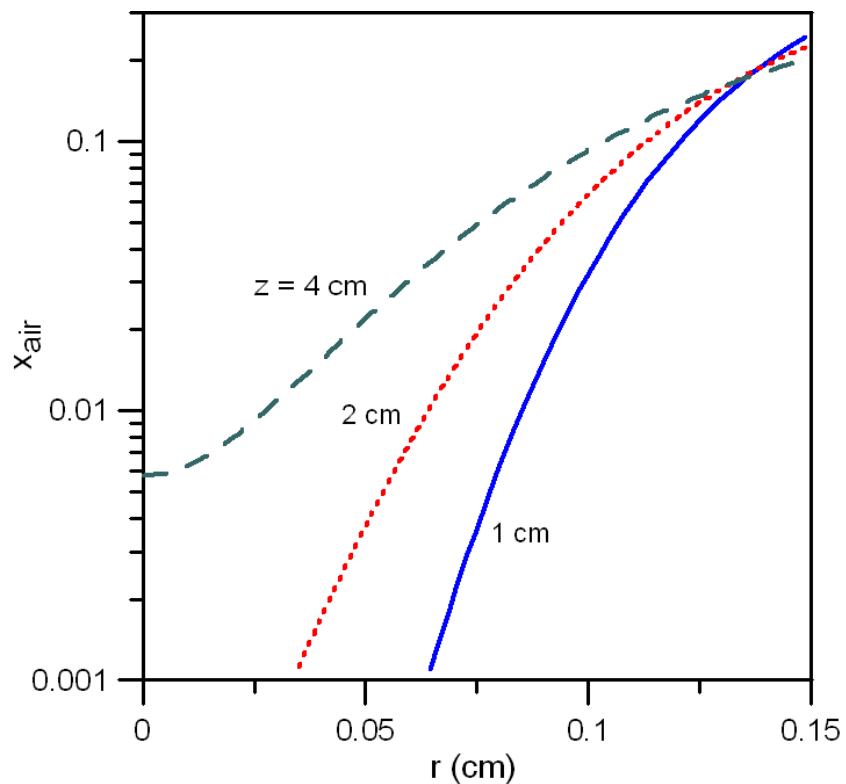
Состав газовой смеси в ламинарной струе, инжектированной в окружающий газ, при больших числах Рейнольдса определяется путем решения системы уравнений Навье-Стокса (с учетом диффузии) в приближении пограничного слоя

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho r v)}{\partial r} = 0,$$

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial z} + v \frac{\partial u}{\partial r} \right) = \frac{\mu}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u}{\partial r} \right),$$

$$\rho \left(u \frac{\partial f}{\partial z} + v \frac{\partial f}{\partial r} \right) = \frac{D}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \rho \frac{\partial f}{\partial r} \right)$$

Радиальные профили мольной доли воздуха вдоль струи

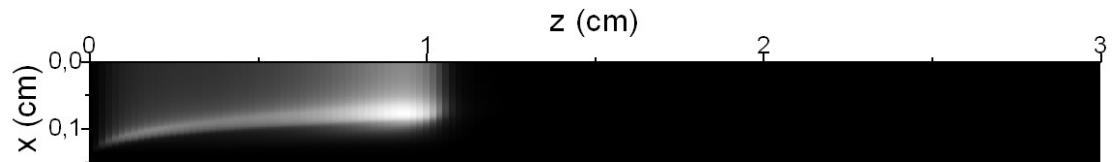


расчет (2011) для условий эксперимента Sakiyama e.a. (2010)

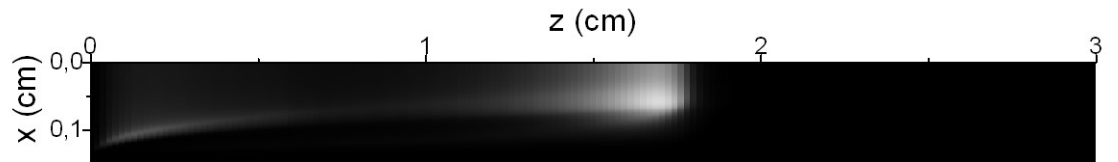
Интенсивность излучения N₂(C-V)

$$S(z, x) = 2 \int_x^\infty \frac{n_{N_2(C)}(z, r) r dr}{\tau_{\text{rad}} \sqrt{r^2 - x^2}}$$

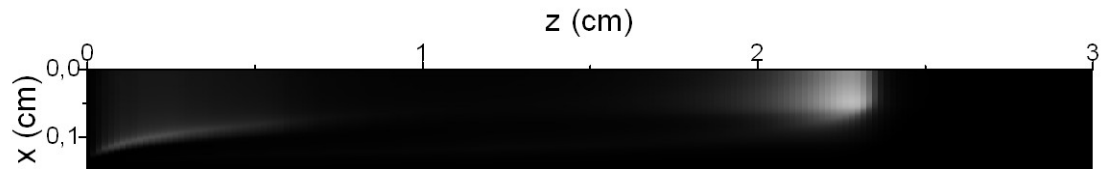
50 ns



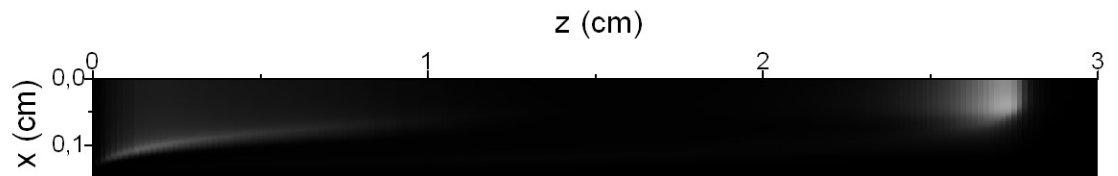
100 ns



150 ns

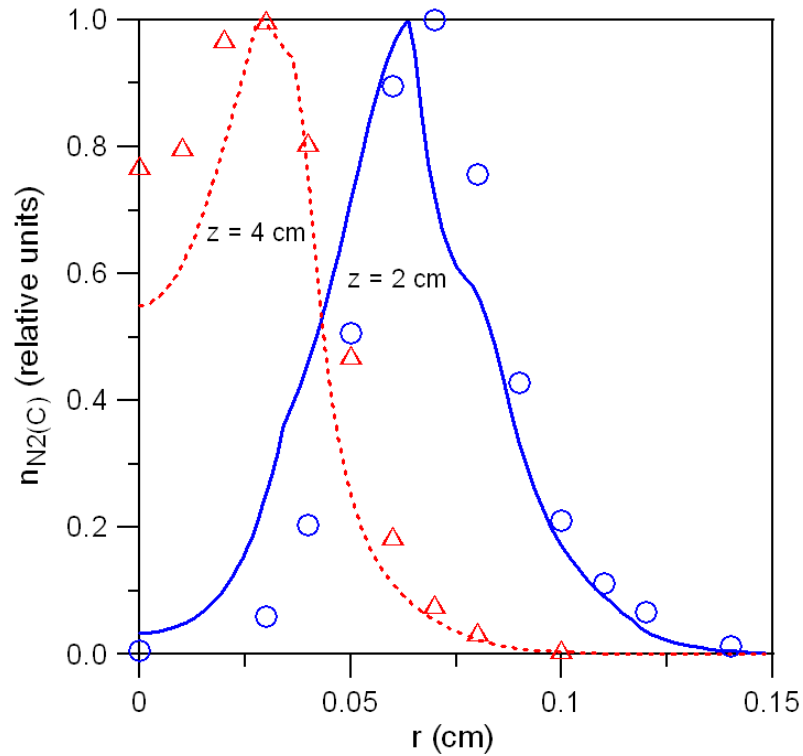


200 ns



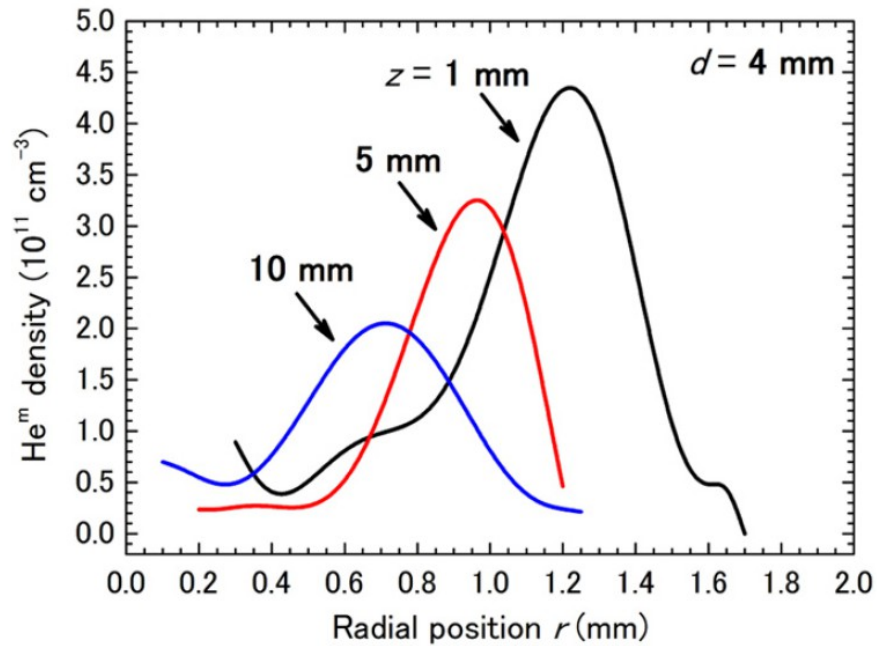
расчет (2011) для условий эксперимента Sakiyama e.a. (2010)

Радиальные профили концентрации $N_2(C)$

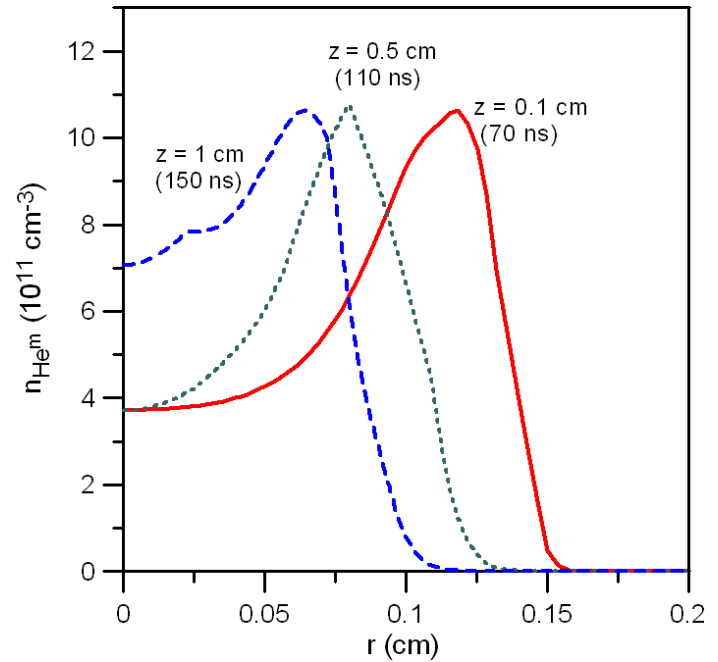


символы – эксперимент Sakiyama e.a. (2010), линии – расчет (2011)

Радиальные профили концентрации He^m

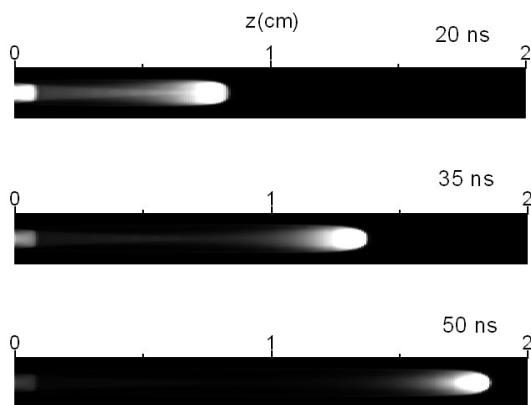


эксперимент Urabe e.a. (2010)



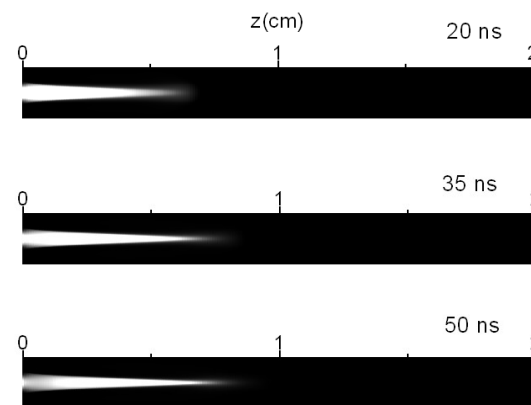
расчет (2011)

Интенсивность излучения N₂(C-V) – эффект полярности



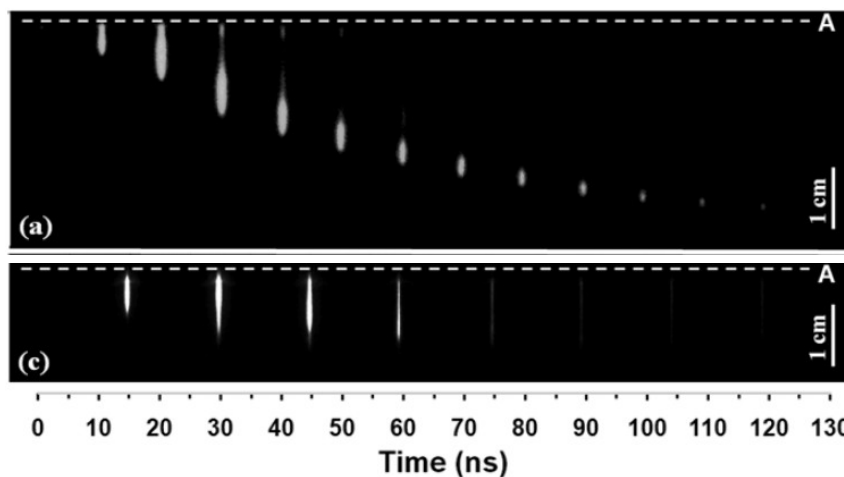
Положительная полярность

расчет (2011)



Отрицательная полярность

Положительная полярность



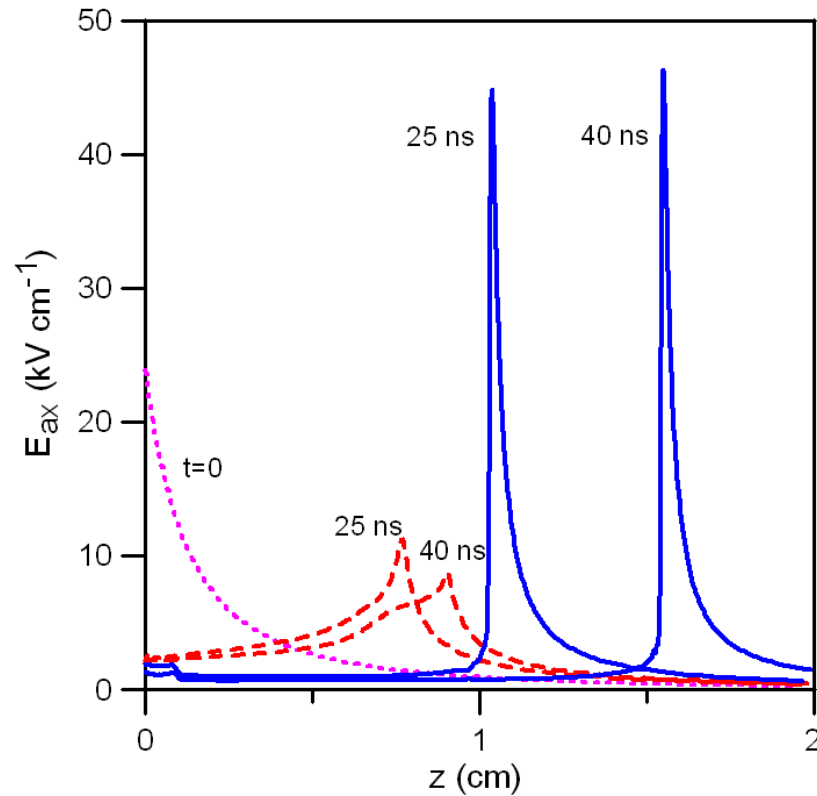
эксперимент
Jiang e.a. (2009)

Отрицательная полярность

Профили электрического поля – эффект полярности

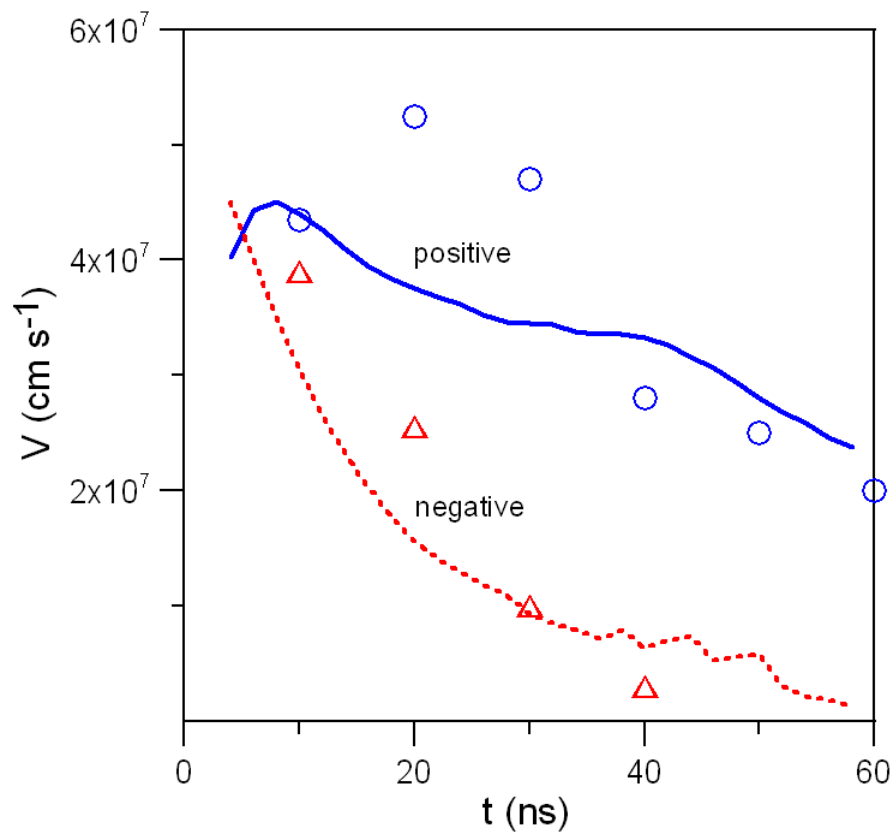
синие линии –
положительные
стримеры

красные линии –
отрицательные
стримеры



расчет (2011) для условий эксперимента Jiang e.a. (2009)

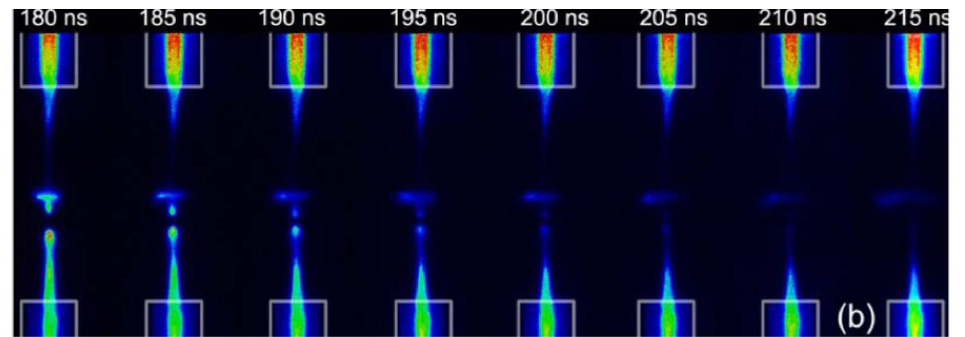
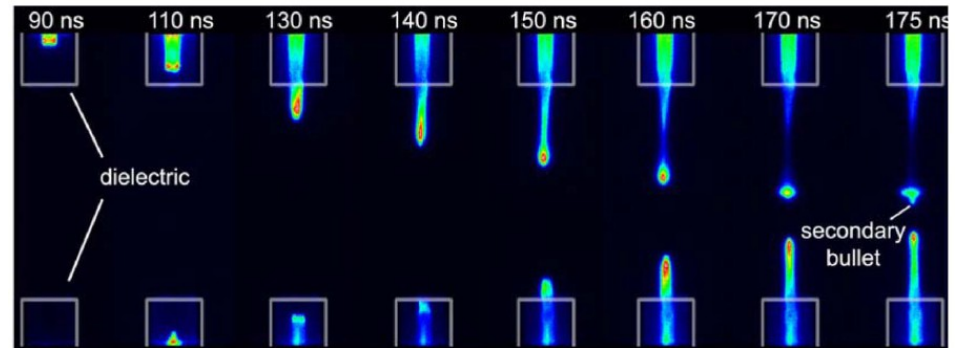
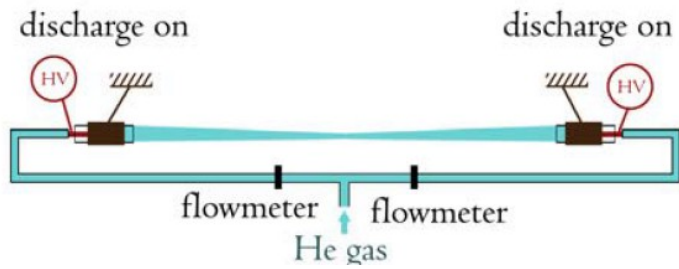
Скорость стримера – эффект полярности



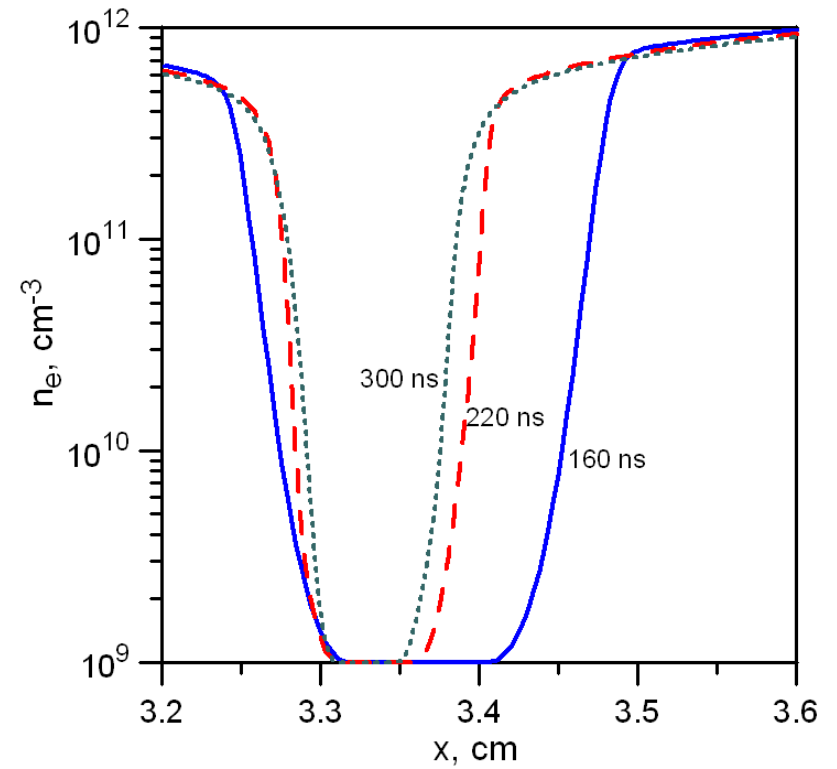
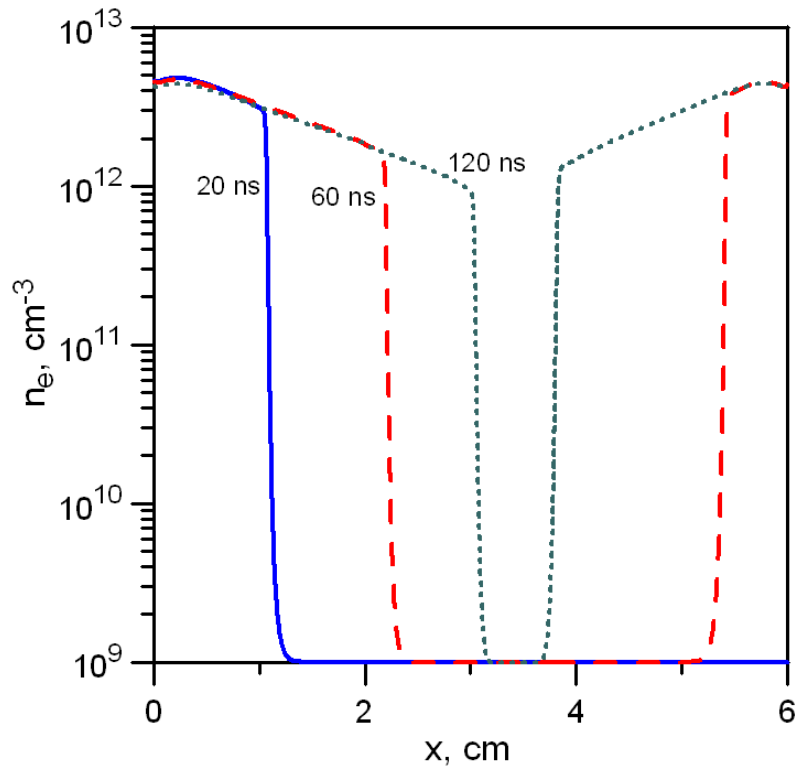
символы – эксперимент Jiang e.a. (2009), линии – расчет (2011)

Взаимодействие сталкивающихся плазменных струй

Douat e.a. (2011)

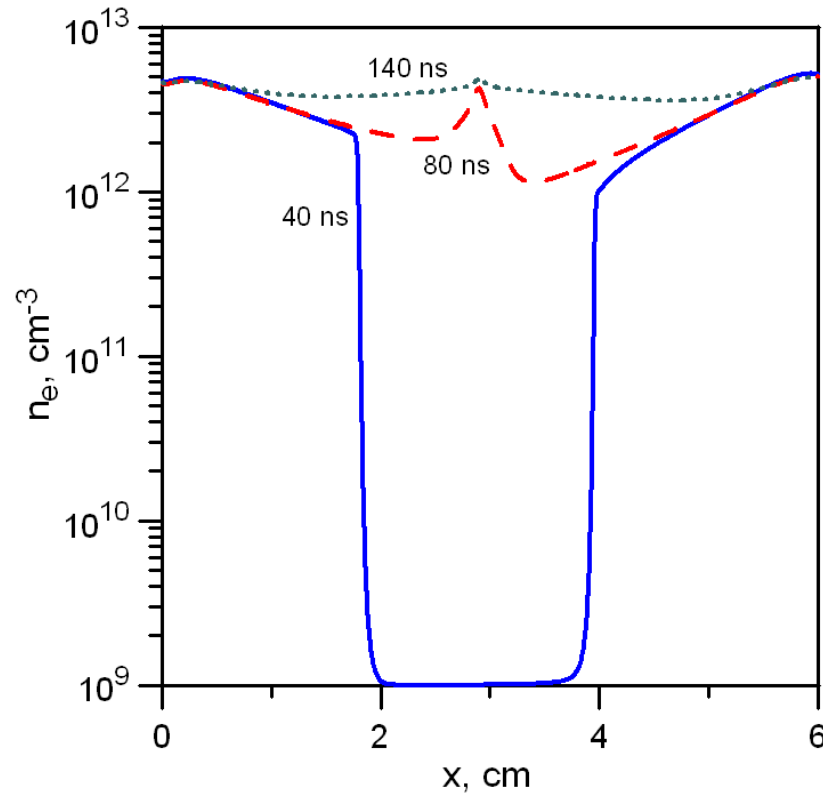


Взаимодействие сталкивающихся плазменных струй



расчет (2012) столкновения двух положительных стримеров

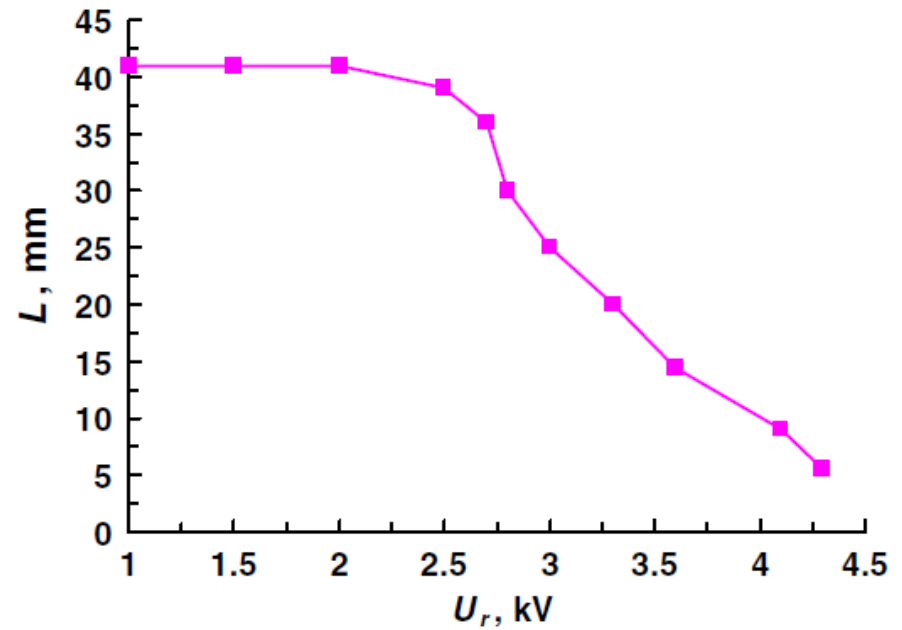
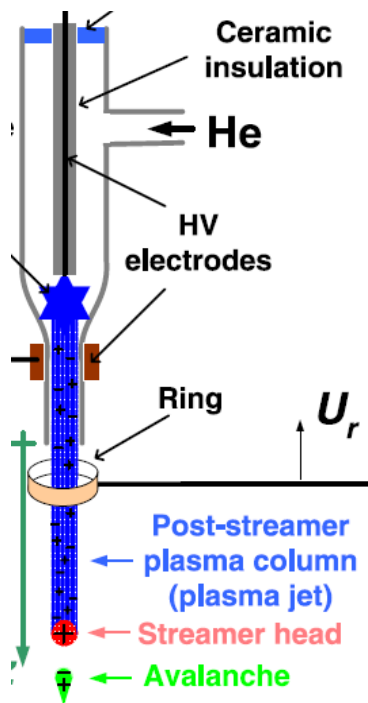
Взаимодействие сталкивающихся плазменных струй



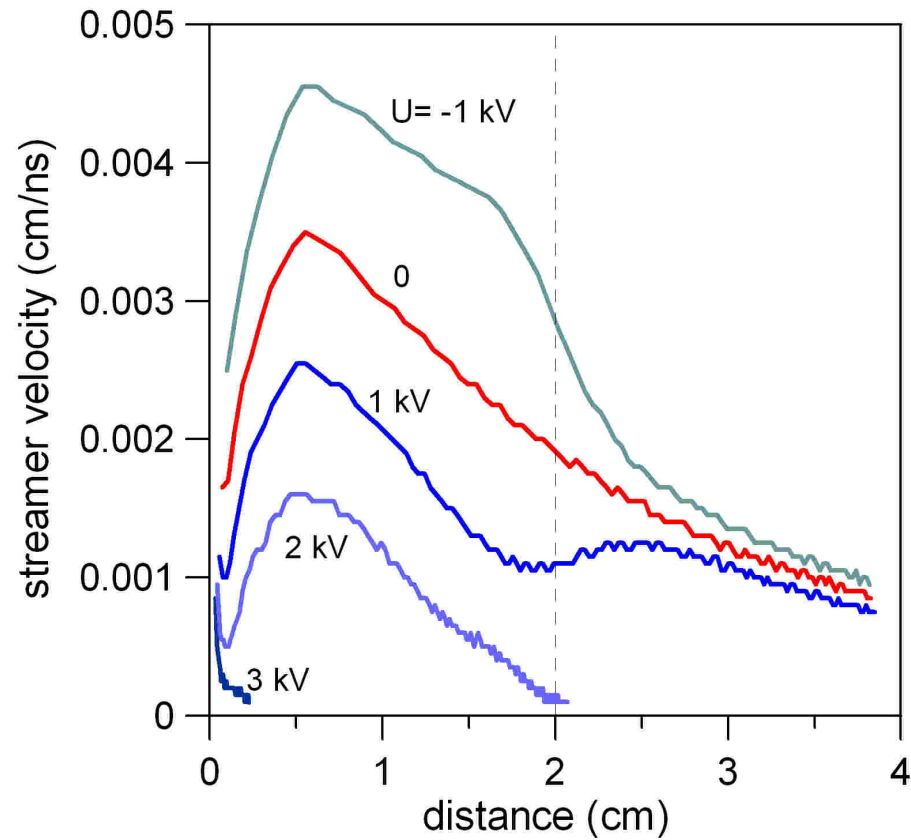
расчет (2012) столкновения положительного и отрицательного стримеров

Влияние внешнего поля

Shashurin e.a. (2012)



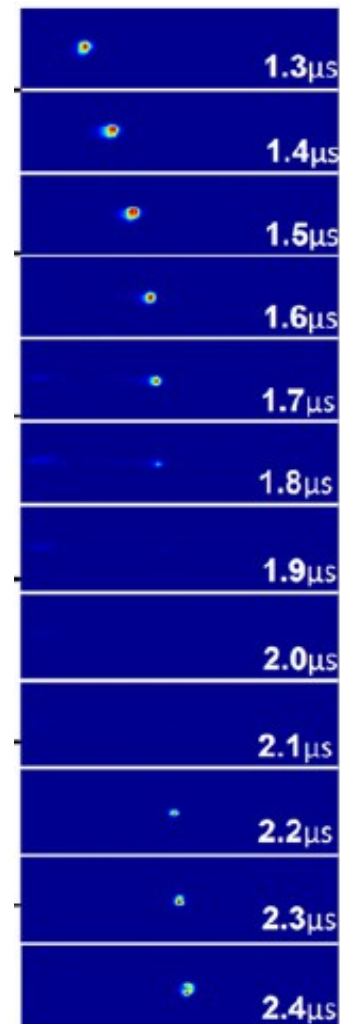
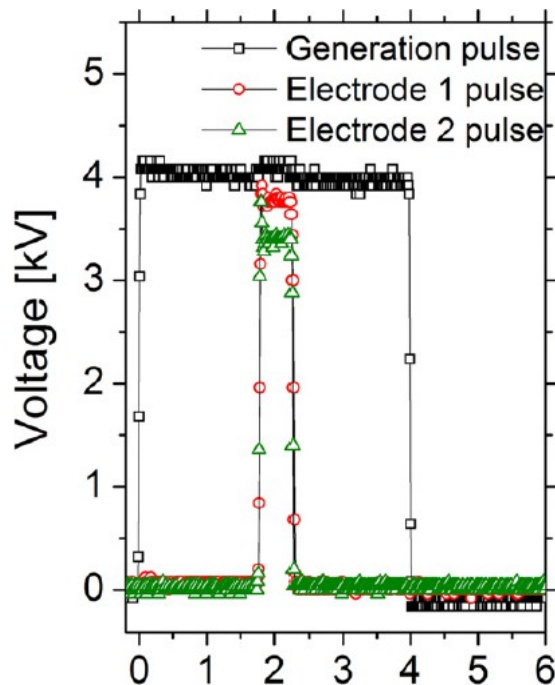
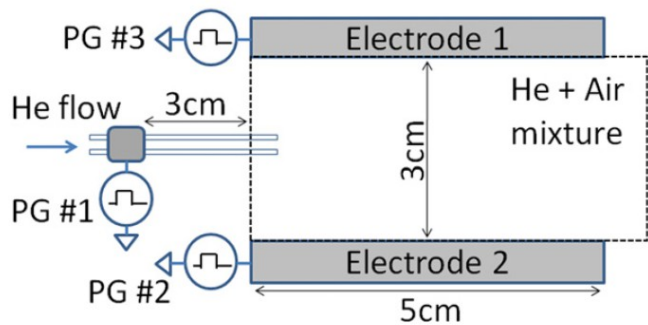
Влияние внешнего поля



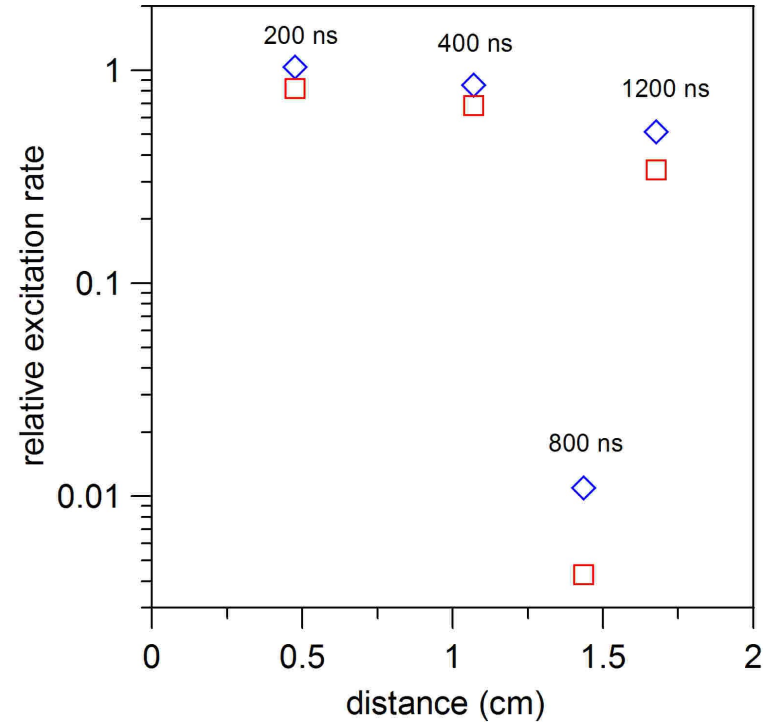
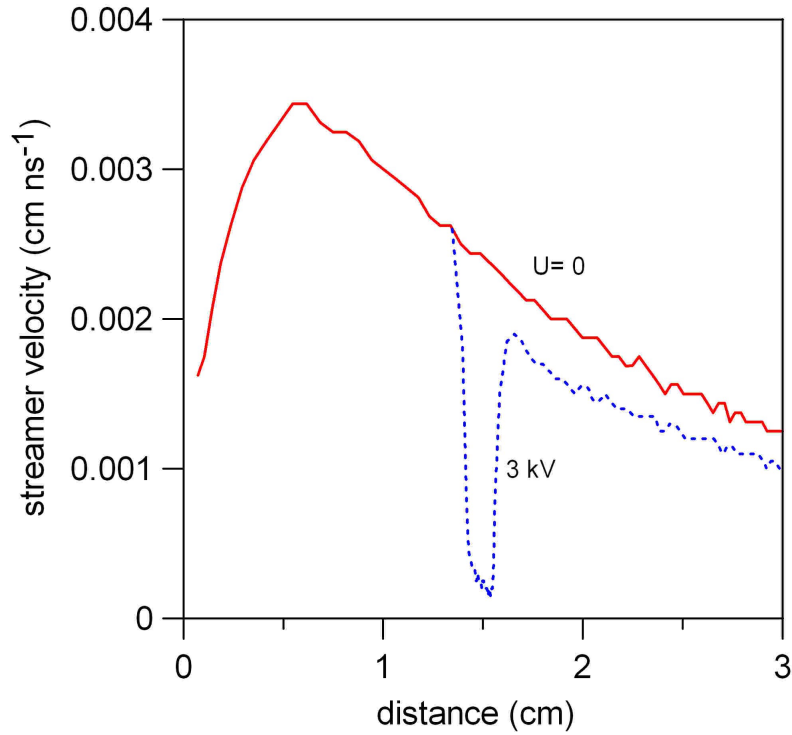
расчет (2013)

Влияние внешнего поля

Walsh e.a. (2012)

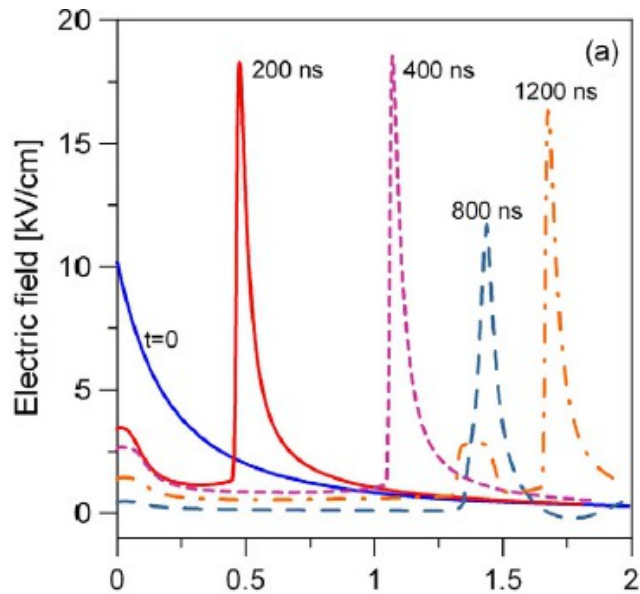


Влияние внешнего поля

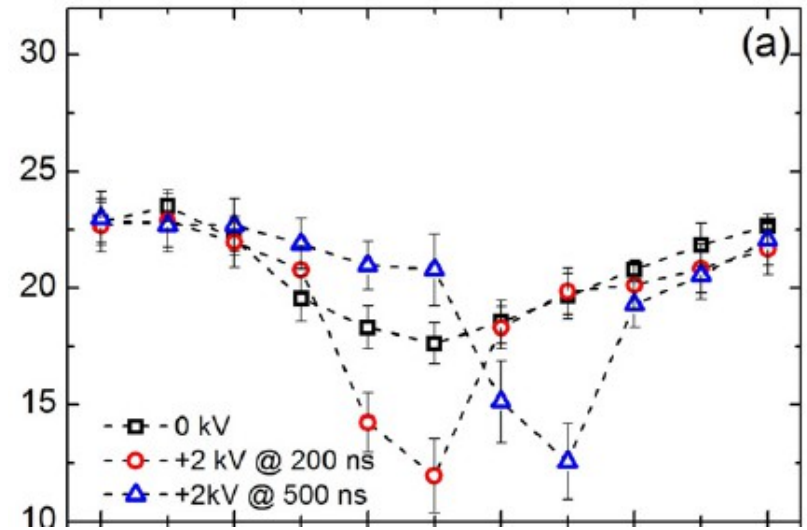


расчет (2013)

Влияние внешнего поля

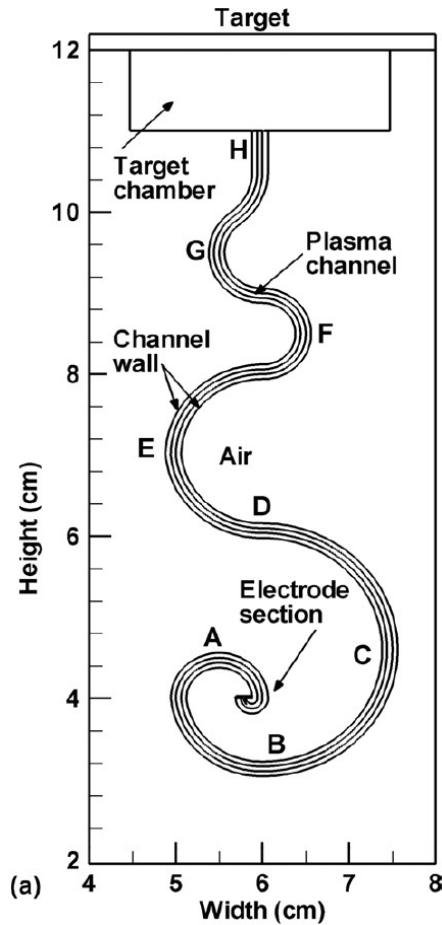


расчет (2013)

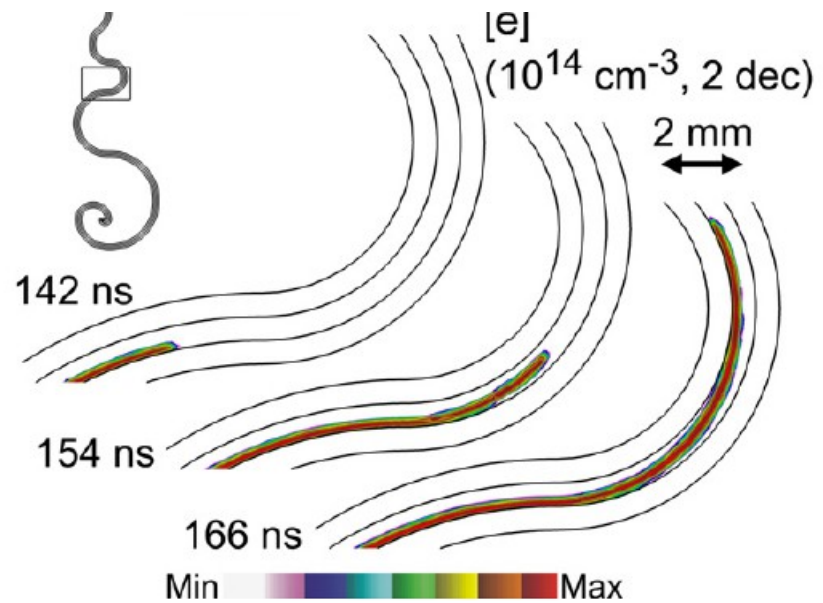


эксперимент Olszewski e.a. (2014)

Волны ионизации в искривленных каналах

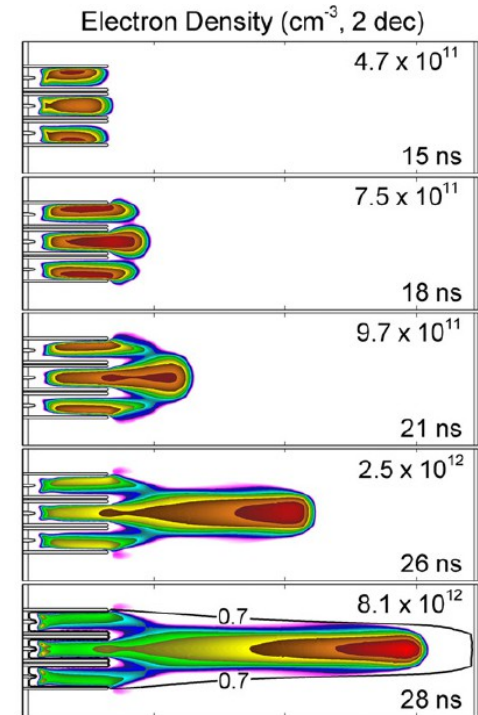
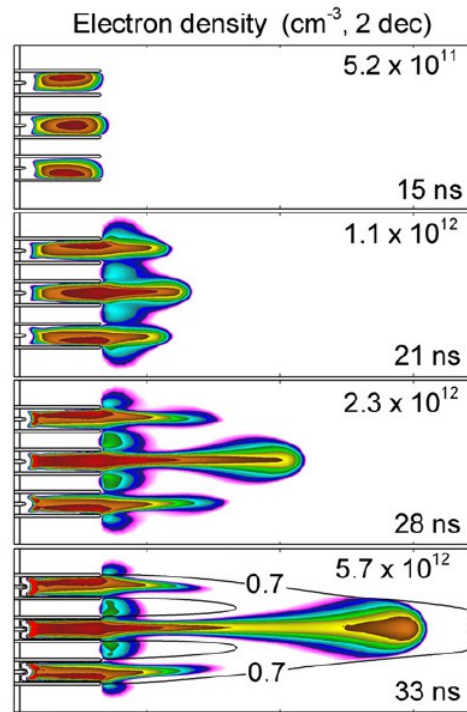
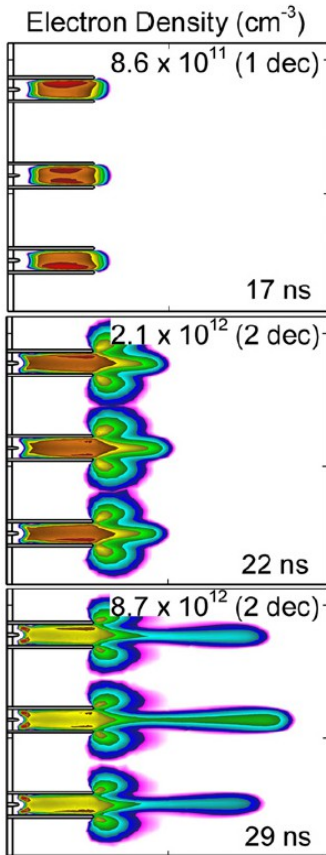


расчет, Xiong and Kushner (2012)



Взаимодействие параллельных плазменных струй

расчет, Babaeva and Kushner (2014)





Contents lists available at ScienceDirect

Physics Reports

journal homepage: www.elsevier.com/locate/physrep

Guided ionization waves: Theory and experiments

X. Lu^{a,*}, G.V. Naidis^b, M. Laroussi^c, K. Ostrikov^{d,e}

^a State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430030, PR China

^b Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences, Moscow 125412, Russia

^c Laser and Plasma Engineering Institute, Old Dominion University, Norfolk, VA 23529, USA

^d CSIRO Materials Science and Engineering, P.O. Box 218, Lindfield, NSW 2070, Australia

^e School of Physics, The University of Sydney, Sydney, NSW 2006, Australia

Наработка химически активных частиц

$$t_{\text{streamer}} = L_{\text{jet}}/V_{\text{streamer}} = 10^{-7}-10^{-6} \text{ s}, \quad t_{\text{repetition}} = 1/f = 10^{-5}-10^{-3} \text{ s},$$

$$t_{\text{flow}} = L_{\text{jet}}/V_{\text{flow}} = 10^{-3}-10^{-2} \text{ s}$$

Короткоживущие компоненты (с $t_{\text{life}} < t_{\text{repetition}}$):

He*, N₂*, N*, O*, заряженные частицы

Долгоживущие компоненты (с $t_{\text{life}} > t_{\text{repetition}}$):

H, N, O, OH, NO, NO₂, HO₂, O₃, ...

$t_{\text{repetition}} \ll t_{\text{flow}}$ - происходит накопление долгоживущих частиц

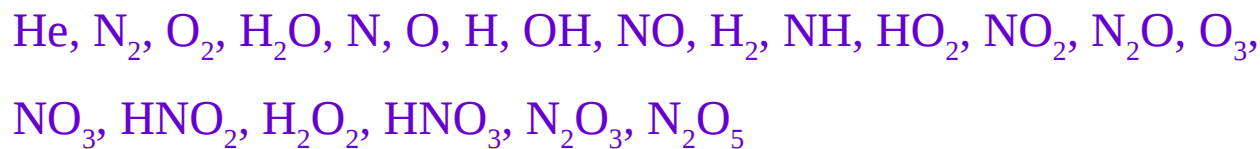
Кинетика в смесях гелия с влажным воздухом

Первичные активные частицы, нарабатываемые электронным ударом при распространении стримеров

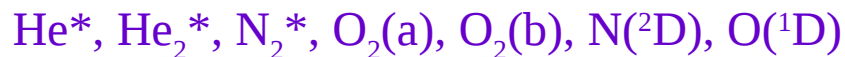


Кинетическая модель включает реакции с участием

- нейтральных частиц в основном состоянии



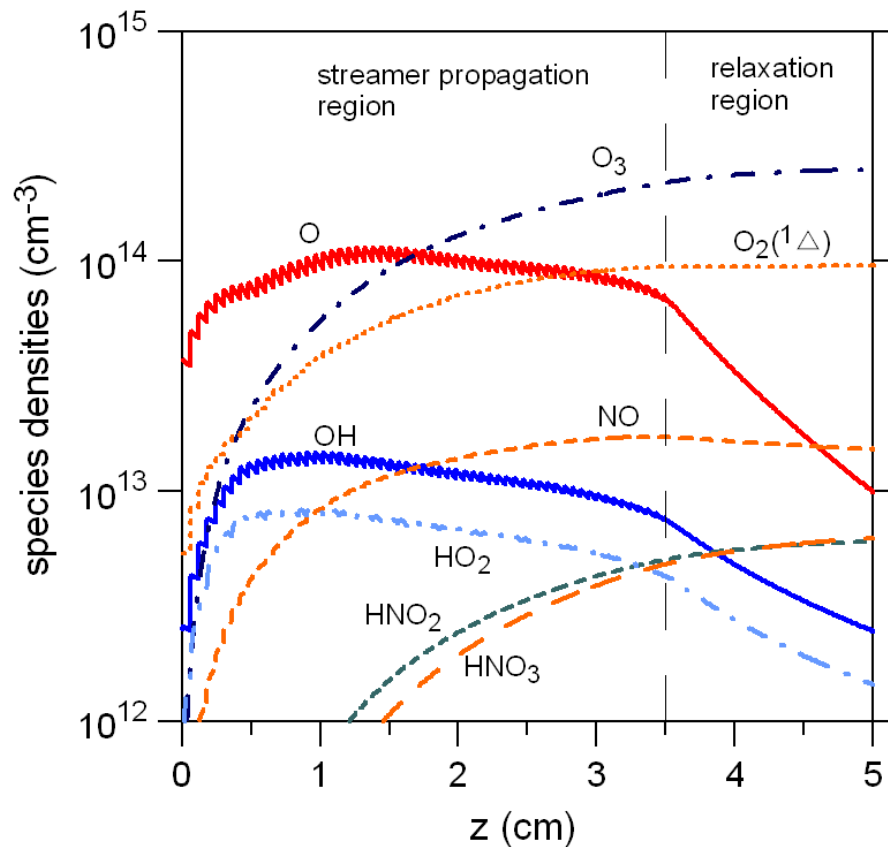
- нейтральных частиц в возбужденных состояниях



- ионов

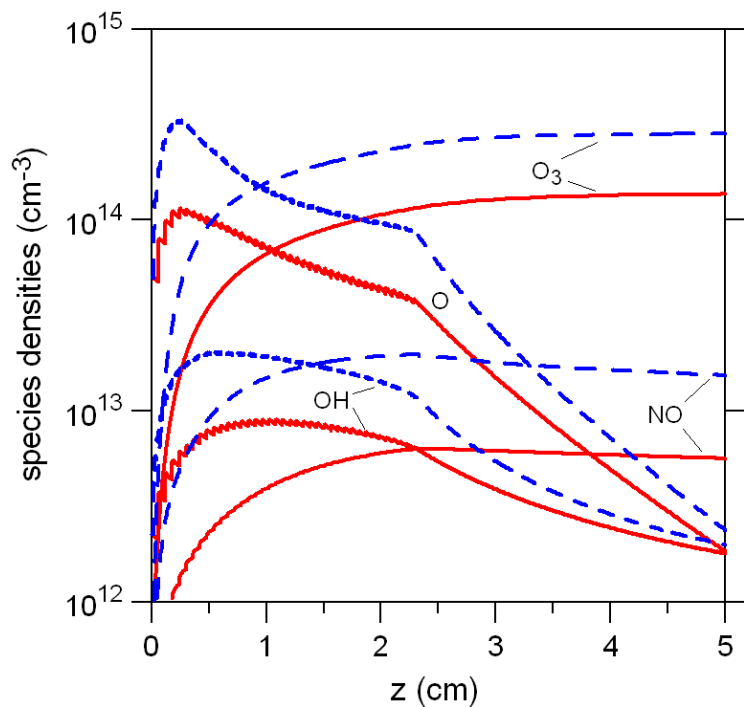


Концентрации активных частиц вдоль струи



расчет (2014) для He/1% влажного воздуха

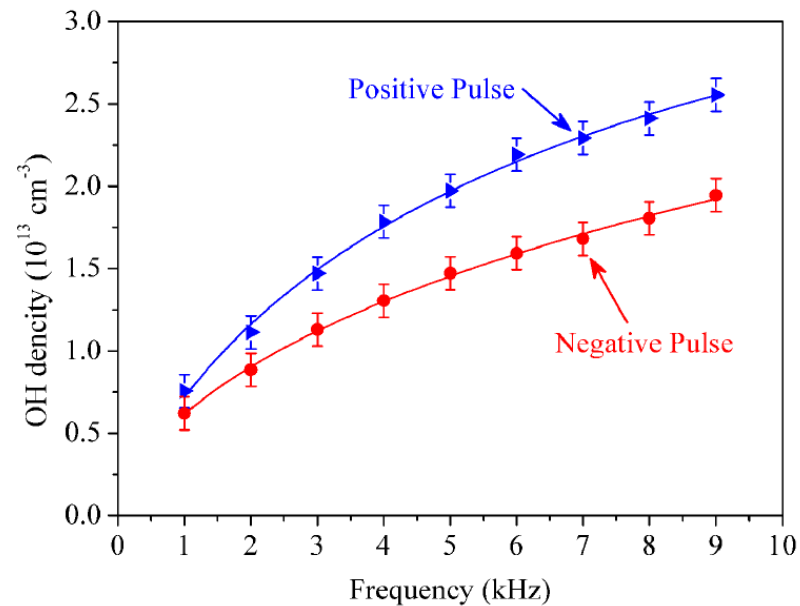
Концентрации активных частиц вдоль струи



расчет (2014)

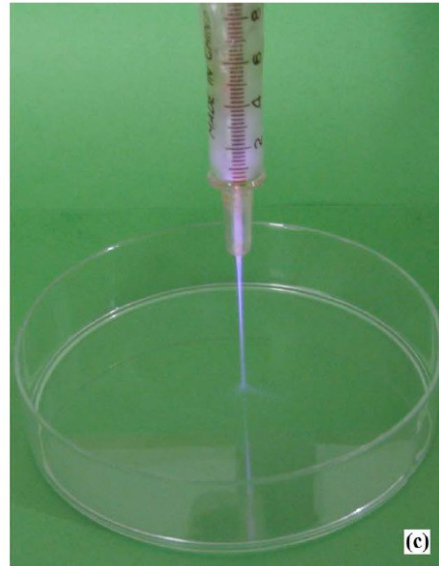
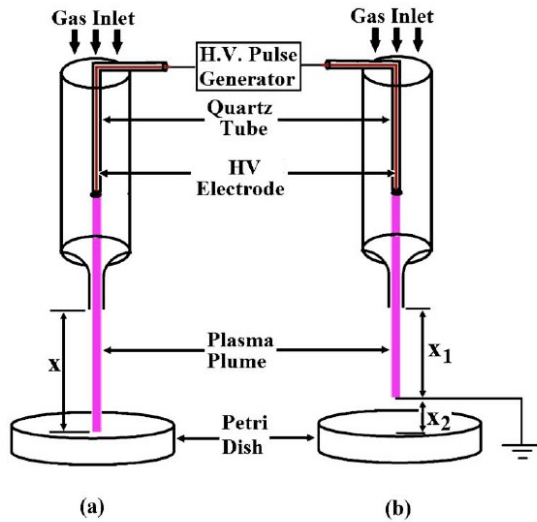
синие линии – 40 кГц

красные линии – 10 кГц

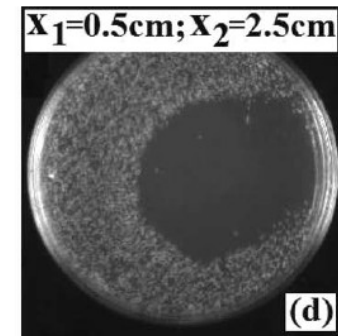
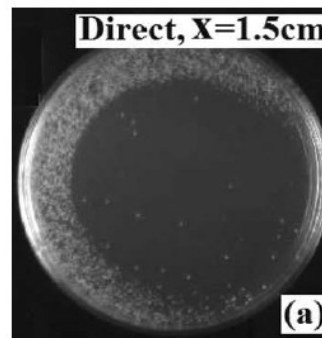


эксперимент Pei e.a. (2014)

Уничтожение бактерий



Lu e.a. (2008)



Направления дальнейших исследований

- Динамика, структура и параметры плазмы в струе в зависимости от внешних условий
 - Нарботка химически активных частиц при разных составах плазмообразующего газа
 - Физические и химические аспекты взаимодействия плазменных струй с поверхностями
 - Анализ новых экспериментальных данных
-