

Оптический пробой сред

Симанкович А.Л. Дедков Д.А.

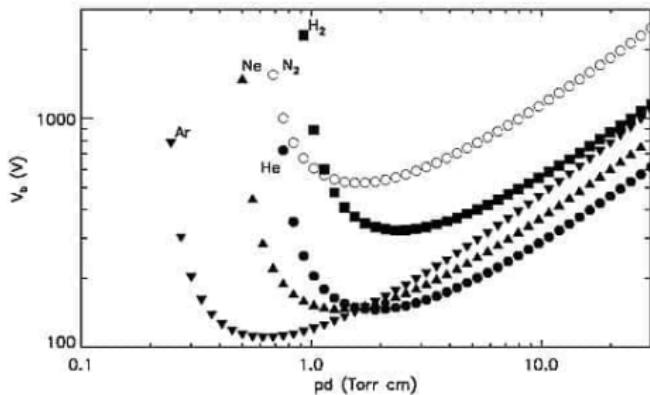
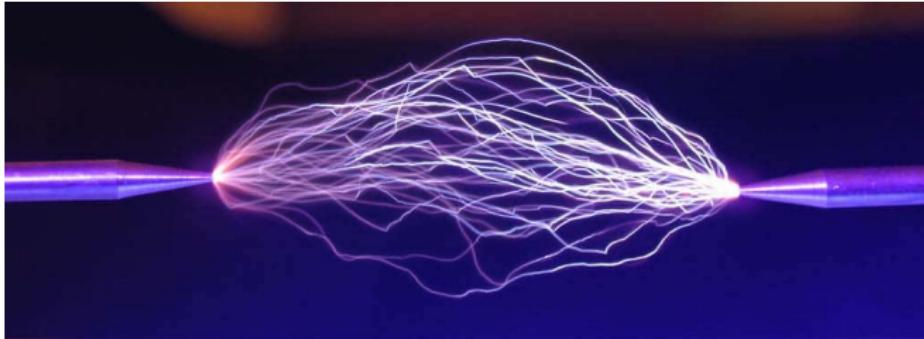
Московский Физико-Технический Институт

Аннотация

В работе рассмотрен эффект оптического пробоя воздуха фокусированным лазерным излучением. Приведено теоретическое описание образования пробоя в газах. Измерены спектры и осцилограммы пробойной искры для различных веществ.

Введение

Статический пробой

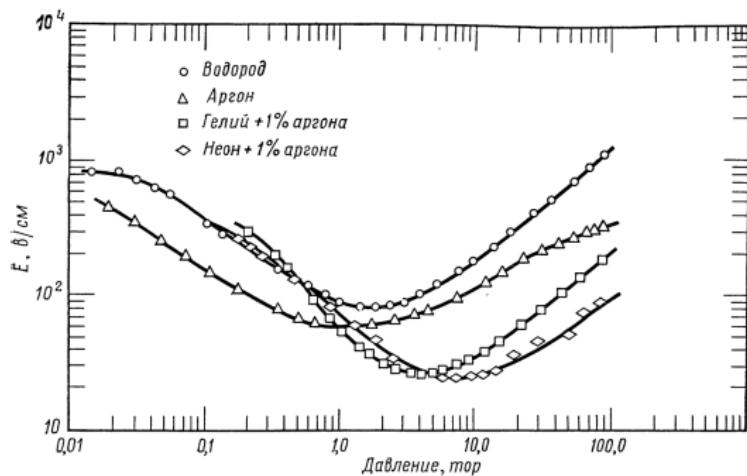


Пробой постоянным напряжением описывается кривыми Пашена.

Пробой в переменных полях



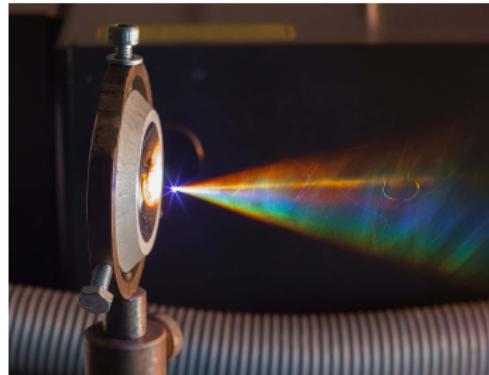
Ртутная
лампа



Зависимость пробойного поля от давления
($f = 992$ МГц, диффузионная длина 0.631 см)

Переменное поле также индуцирует пробой.

Оптический пробой



Принципиальная схема

Пробой воздуха
фемтосекундным лазером

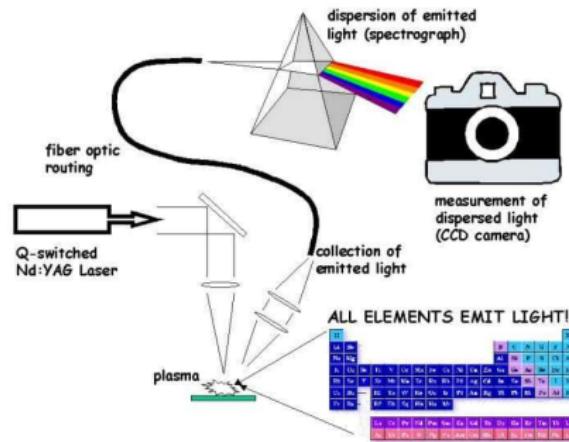
- Оптический пробой – $E \approx 10^6 \div 10^7$ В/см
- Постоянное и СВЧ поля – $E \approx 3 \cdot 10^4$ В/см.

Характерные параметры:

$$P \approx 30 \text{ МВт}, \quad d = 2 \cdot 10^{-2} \text{ см}$$

$$I \approx 10^5 \text{ МВт/см}^2, \quad E \approx 6 \cdot 10^6 \text{ В/см}$$

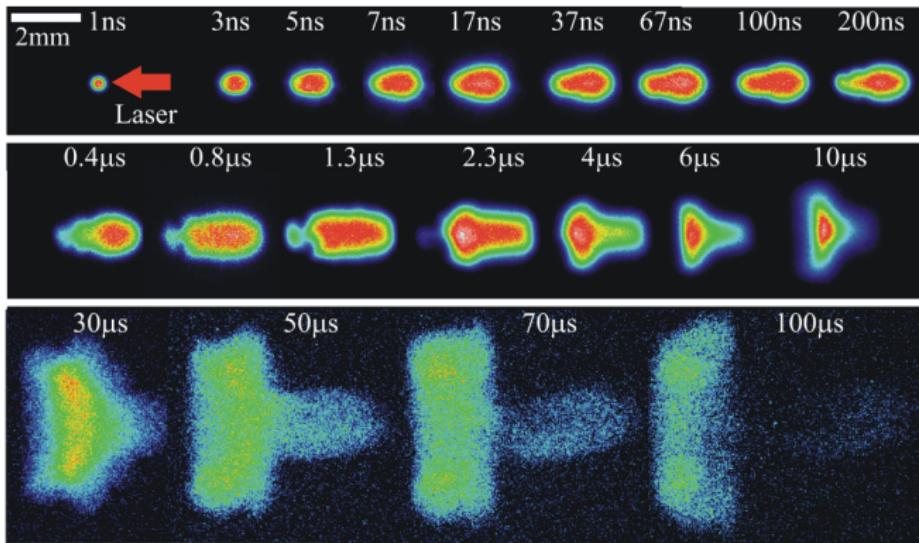
Применения лазерного пробоя



Лазерно-искровая эмиссионная спектрометрия

- Лазерно-искровая эмиссионная спектрометрия.
- Связан с термоядерным синтезом
- Развитие квантовой теории

Стадии искры



Эволюция искры во времени

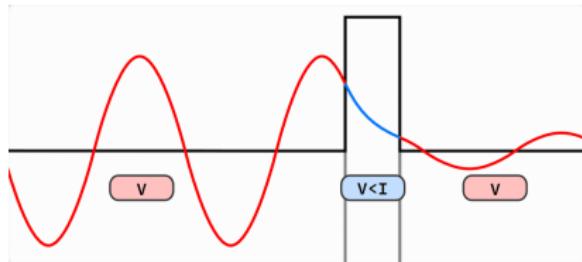
Три стадии лазерной искры:

- Пробой: ионизация и появление начальной плазмы.
- Взаимодействие плазмы с лазерным импульсом, движение плазменного фронта.
- Распространение ударной волны, свечение.

Теория

Начало пробоя – ионизация излучением

Два механизма вырывания электрона из атома излучением:

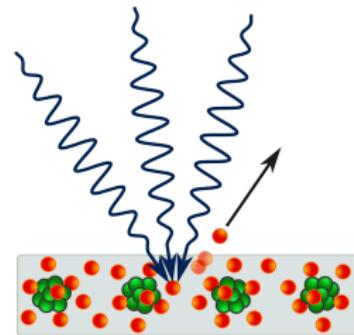


Туннельный эффект

- E – поле световой волны.
- I – энергия ионизации.
- $\Delta \sim \frac{I}{eE}$ – ширина потенциального барьера.
- $v \sim \sqrt{I/m}$ – скорость электрона.
- $\tau \sim \Delta/v \sim \frac{\sqrt{Im}}{eE}$ – время пролета барьера.

$\omega\tau \ll 1$ – условие статичности поля.

Оценка для пробоя на оптических частотах дает $\omega\tau \gg 1$.



Многоквантовый фотоэффект

$\omega\tau \gg 1$ – условие получения достаточного числа квантов за колебание.

Вероятность многоквантового фотоэффекта

- w – вероятность многоквантового фотоэффекта
- n – количество поглощаемых фотонов
- S – интенсивность

$w \sim S \sim E^2$ – вероятность пропорциональна интенсивности.

$w \sim \frac{1}{I}$ – чем выше порог ионизации, тем ниже вероятность.

$w \sim \frac{1}{\omega}$ – чем ниже частота, тем больше время, за которое электрон может поглотить нужную энергию.

$w \sim (\dots)^n$ – n -кратное поглощение.

$$w \sim \left(\frac{E^2}{\omega I} \right)^n$$

Результат полученный Л.В.Келдышем в рамках квантовой механики:

$$w = B\omega n^{3/2} \left(\frac{\bar{e}e^2 E^2}{8m\omega^2 I} \right)^n \quad (1)$$

Оценка порогового поля

За время $t_1 \approx 40$ нс в фокусном пятне радиусом $r \approx 0.2$ мм должно появиться $N = 10^{13}$ электронов:

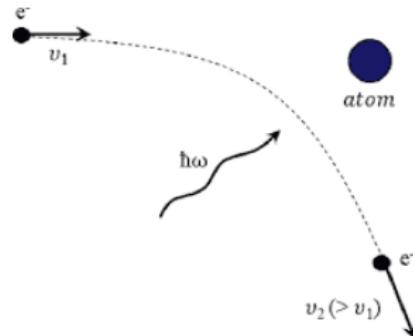
$$N = \frac{4}{3}\pi r^3 N_a t_1 w$$

$$E = \sqrt{\frac{8m\omega^2 I}{\bar{e}e^2}} \left[\frac{w}{\omega n^{3/2}} \right]^{1/2n}$$

	Ксенон	Аргон	Воздух
Справочные ¹ , В/см	$(1.5 \div 2.3) \cdot 10^6$	$(2.7 \div 3.1) \cdot 10^6$	$(5 \div 13) \cdot 10^6$
Оценка, В/см	$110 \cdot 10^6$	$150 \cdot 10^6$	$130 \cdot 10^6$

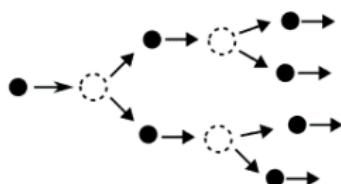
¹ В соответствии с: [1], [4], [5], [3], [6]

Развитие пробоя – электронная лавина



Процесс, обратный тормозному излучению

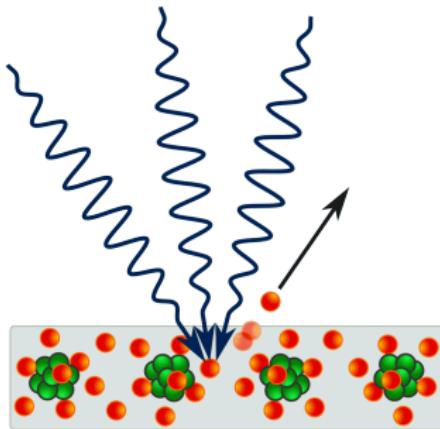
- Классика: в переменном поле энергия колебаний при столкновениях переходит в тепло.
- Квантовая: электрон поглощает фотоны при столкновениях.



Электронная лавина

Формируется электронная лавина.

Развитие пробоя – многоквантовый фотоэффект



Электрон поглощает
несколько фотонов
одновременно.

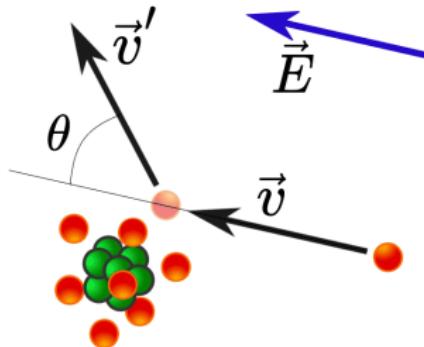
$$n \cdot h\nu \sim n \cdot 2 \text{ эВ} > I \sim 10 \div 20 \text{ эВ}$$

Многоквантовый фотоэффект

Развитие пробоя:

- $p \geq 1 \text{ атм}$ – электронная лавина.
- $p \ll 1 \text{ атм}$ – многоквантовый фотоэффект.

Нарастание энергии – классический случай



Рассеяние электрона

Изолированный электрон не забирает энергию у поля. Получать энергию можно только за счет столкновений.

$$\varepsilon_{\text{кол}} = e^2 E_0^2 / 4m\omega^2 \sim 0.01 \text{ эВ}$$

$\varepsilon \sim 10 \text{ эВ}$ – энергия электрона

$$\varepsilon \gg \varepsilon_{\text{кол}} \gg h\nu$$

Уравнение движения с 'силой трения':

$$m\dot{v} = -mv\nu_m - eE \quad E = E_0 \exp(-i\omega t)$$

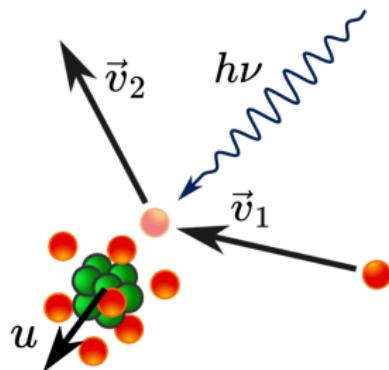
$\nu_m = \nu_c(\sqrt{1 - \cos \theta})$ – эффективная частота столкновений.

Работа, совершаемая полем над электроном:

$$d\varepsilon/dt = \frac{e^2 E^2 \nu_m}{m(\omega^2 + \nu_m^2)}$$

(2)

Нарастание энергии – квантовый подход



Поглощение фотона

Квантовая механика показывает, что классическая формула является применимой в условиях:

$$\varepsilon \geq h\nu \gg \varepsilon_{\text{кол}}$$

Энергии электрона $\varepsilon \approx 5 \text{ эВ}$ позволяют применять данную формулу.

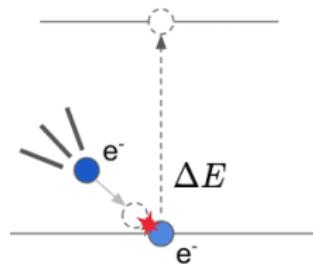
Энергия фотонов во много раз превосходит энергию колебаний:

$$h\nu = 1.8 \text{ эВ} \gg \varepsilon_{\text{кол}} \approx 2.3 \cdot 10^{-2} \text{ эВ}$$

(для рубинового лазера,
 $\omega = 2.7 \cdot 10^{15} \text{ Гц}, E \approx 10^7 \text{ В/см}^2$).

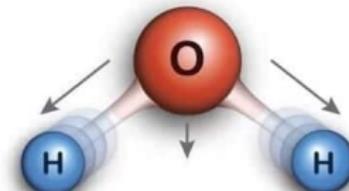
Потери энергии электронов

Существует два рода потерь: упругие и неупругие.



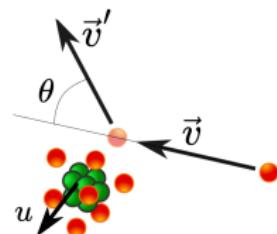
Возбуждение
столкновением

Работают при
энергиях
 $2/3I \div 3/4I$
(инертные газы).



Колебательные
степени свободы

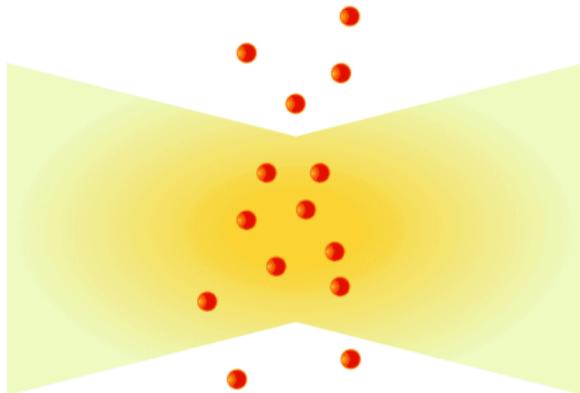
Работают для
молекулярных
газов даже при
малых энергиях
электронов.



Отдача энергии при
столкновении

Работают при
любых
столкновениях с
атомами.

Потери электронов



Диффузия электронов

Основной механизм потерь – диффузия из области фокусного пятна.

Критерий пробоя

- Давление $p \ll 100$ атм \Rightarrow потери энергии \ll диффузия.
- Время лазерного импульса t_1 очень короткое \Rightarrow диффузией можно пренебречь.

Число электронов:

$$N_e = N_0 e^{\nu_i t} \quad \nu_i = \frac{1}{I} \frac{d\varepsilon}{dt}$$

ν_i – частота электронной ионизации,

За время $t_1 \approx 40$ нс должно появиться $N_1 \approx 10^{13}$ электронов:

$$\boxed{\nu_i > \frac{\ln(N_1/N_0)}{t_1}}.$$

Оценка порогового поля

Совмещая частоту электронной ионизации ν_i с нарастанием энергии $d\varepsilon/dt$:

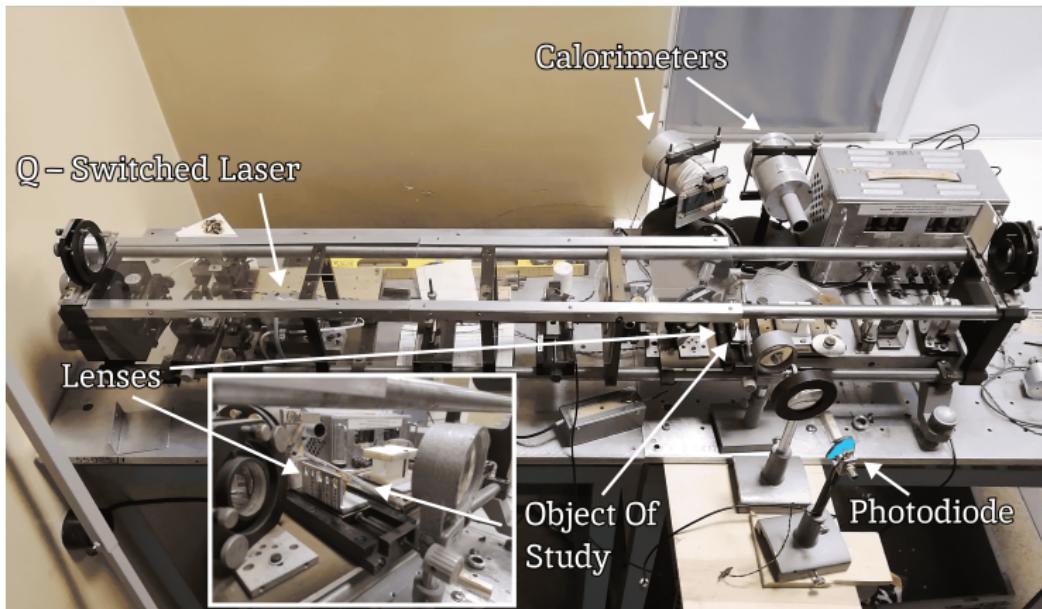
$$E = \left[\frac{m\omega^2 I}{e^2 \nu_m t_1} \ln \frac{N_1}{N_0} \right]^{1/2}$$

	Ксенон	Аргон	Воздух
Справочные ² , В/см	$(1.5 \div 2.3) \cdot 10^6$	$(2.7 \div 3.1) \cdot 10^6$	$(5 \div 13) \cdot 10^6$
Оценка 1, В/см	$110 \cdot 10^6$	$150 \cdot 10^6$	$130 \cdot 10^6$
Оценка 2, В/см	$1.5 \cdot 10^6$	$2.7 \cdot 10^6$	$2.4 \cdot 10^6$

² В соответствии с: [1], [4], [5], [3], [6]

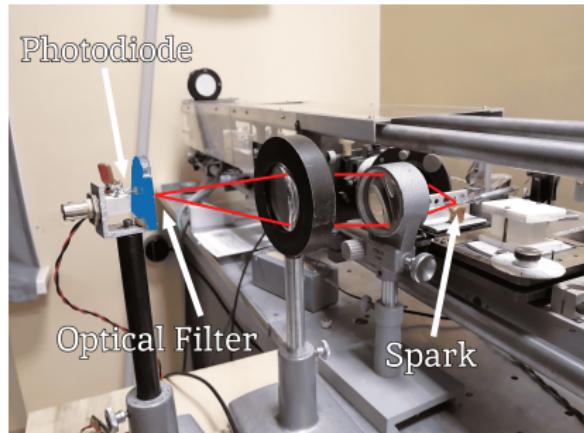
Измерения и Результаты

Экспериментальная установка

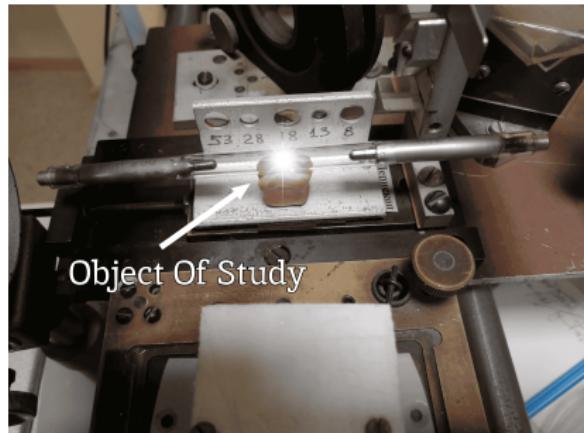


Общий вид установки
(на переднем фоне система линз для фокусировки вспышки)

Экспериментальная установка



Интенсивность излучения от времени



Площадка с набором линз для фокусировки пучка

Пробой воздуха

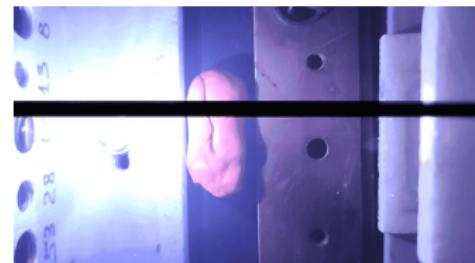
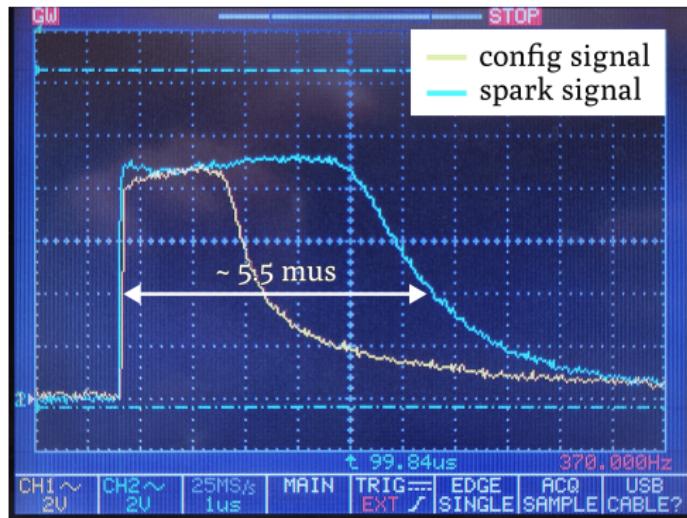
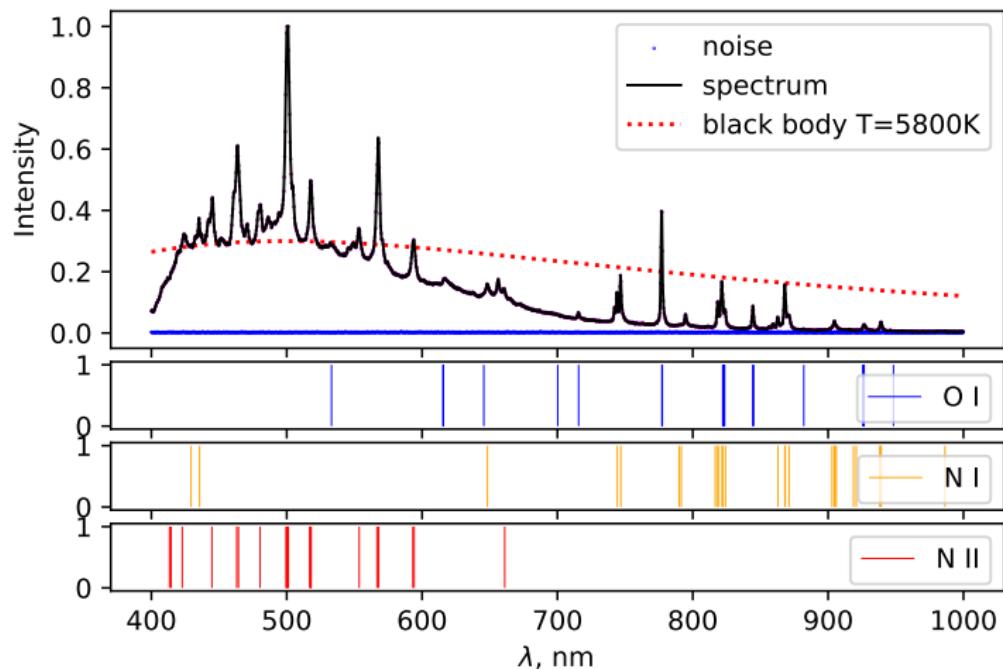


Фото пробоя

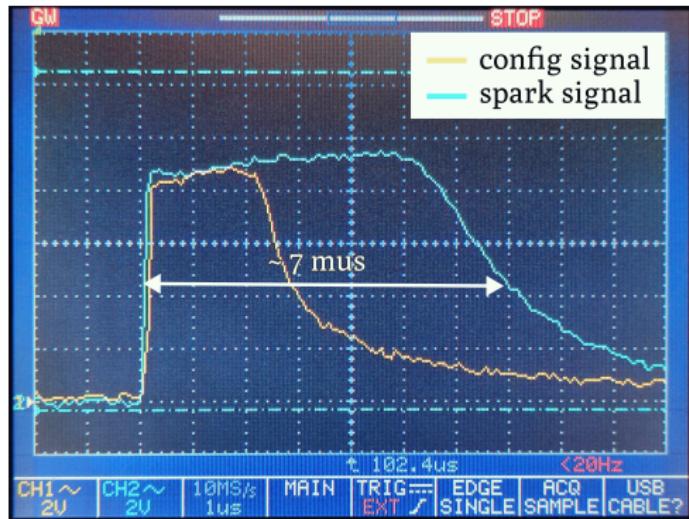
Интенсивность излучения от времени

Спектр воздушного пробоя



Спектр пробоя в воздухе

Пробой ксенона

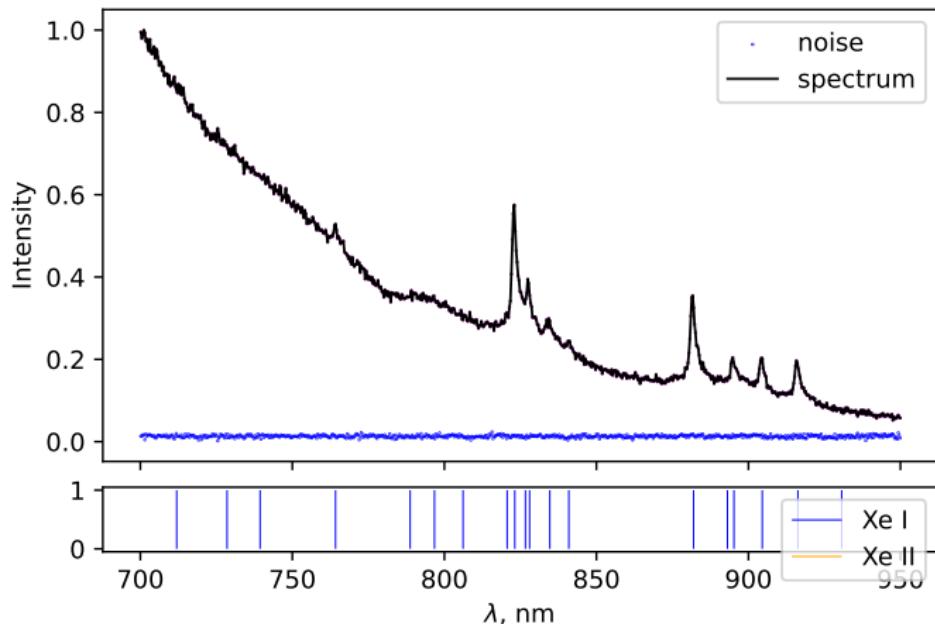


Интенсивность излучения от времени



Фото пробоя

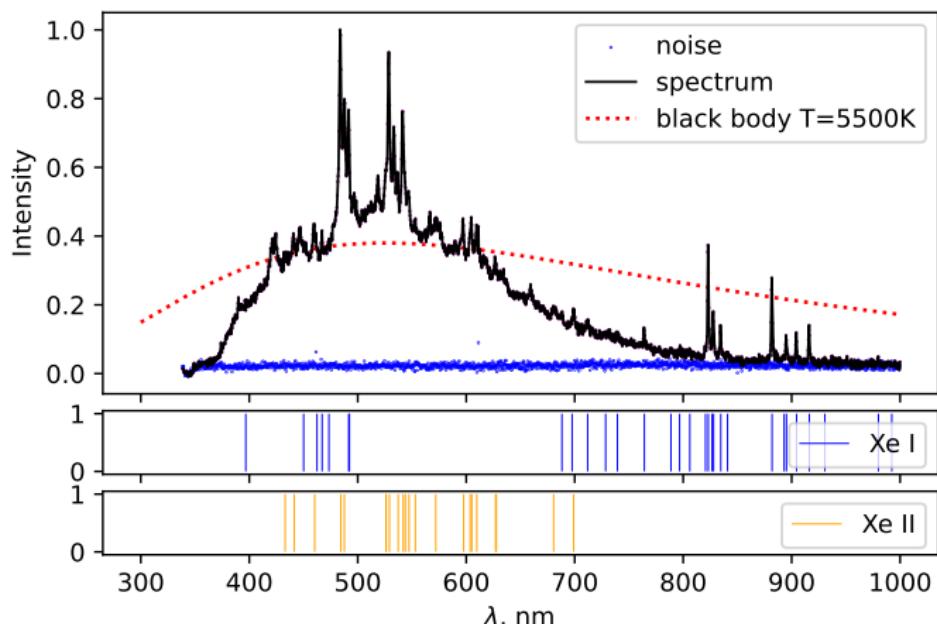
Спектр пробоя ксенона



Шаровая
лампа
ДКСШ

Спектр пробоя ксенона

Спектр пробоя ксенона

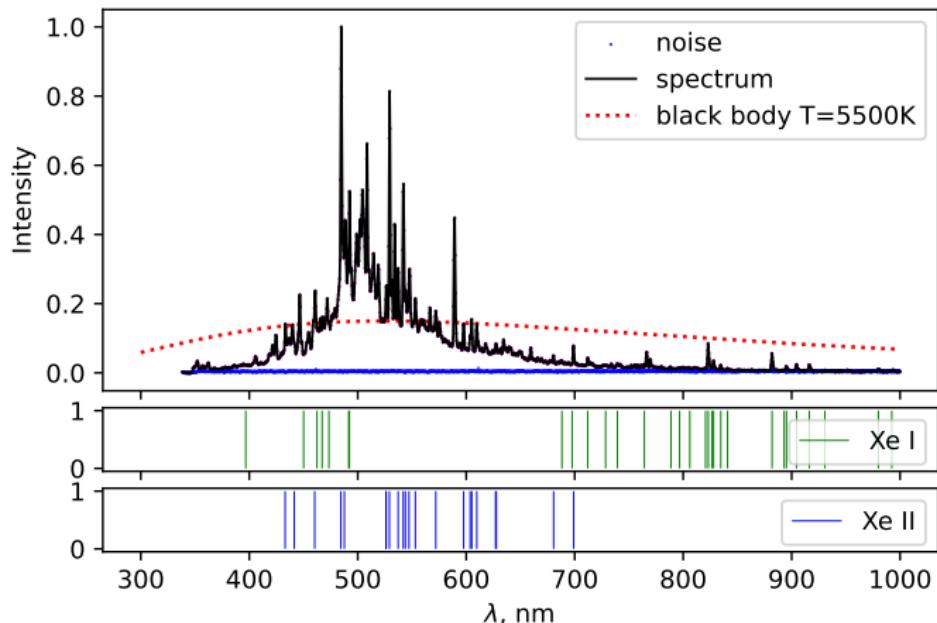


Спектр пробоя ксенона



Лампа
ИФП-800

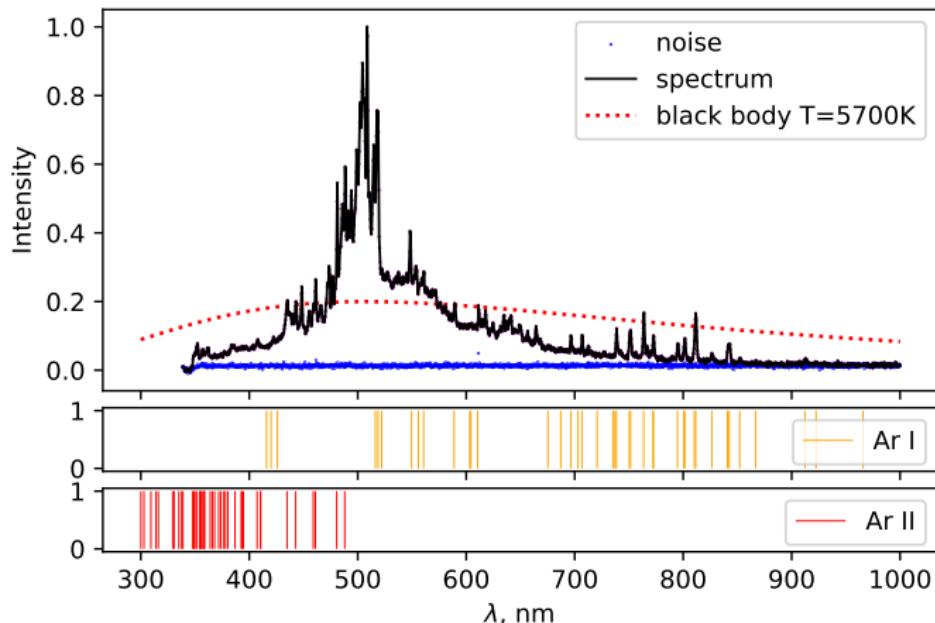
Спектр пробоя ксенона



Тиаратрон
ТГЗ-
0.1/1.3

Спектр пробоя ксенона

Спектр пробоя аргона

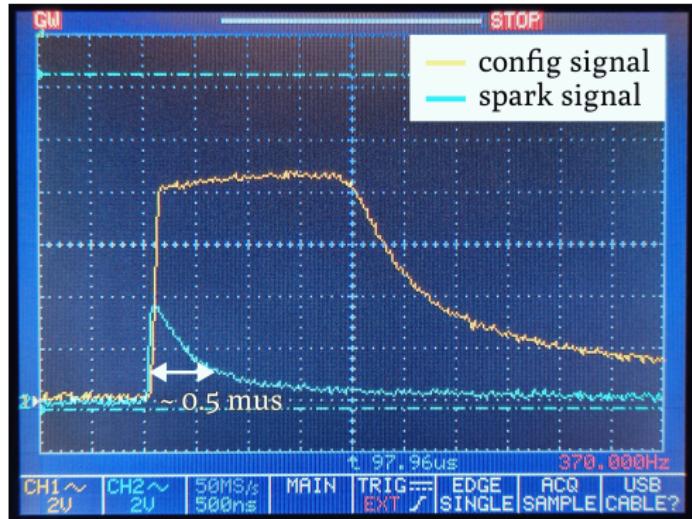


Спектр пробоя аргона



Тиратрон
ТГИ1-3/1

Пробой воды



Интенсивность излучения от времени

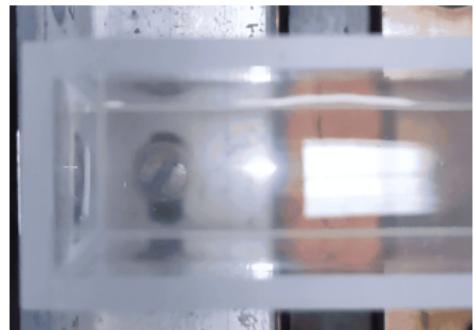
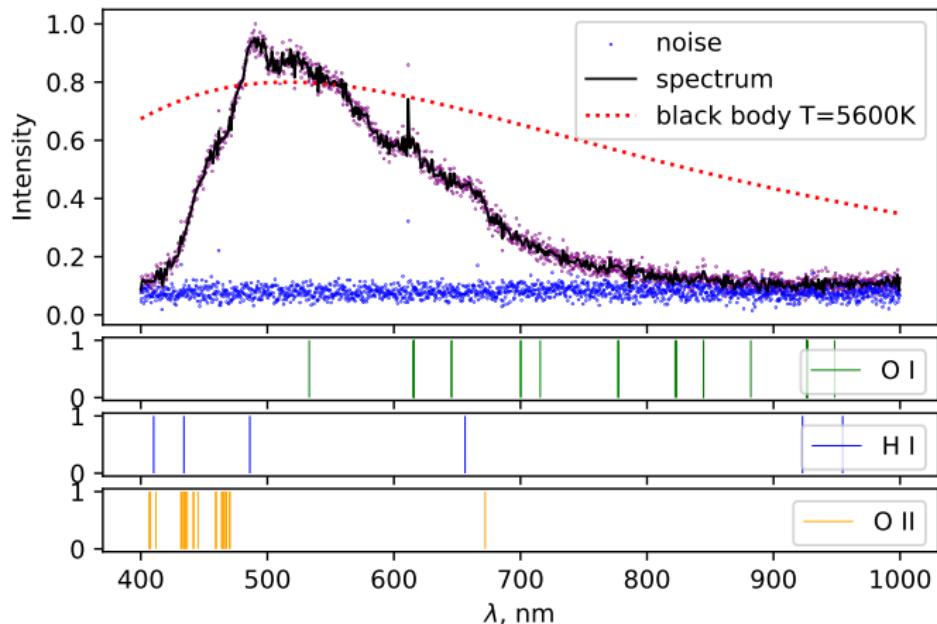
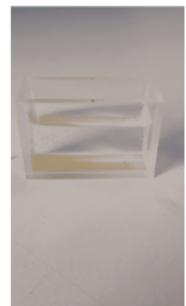


Фото пробоя

Спектр пробоя воды



Спектр пробоя воды



Кювета с
водой

Оценка пороговой интенсивности

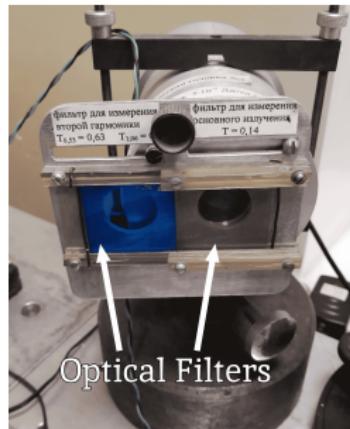


Фото калориметра

Пороговое значение энергии лазера,
измеренное калориметром:

$$W = (0.08 \pm 0.01) \text{ Дж.}$$

Диаметр пятна в фокусе линзы:

$$d = \theta f = (54 \pm 16) \text{ мкм},$$

$\theta \approx 3.0 \cdot 10^{-3}$ рад. – угловая расходимость
лазерного пучка,
 $f = 18$ мм – фокусное расстояние линзы.

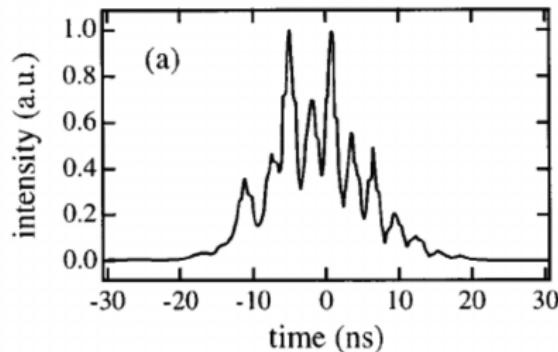
Оценка пороговой интенсивности

Оценка пороговой интенсивности:

$$S_{\min} = \Theta \cdot \frac{W}{\tau \left(\frac{\pi d^2}{4} \right)} = (1.8 \pm 0.6) \cdot 10^{11} \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2},$$

$\tau = 40$ нс – время импульса,

$\Theta \sim 2$ – коэффициент формы импульса.



Временная форма импульса неодимового лазера с Q-модуляцией

Выводы и Заключение

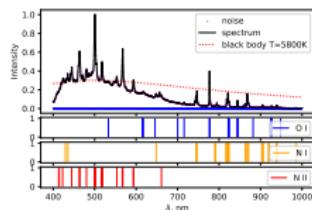
Выводы

- Был изучен лазерный пробой. Пороговые значения поля были измерены:
$$E_{air} = 8.2 \cdot 10^6 \text{ В/см}$$

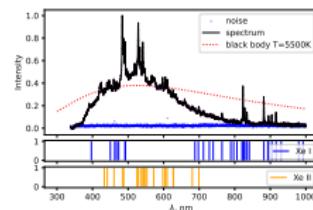
- Теоретические оценки согласуются с экспериментальными данными.

	Ксенон	Аргон	Воздух
Эксперимент ³ , В/см	$(1.5 \div 2.3) \cdot 10^6$	$(2.7 \div 3.1) \cdot 10^6$	$(5 \div 13) \cdot 10^6$
Оценка, В/см	$1.5 \cdot 10^6$	$2.7 \cdot 10^6$	$2.4 \cdot 10^6$

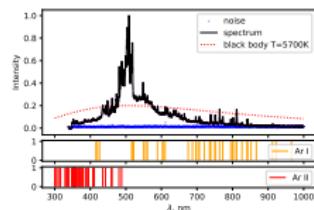
- Были собраны спектры и временные характеристики пробоя.



Спектр воздуха



Спектр ксенона



Спектр аргона

³В соответствии с: [1], [4], [5], [3], [6]

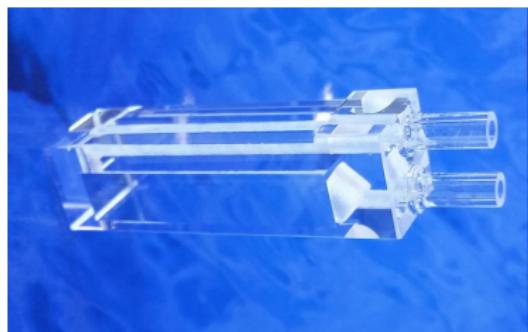
Возможные улучшения

В дальнейшем можно:

- Использовать фотодиод с более высоким временным разрешением.
- Фотографировать пробой на CCD/ICCD камеру.
- Проводить измерения в оптической кювете.
- Применить более точную теорию для оценок.



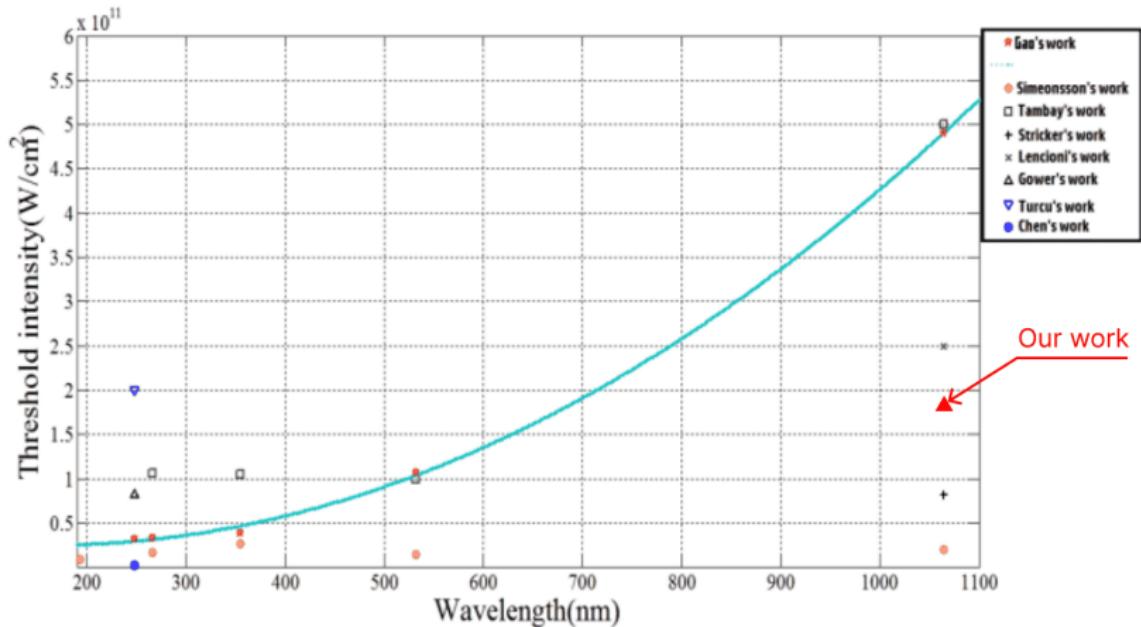
ICCD камера



Газовая оптическая кювета

Спасибо за внимание!

Приложение: Пороговые поля для воздуха



Разнообразие пороговых полей

-  Y. P. Raizer, 'Laser Spark and Propagation of Discharges'.
-  S. S. Harilal, B. E. Brumfield, M. C. Phillips, 'Lifecycle of laser-produced air sparks'.
-  Kai-Ting Yen, Chih-Hung Wu, Pin-Hsun Wang, Pi-Hui Tuan, Kuan-Wei Su, 'Investigating the Threshold Conditions of Air Breakdown with Mode-Locked Q-Switched Laser Pulses, and the Temporal Dynamics of Induced Plasma with Self-Scattering Phenomenon'
-  F. Morgan, 'Laser beam induced breakdown in helium and argon'.
-  Yosr E. E-D. Gamal, M. A. Mahmoud, Nagia Dawood, 'Numerical investigation of the threshold intensity dependence on gas pressure in the breakdown of xenon by different laser wavelengths'.
-  Zhixing Gao, Lixuan Hana, Jing Lia, 'Investigation of laser induced air breakdown thresholds at 1064, 532, 355, 266 and 248nm'.
-  H. Nishimura, T. Matsuda, A. Danjo, 'Elastic Scattering of Electrons from Xenon'.
-  K. P. Subramanian, V. Kumar, 'Total electron scattering cross sections for argon, krypton and xenon at low electron energies'.
-  A. Roldan, J.M. Perez, 'Energy deposition model for low-energy electrons (10–10 000 eV) in air'.