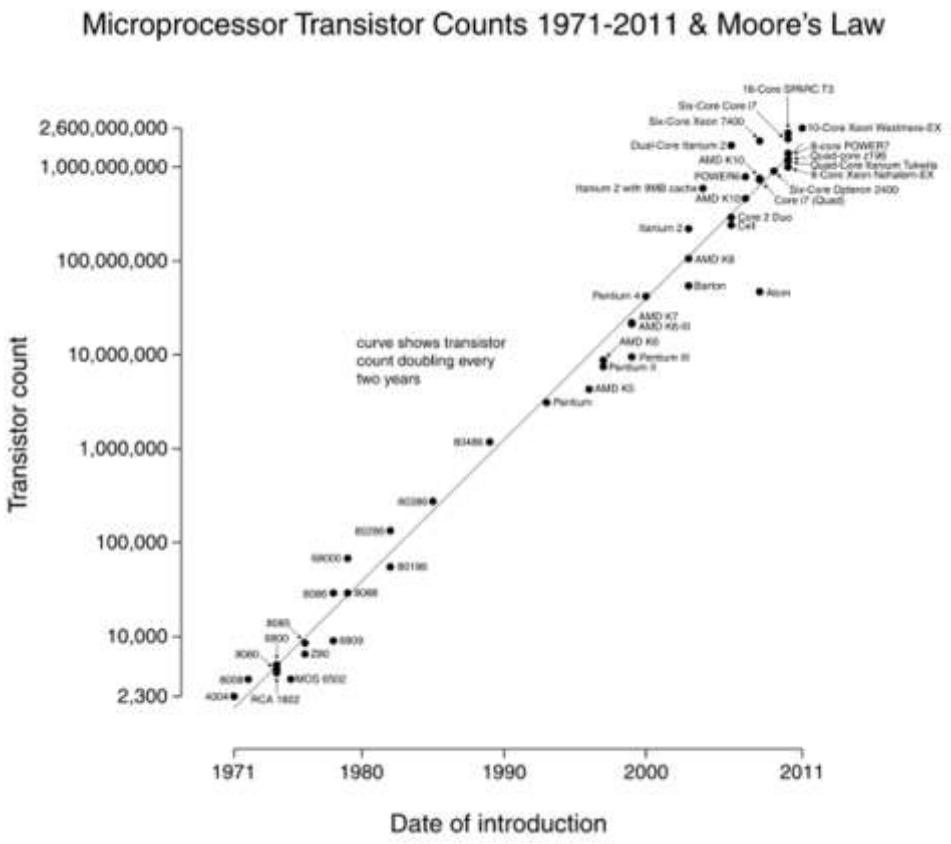
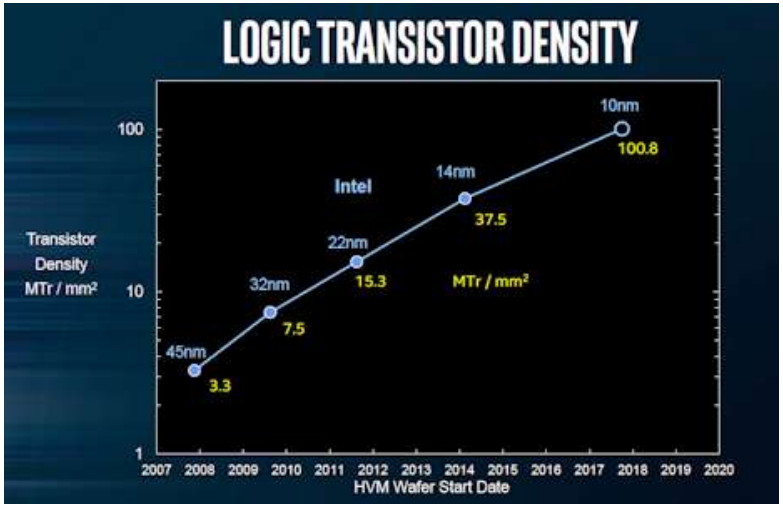
Точечный источник экстремального ультрафиолета на основе разряда в сфокусированном пучке терагерцового излучения

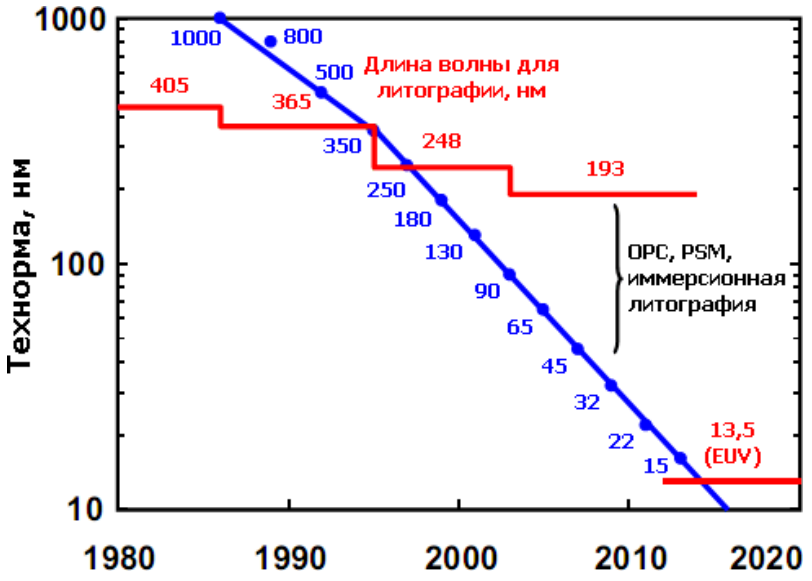
Водопьянов А.В.

Институт прикладной физики РАН,
Нижний Новгород

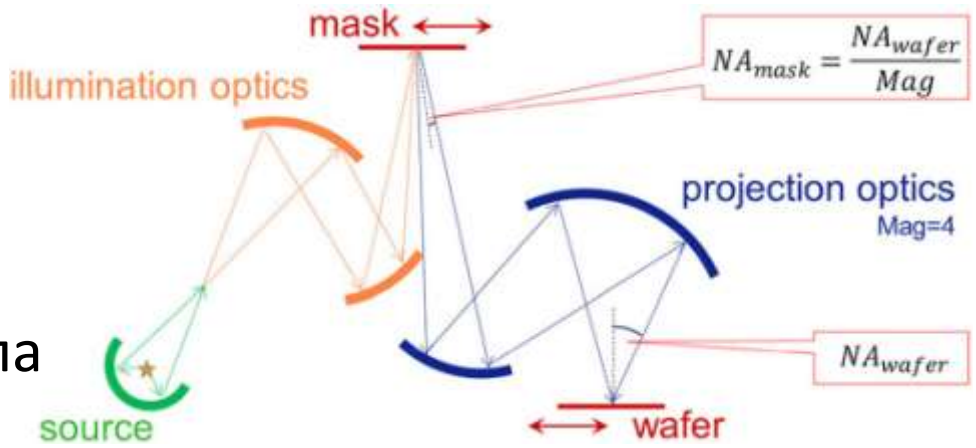
Введение
Закон Мура, точечный источник экстремального ультрафиолета







Введение
Литография высокого разрешения



- Оптическая схема:
- Mo/Si многослойные зеркала
  R = 60-70%, всей схемы 5%

- Источник мягкого рентгеновского излучения (экстремального ультрафиолета):
  > 100 Вт в 13.5 нм± 1 %, (11.2 нм 6.7 нм)
  - Излучение возбужденных многозарядных ионов

  Xe^{10+} (CE 1%) Sn^{+7} – Sn^{+12} (CE 5%) Li^{3+} (CE 1%)

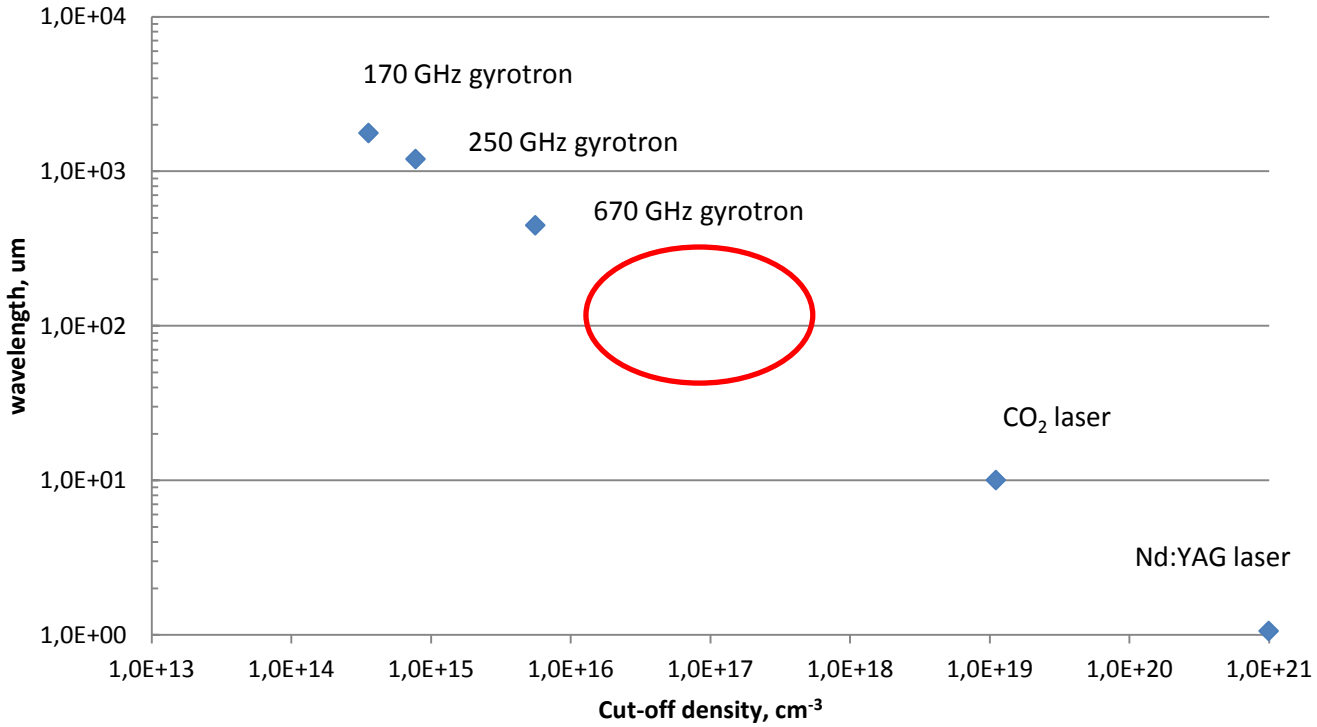
Введение
Источник экстремального ультрафиолета

- Точечный разряд с многозарядными ионами Sn^{+9} -Sn^{+12}, Xe^{8+} - Xe^{11+}
- $N_e\tau_i \sim 10^9$ $cm^{-3}s$
- T_e = 20 – 200 eV (E_{ph} = 92 eV)
- Размер L < 1 mm
- $\tau = L / V_{is} = 10^{-8} - 10^{-7}s$
- $N_e = 10^{16} – 10^{18}$ cm^{-3}
- Мощность излучения в 13.5nm ± 1% 100 - 1000 W

Неравновесный разряд $T_e > T_i$

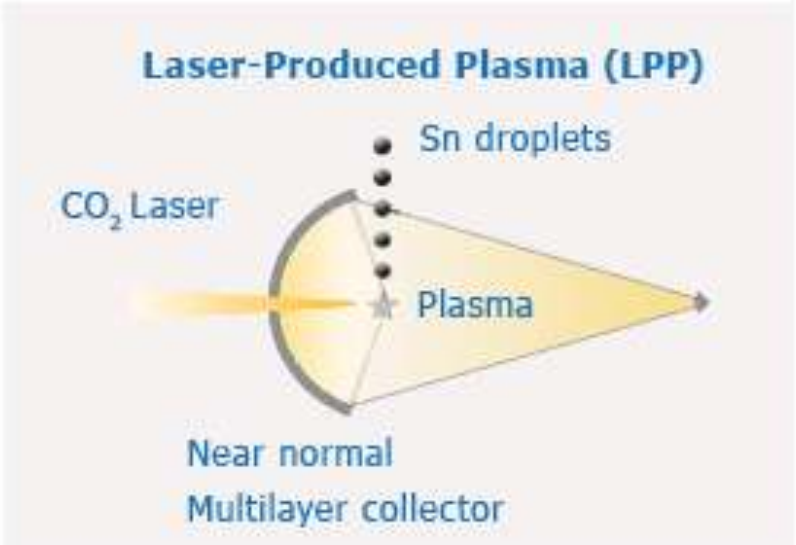
1. Vodopyanov A.V, et al // JETP Letters, 88, 95.
2. Yushkov G.Y., et al // IEEE Transactions on Plasma Science, 41, 2081

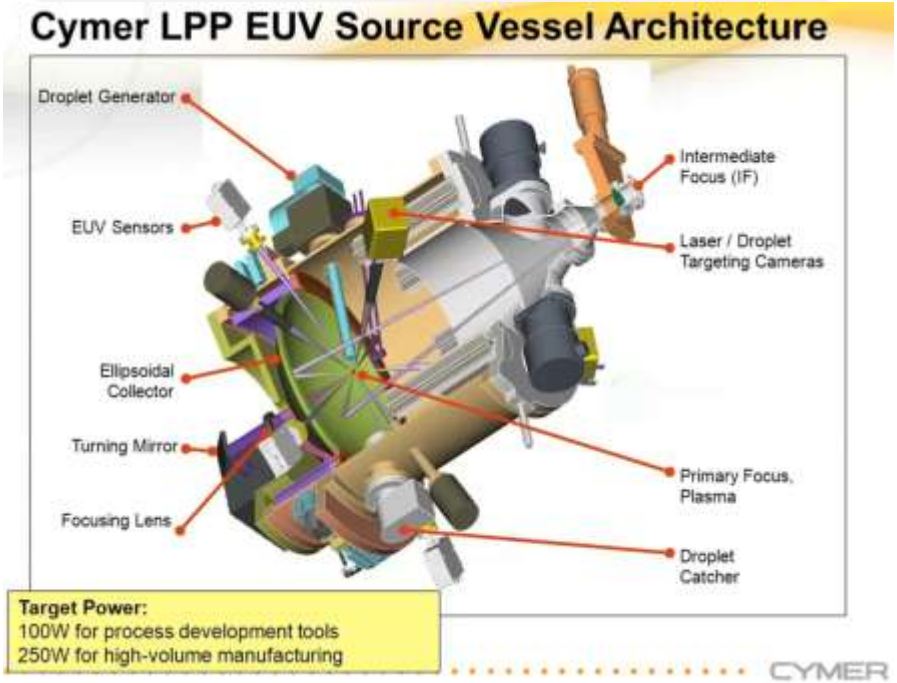
Источники излучения для нагрева плазмы



	pulse power, kW	mean power, kW	focusing
Nd:YAG laser	>1e5	> 20	< 100 um
CO2 laser	>1e5	> 20	< 100 um
670 GHz gyrotron	40	~ 0	900 um
250 GHz gyrotron	1(200)	1 (20)	2400 um
170 GHz gyrotron	2000	2000	3500 um

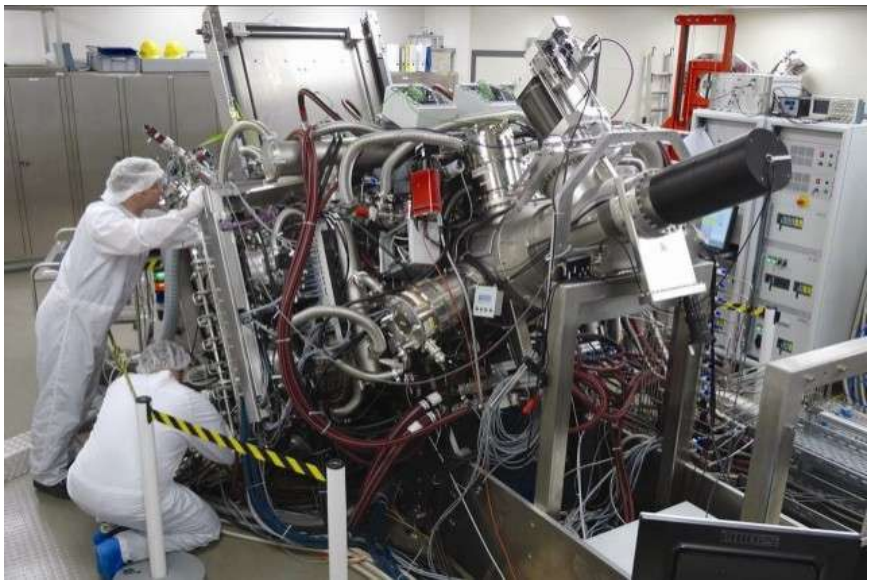
Источник на основе CO_2 лазера



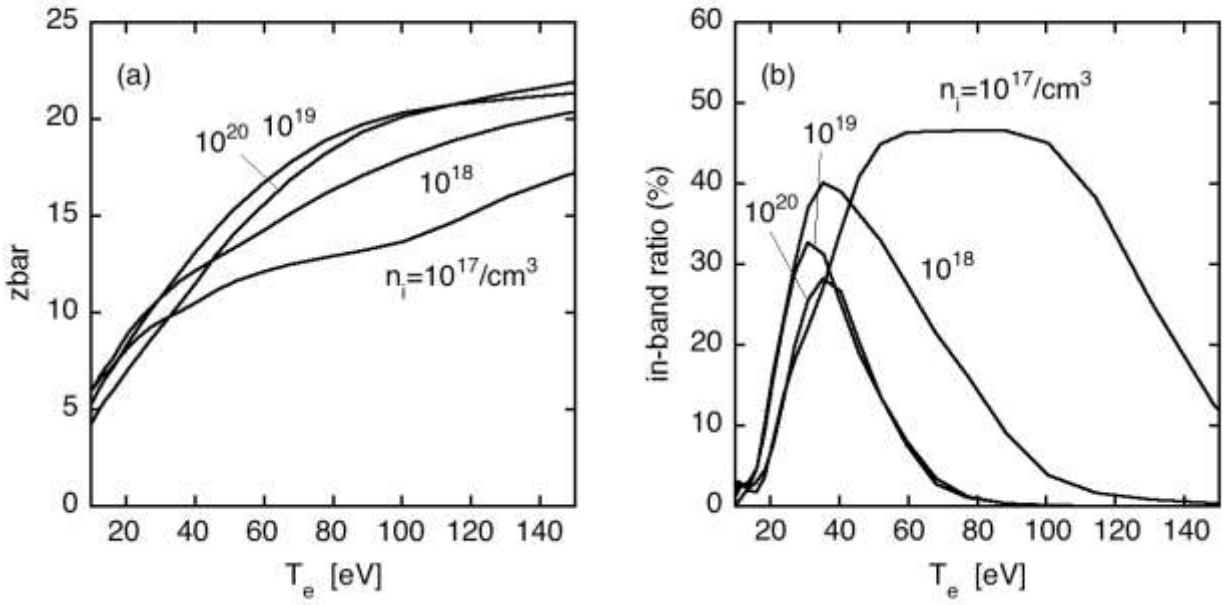


Недостатки:

- Низкая энергоэффективность
- короткое время работы
- Загрязнение оптики



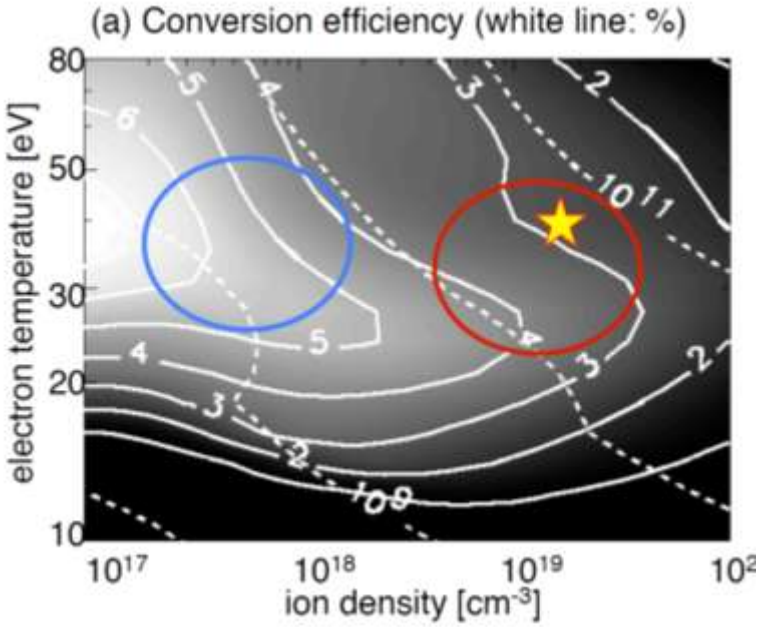
A. Sasaki et al. // Journal of Physics: Conference Series **112** (2008) 042062



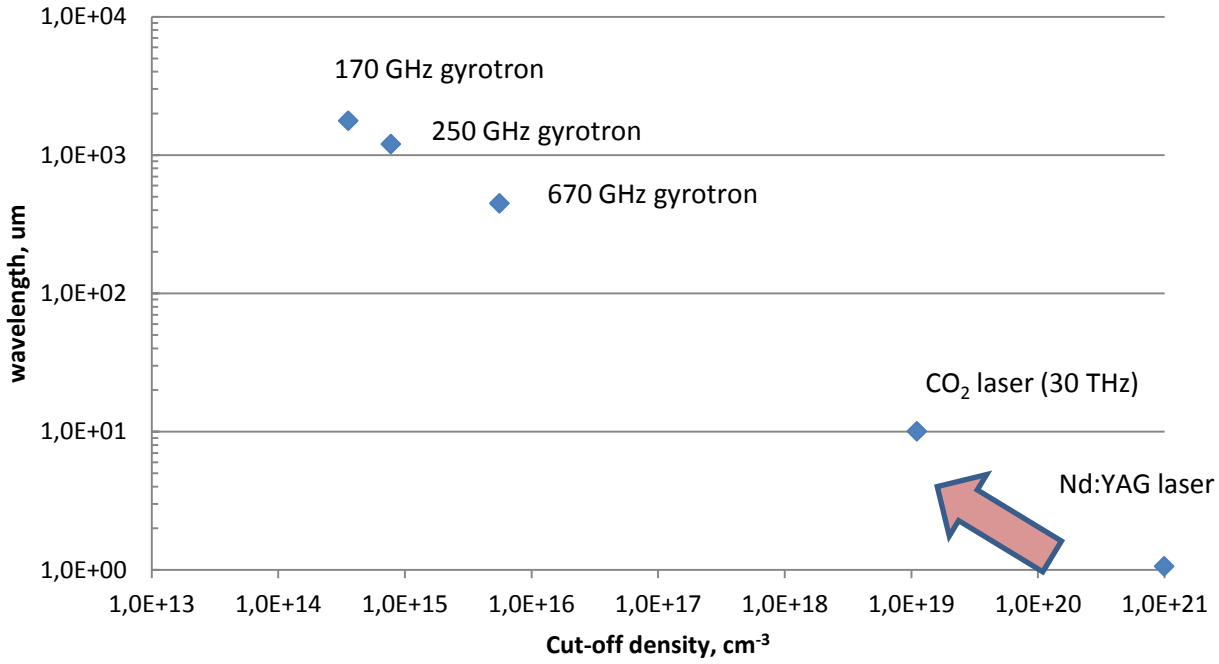
Средний заряд ионов и спектральная эффективность. Расчет.

Y. Izawa et al. // Journal of Physics: Conference Series **112** (2008) 042047

Зависимость эффективности преобразования лазерного излучения от электронной температуры и плотности ионов. Красный и синий кружки – оптимальные условия для лазера с длиной волны 1 μm и 10 μm



Источники излучения для нагрева плазмы

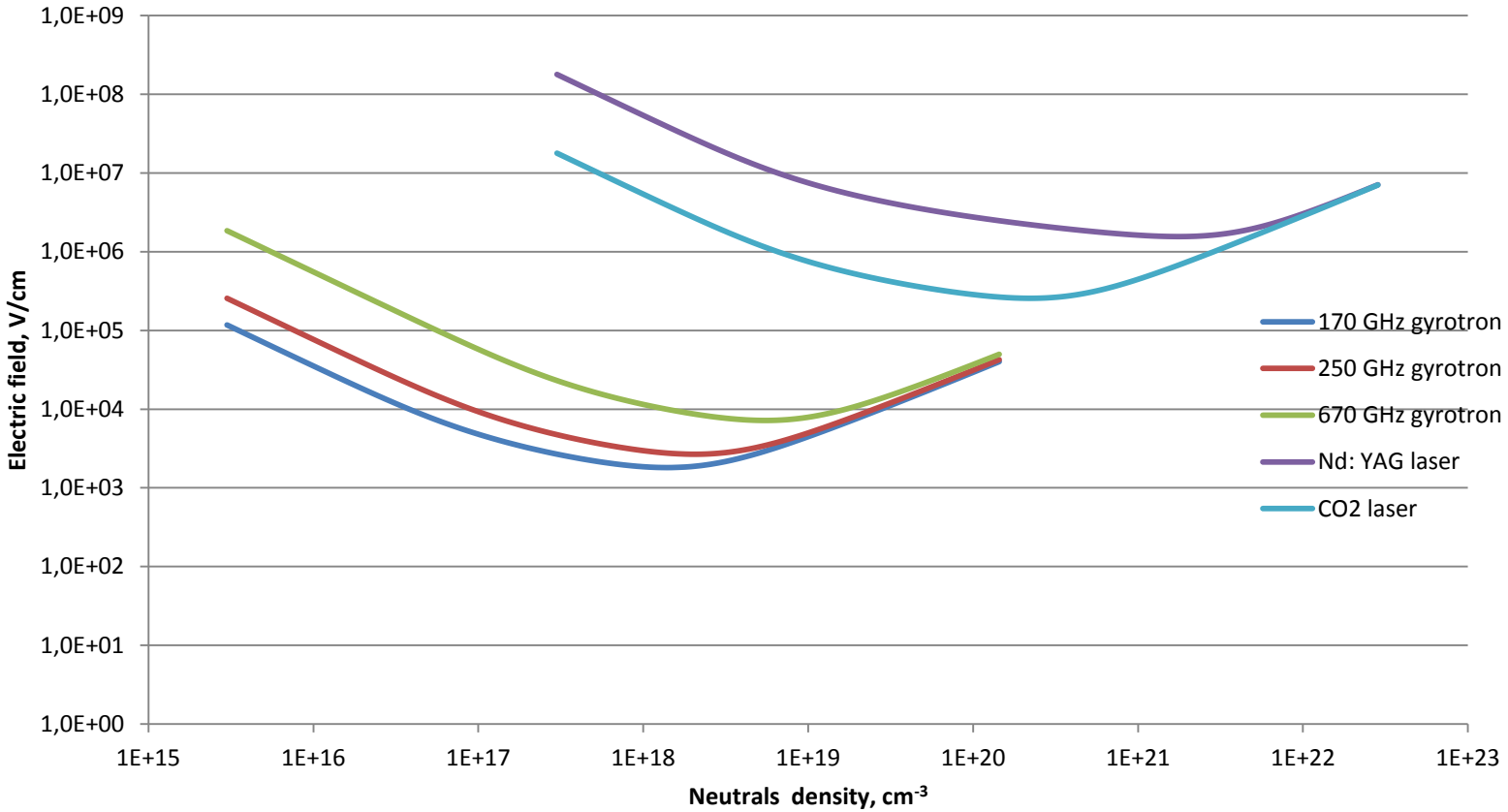


	pulse power, kW	mean power, kW	focusing
Nd:YAG laser	>1e5	> 20	< 100 um
CO2 laser	>1e5	> 20	< 100 um
670 GHz gyrotron	40	~ 0	900 um
250 GHz gyrotron	1(200)	1(20)	2400 um
170 GHz gyrotron	2000	2000	3500 um

Точечный разряд, поддерживаемый сфокусированным пучком терагерцового излучения

- Пороги пробоя
- Газовая мишень
- Фокусирующая система
- Точечный разряд в неоднородном потоке газа
- Измерение спектральных характеристик излучения разряда

Пороги пробоя, Ксенон



	pulse power, kW	mean power, kW	focusing
Nd:YAG laser	>1e5	> 20	< 100 um
CO2 laser	>1e5	> 20	< 100 um
670 GHz gyrotron	40	~ 0	900 um
250 GHz gyrotron	1(200)	1(20)	2400 um
170 GHz gyrotron	2000	2000	3500 um

Исследование пробоя газа, 0.67 ТГц, 40 кВт, 20 мкс

Ксенон, 63 Torr

THz



Криптон, 6 Torr

THz



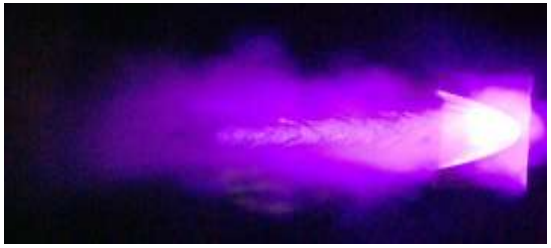
Кислород, 760 Torr

THz



Азот, 300 Torr

THz

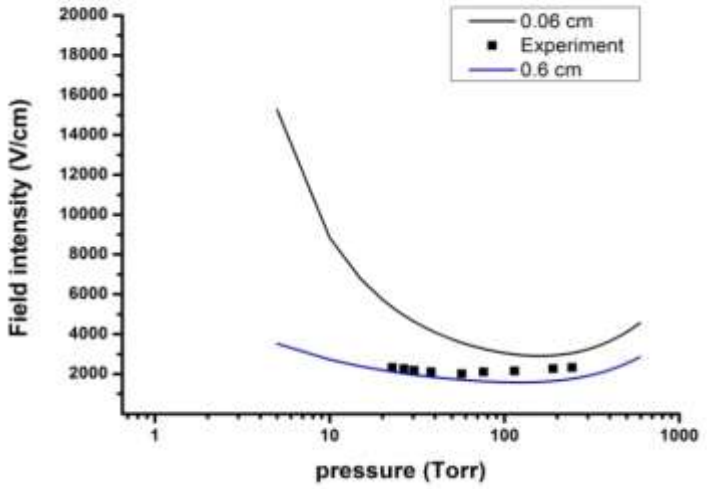


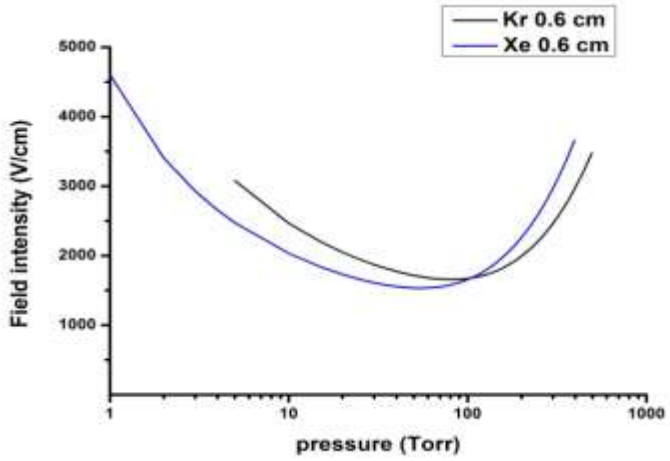
Минимальные давления при которых наблюдался пробой:

Xe	Kr	Ar	N_2	O_2
1.5 Torr	1.5 Torr	8 Torr	12 Torr	18 Torr

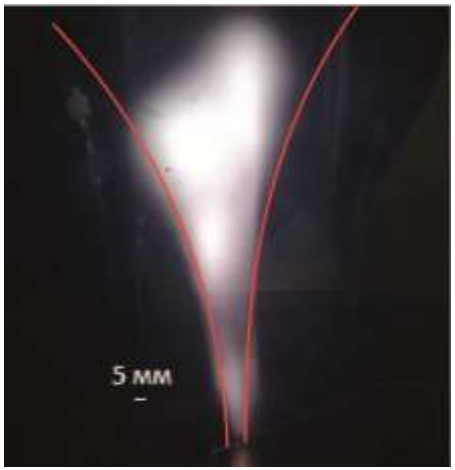
Исследование пробоя газа, 0.26 ТГц, 1 кВт, CW

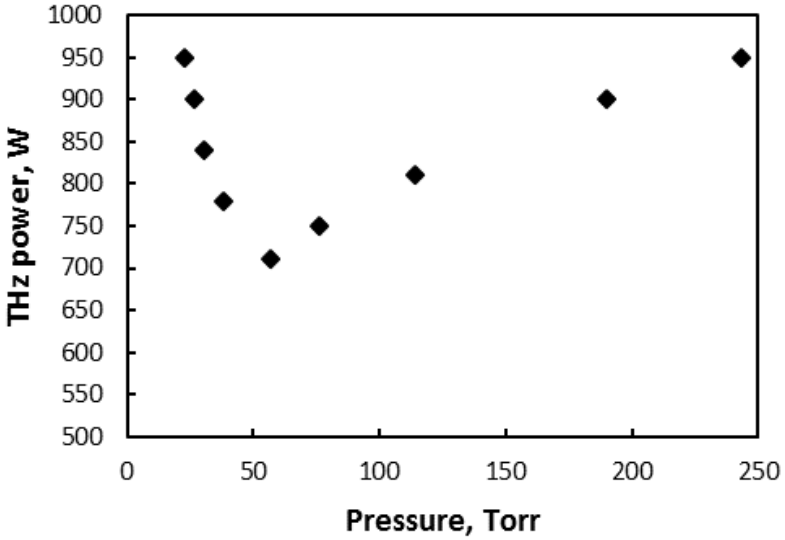
Расчет





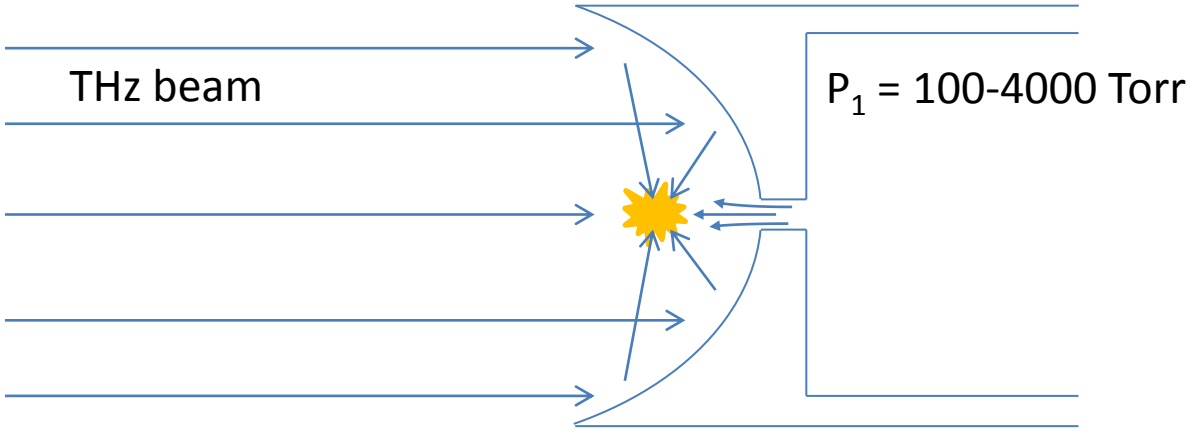
Эксперимент, аргон





Sidorov A., et al // Journal of Physics D: Applied Physics, 51, 464002

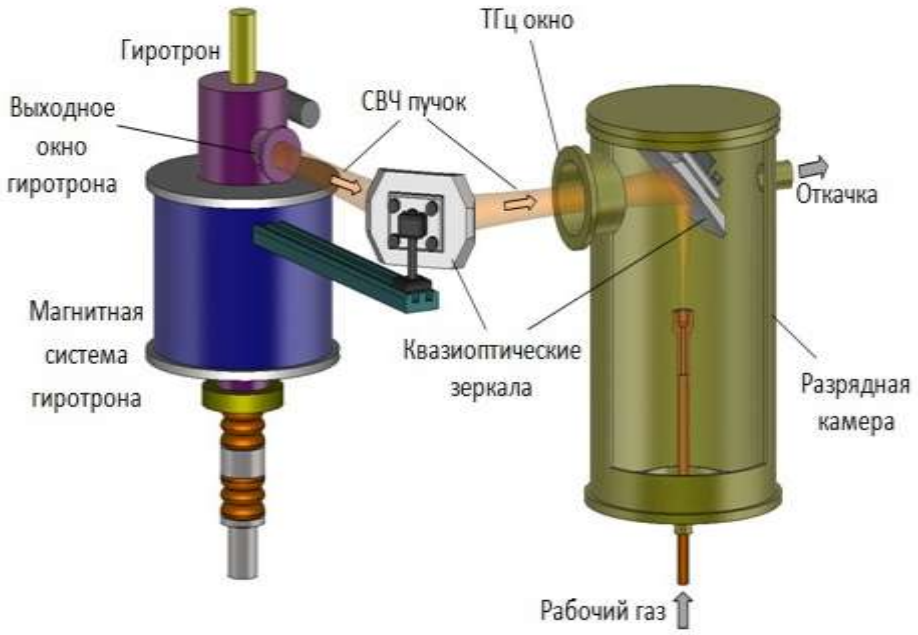
Разряд, поддерживаемый ТГц излучением

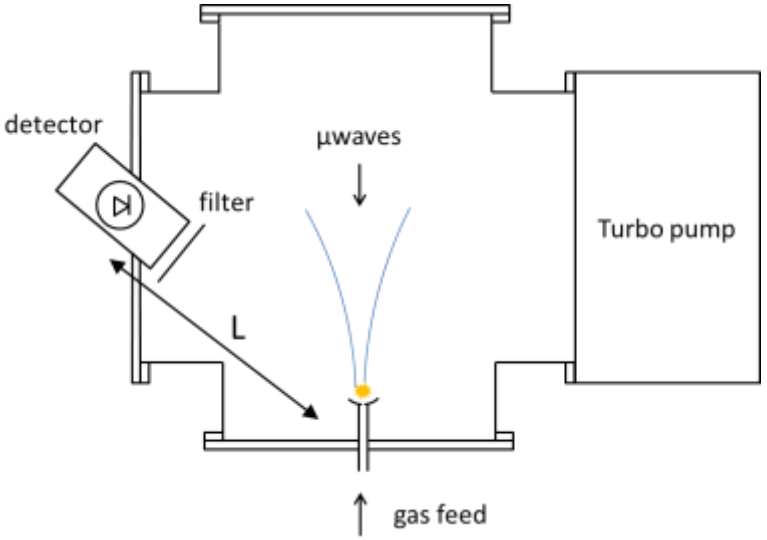


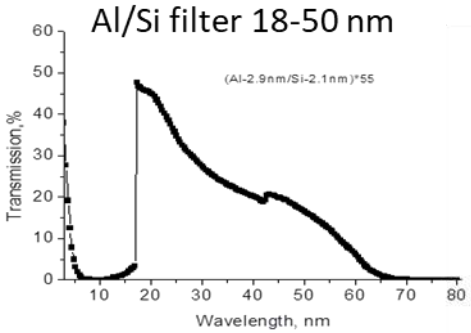
Гиротроны:	40 кВт @ 670 ГГц, 20 мкс ,	10 МВт/см^2,	60 кВ/см
	1 кВт @ 263 ГГц, CW ,	15 кВт/см^2,	2,3 кВ/см
	200 кВт@ 250 ГГц, 50 мкс	4,5 МВт/см^2,	40 кВ/см

Диаметр сопла: 0.3, 0.15, 0.05 mm

Схема установки







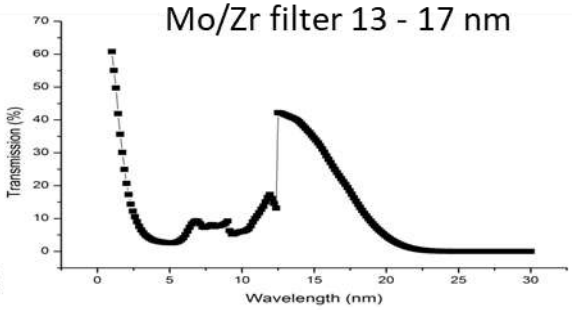
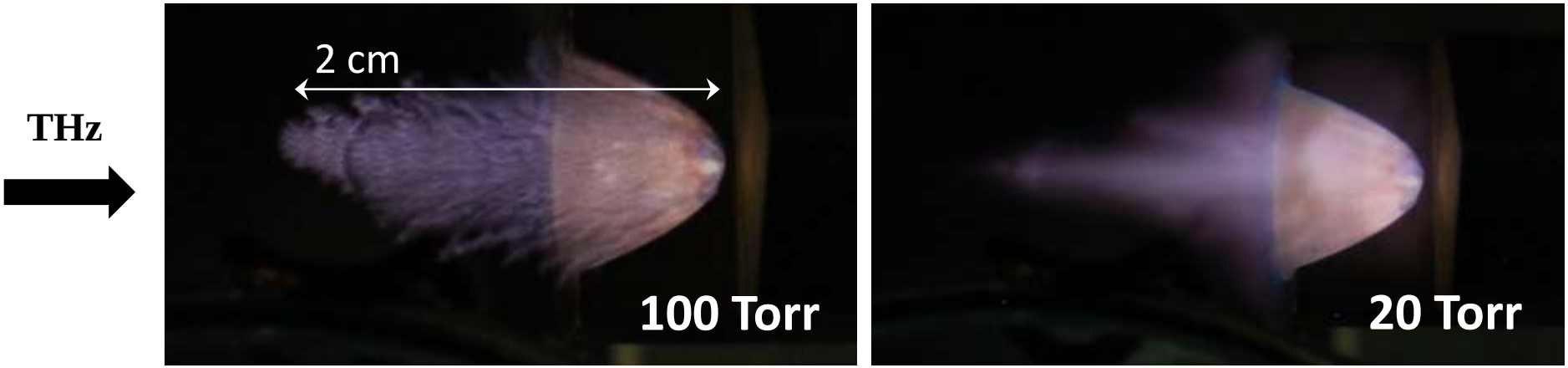




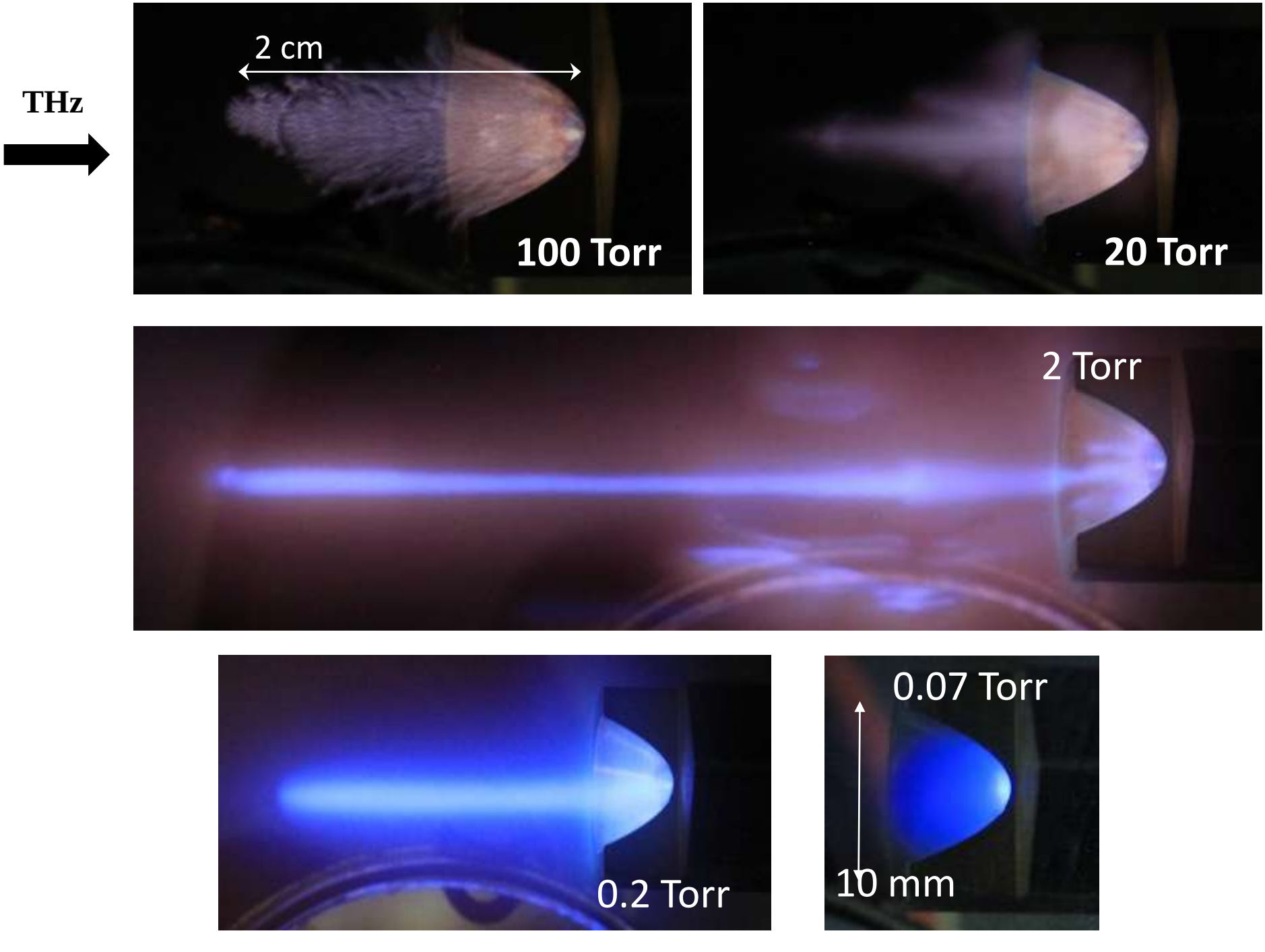
Фото разряда (40кВт @ 0.67 ТГц)



Амбиполярная диффузия $D_A=10^4/(p[\text{Torr}])$ $[\text{cm}^2/\text{s}]$

$P > 80$ Torr => $\Lambda_a < \lambda$

$P < 80$ Torr => $\Lambda_a > \lambda$

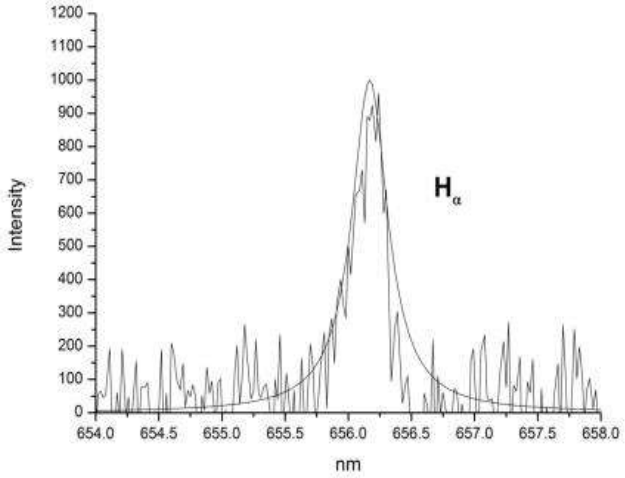

THz
2 cm
100 Torr
20 Torr
2 Torr
0.2 Torr
0.07 Torr
10 mm

Измерение концентрации электронов в разряде (аргон)

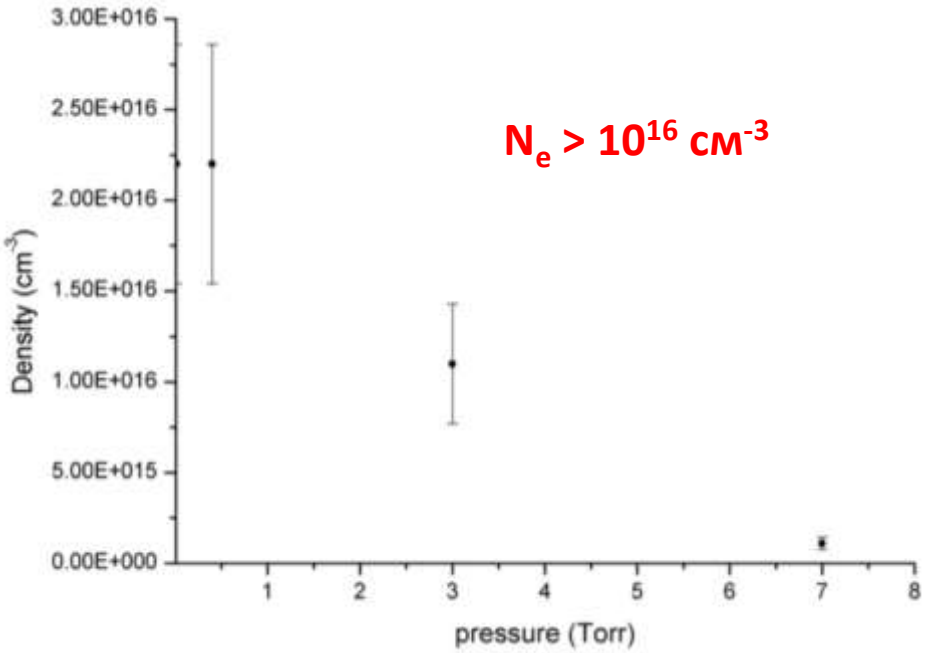


Эффект Штарка

$\Delta\lambda = C \cdot Ne^{2/3}$



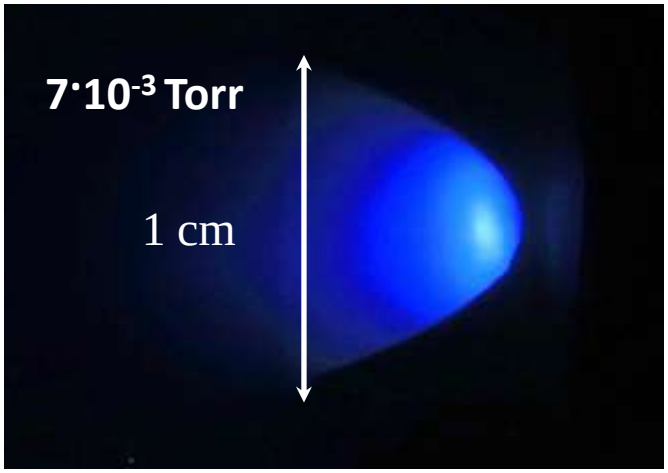
Зависимость концентрации плазмы от напуска газа



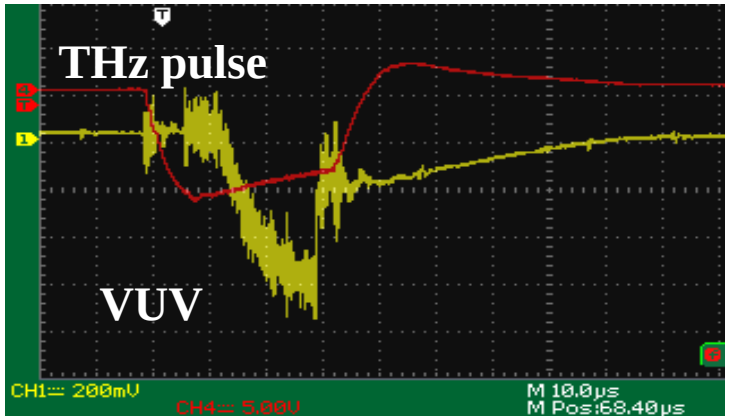
$N_e > 10^{16}$ см$^{-3}$

Sidorov A., et al, Physics of Plasmas, 23, 043511

Точечный источник ВУФ и ЭУФ 40 кВт @ 0.67 ТГц, 20 мкс



L = 1 mm



Светимость разряда в диапазоне 112-180 nm достигала **10 kW**



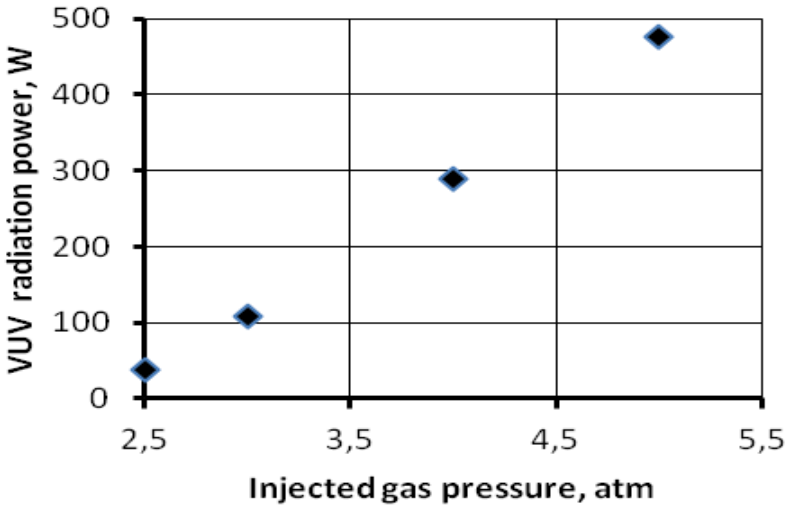
Точечный разряд, Ксенон

Точечный источник ЭУФ. Светимость в диапазоне 12 - 17 nm была **0.11 W** (100 W / cm^3)

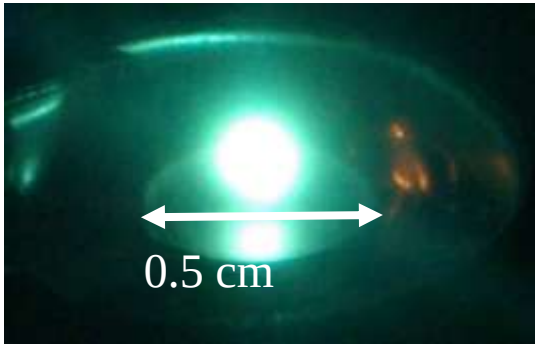
Glyavin M, et al // Applied Physics Letters, 105, 4900751

Точечный источник ВУФ и ЭУФ 1 кВт @ 0.26 ТГц, CW

Светимость точечного разряда в аргоне в диапазоне 112-180 nm достигала **500 Вт**



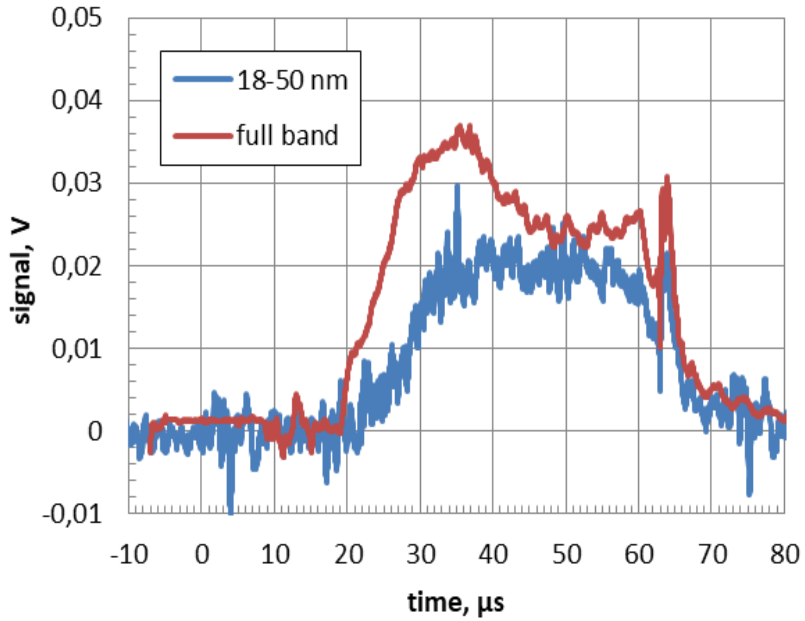
L = 2 mm

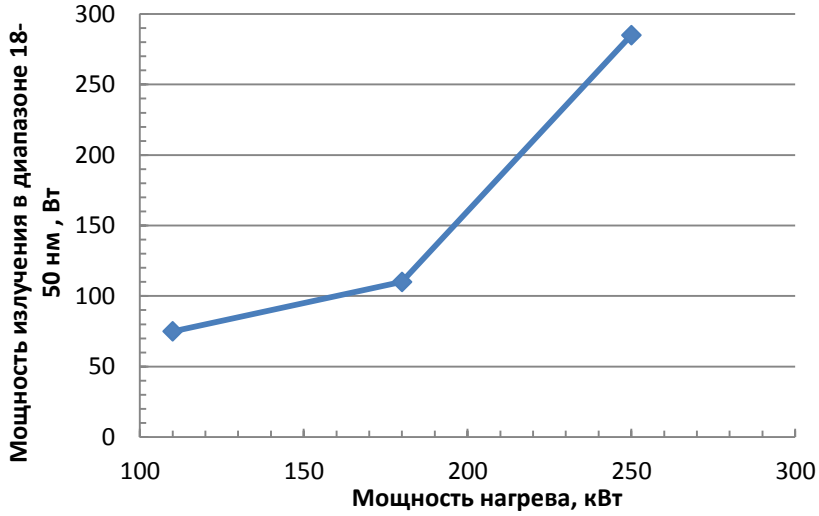


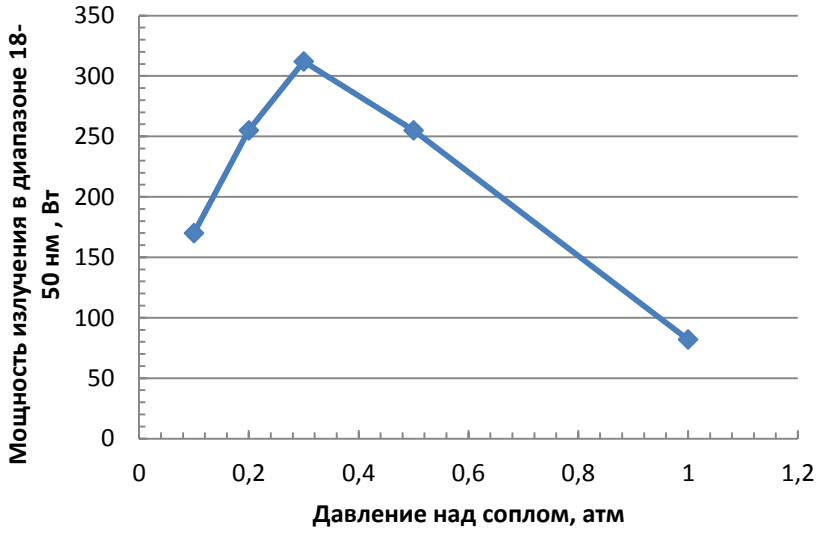
Точечный источник ЭУФ.
Мощность в диапазоне 12 - 17 нм
0.012 Вт

Точечный источник ВУФ и ЭУФ 200 кВт @ 0.25 ТГц, 50 мкс

Аргон







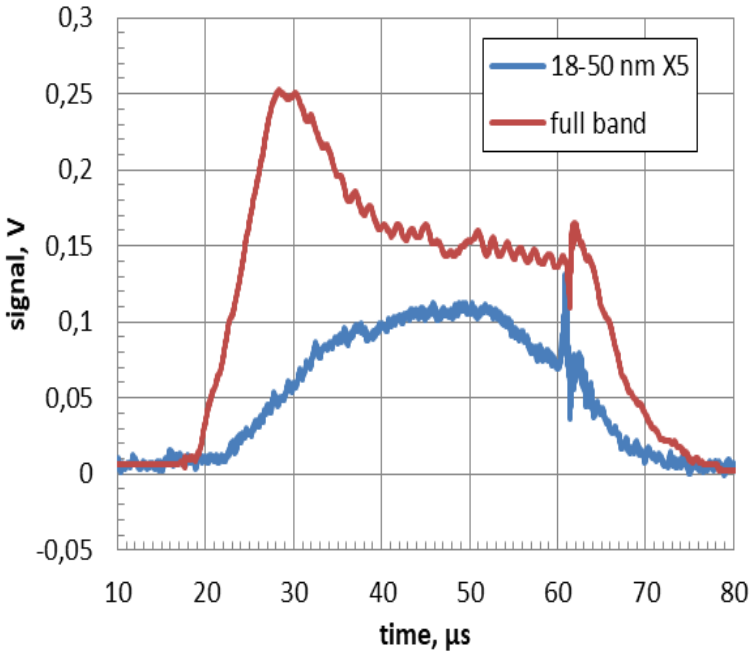
Большая часть излучения лежит в диапазоне экстремального ультрафиолета

300 Вт в диапазоне 18-50 нм!

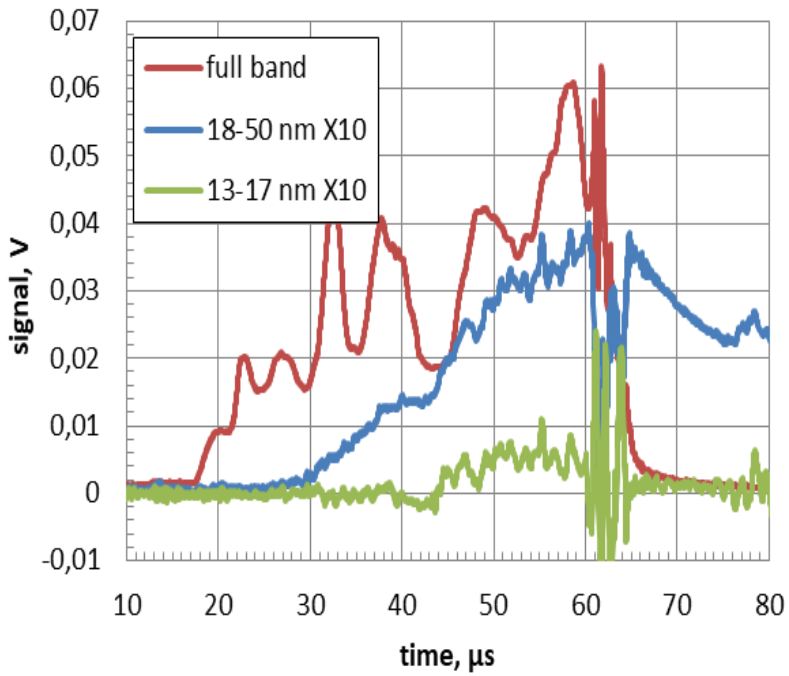
Точечный источник ВУФ и ЭУФ 200 кВт @ 0.25 ТГц, 50 мкс

Ксенон

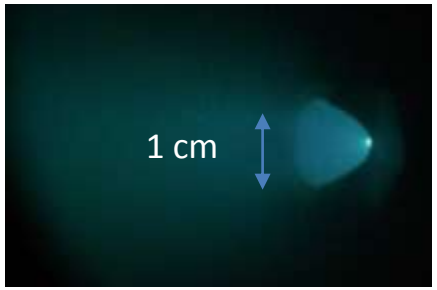
Мощность излучения в диапазоне 18-50 nm **20** Вт



Мощность излучения в диапазоне 13-17 нм **1.5** Вт



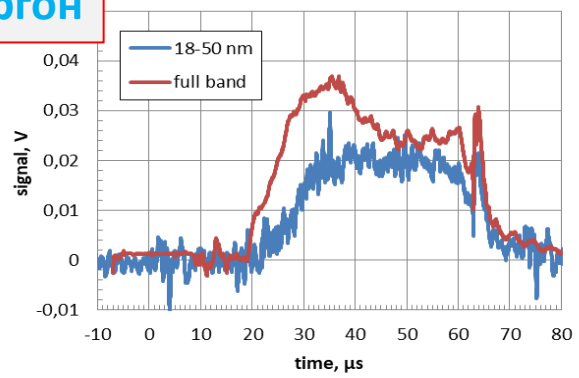
Давление над соплом 0,6 атм.

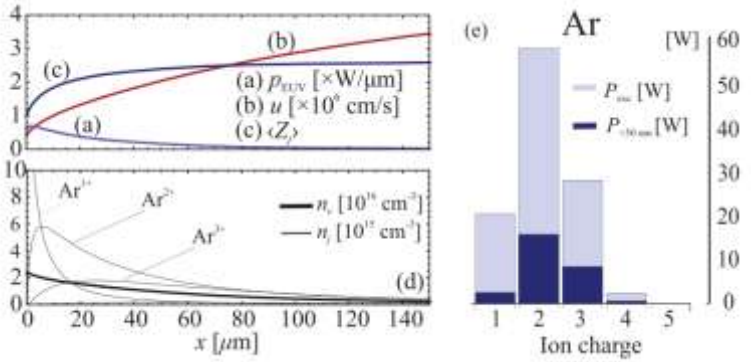


Давление над соплом 0,4 атм.

Точечный источник ВУФ и ЭУФ 200 кВт @ 0.25 ТГц, 50 мкс

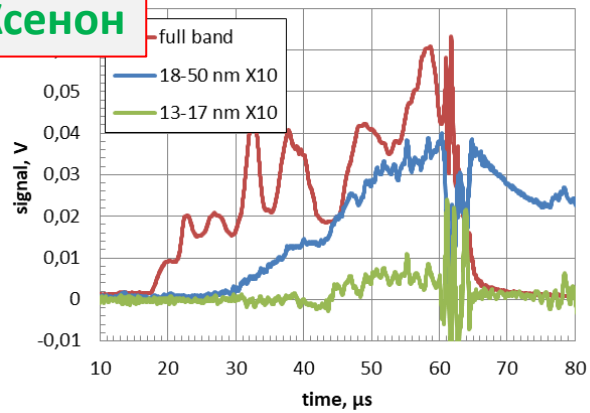
Аргон

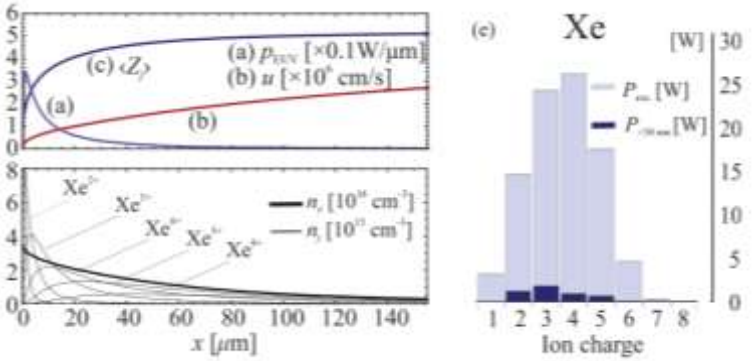




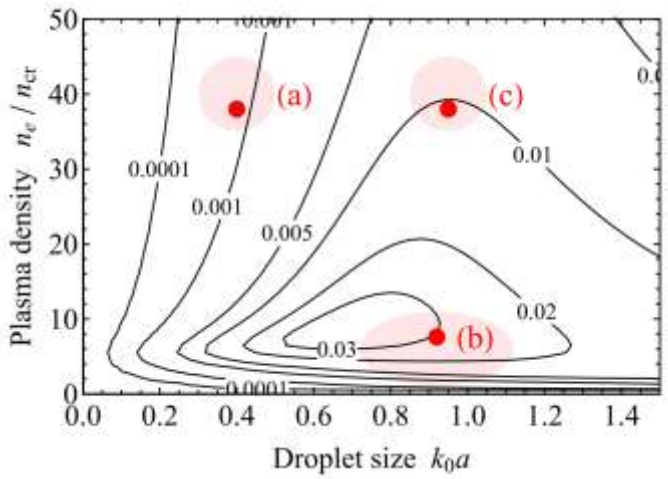
Большая часть излучения лежит в ЭУФ диапазоне. **300 Вт** в диапазоне 18-50 нм!

Ксенон



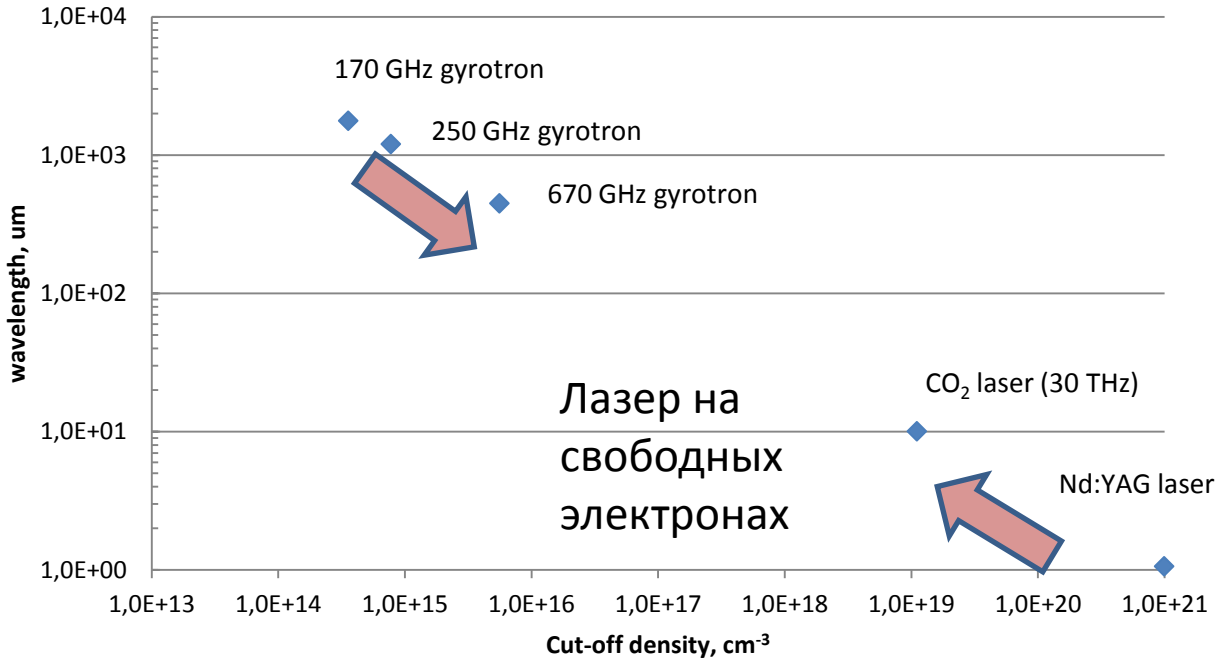


Мощность излучения в диапазоне 13-17 нм ≈ **1 Вт**



Shalashov A., et al // Applied Physics Letters, 113, 153502

Источники излучения для нагрева плазмы



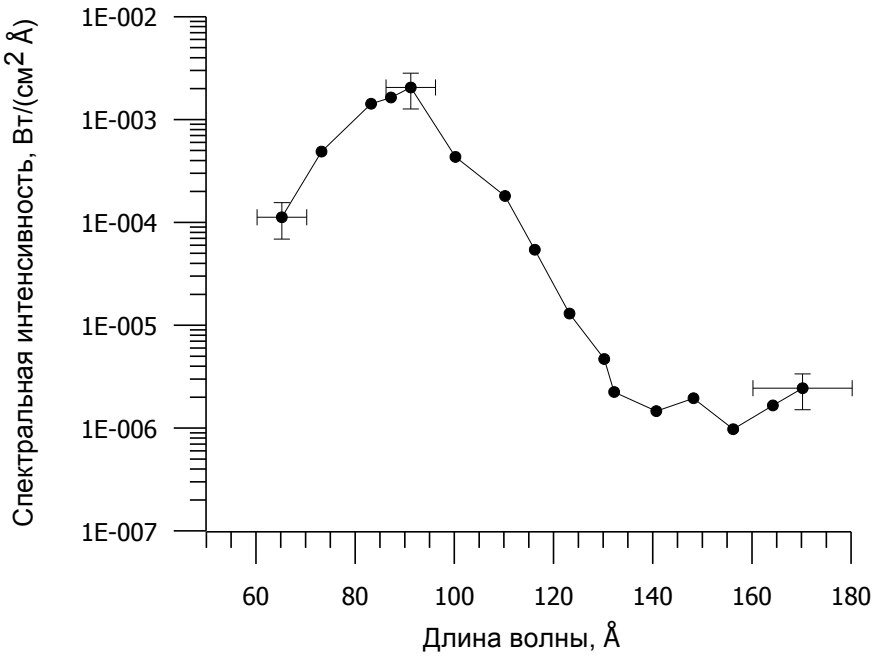
	pulse power, kW	mean power, kW	focusing
Nd:YAG laser	>1e5	> 20	< 100 um
CO2 laser	>1e5	> 20	< 100 um
670 GHz gyrotron	40	~ 0	900 um
250 GHz gyrotron	1(200)	1(20)	2400 um
170 GHz gyrotron	2000	2000	3500 um

Выводы

- Продемонстрирован точечный разряд в неоднородном потоке газа, поддерживаемый мощным терагерцовым излучением гиротрона
- Такой разряд может являться эффективным точечным источником вакуумного ультрафиолетового излучения (10 кВт , 112-180 нм, аргон) или точечным источником экстремального ультрафиолета (300 Вт в диапазоне 18-50 нм, ~ 1 Вт , 12-17 нм).
- Повышение эффективности может быть достигнуто удлинением греющего импульса, предионизацией газа, повышением мощности и частоты греющего поля
- Развитая концепция позволит продвинуться в перспективную более коротковолновую область (11.2 нм, 6.7 нм)

Излучение плазмы ЭЦР разряда

SMIS 37: **Argon**, $p \approx 2 \cdot 10^{-4}$ Torr, P_{MW} = 130 kW @ 37GHz, B = 2.3 T



Диапазон длин волн:
$\Delta\lambda \approx$ **70 – 110 Å**,
Максимальная спектральная светимость:
$\lambda \approx$ **90 Å**, W_λ **= 730 Вт/ Å**

Интеграл по интервалу $\Delta\lambda$ = 70 – 110 Å

$I \approx 1$ W/cm².

⇓

$W_{EUV} = 4\pi r^2 \cdot I \approx$ **16 kW**

⇓

$\eta = W_{EUV} / P_{MW} \approx$ **0.12**

Светимость плазмы

16 kW / 450 cm³ ≈ **35 W/cm³**.

S.V. Golubev et al. J. of X-ray Sci. & Tech., **6**, 244.
A.V. Vodopyanov et al. Tech. Phys. Lett., **26**,1075.