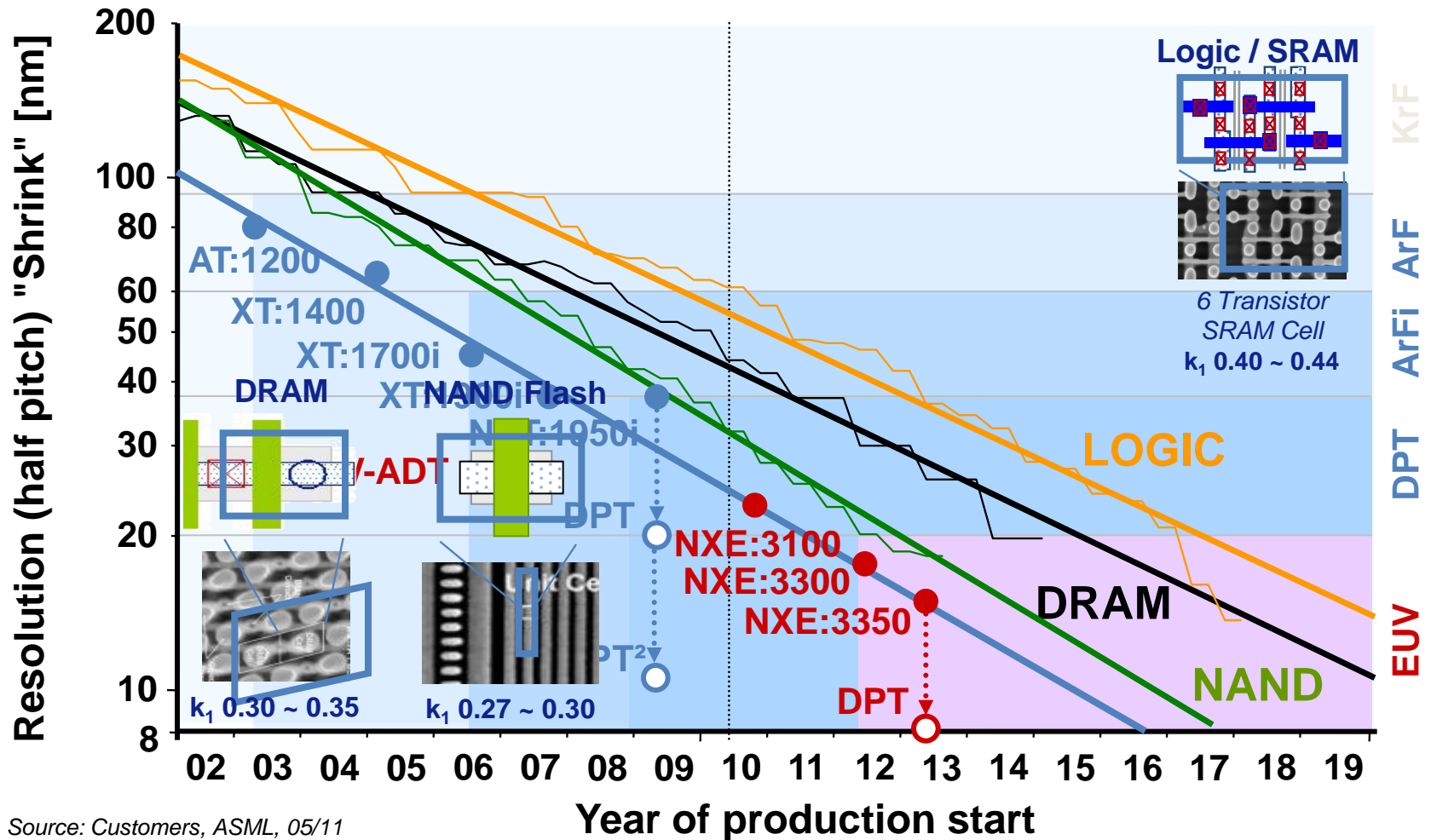


«Источники излучения для следующего поколения ВУФ литографии»

К.Кошелев
Институт спектроскопии РАН



IC & Lithography roadmap



Source: Customers, ASML, 05/11

NXE:3100 is the 1st generation of the NXE platform



- NA=0.25
- Sigma=0.8
- Resolution 27 nm
- SMO=4.5 nm
- MMO=7.0 nm
- Productivity
60wph at
10mJ/cm² resist

Требования к источнику EUV

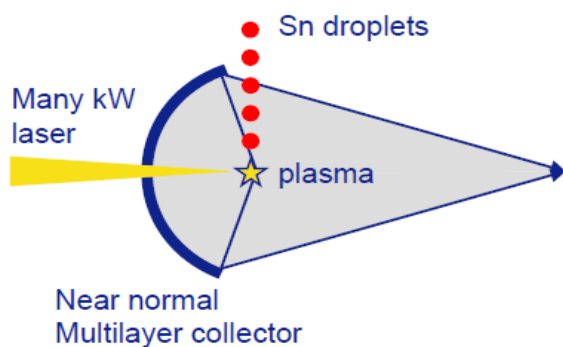
•Длина волны	13.5 [nm]
•Мощность (в 2% спектр.полосе)	>180 [вт] (до 500 вт)
•Частота повторения	до 50 кГц
•Размер источника	не превышает 1 мм ³

•Integrated Energy Stability	±0.3%, 3σ за 50 импульсов
•Source Cleanliness (defined as collector lifetime to 10% reflection loss reflection loss)	≥ 30,000 часов
•Spectral Purity:	
130-400 [nm] (DUV/UV)	≤ 7%
IR	TBD

В настоящее время рассматриваются два основных способа создания ЭУФ источников для промышленной проекционной литографии:

Плазма, создаваемая при
фокусировке лазерного излучения на
мишень

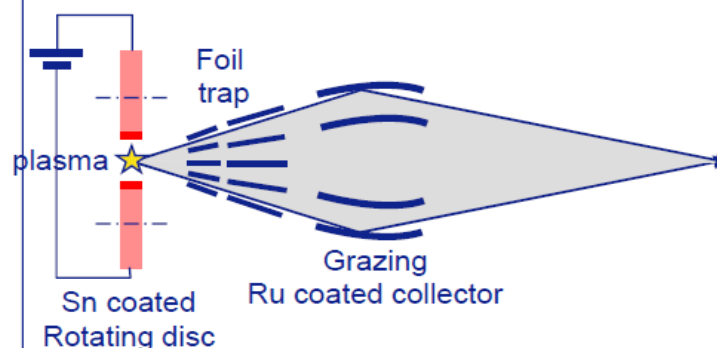
• Laser-Produced Plasma source



- CO2 laser
- Sn droplet target
- Debris mitigation using background gas and/or magnetic fields
- Near normal multilayer collector
- Pursued by: Gigaphoton, Cymer

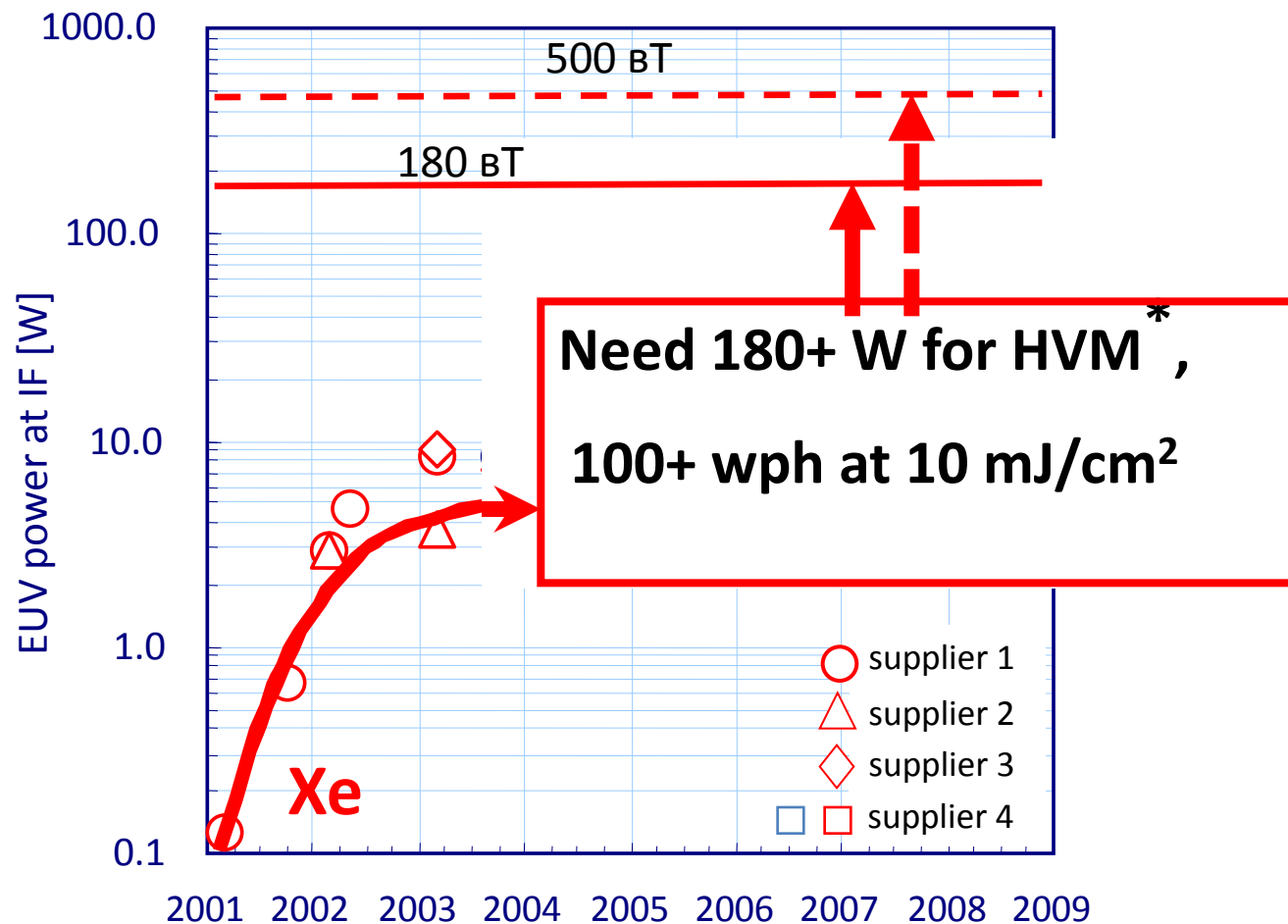
Плазма электрических разрядов
(Z – пинч)

• Discharge Produced Plasma source



- Direct conversion electricity => plasma
- Sn liquid
- Debris mitigation by set of foils
- Grazing incident collector
- Pursued by Ushio

Прогресс в увеличении EUV мощности ксеноновых источников

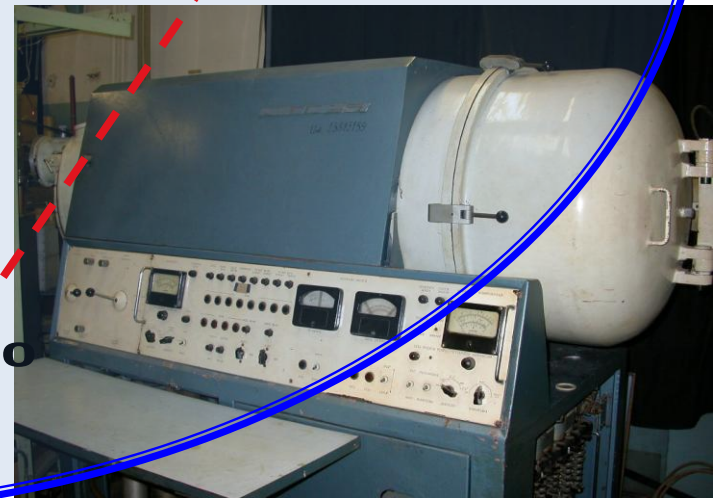
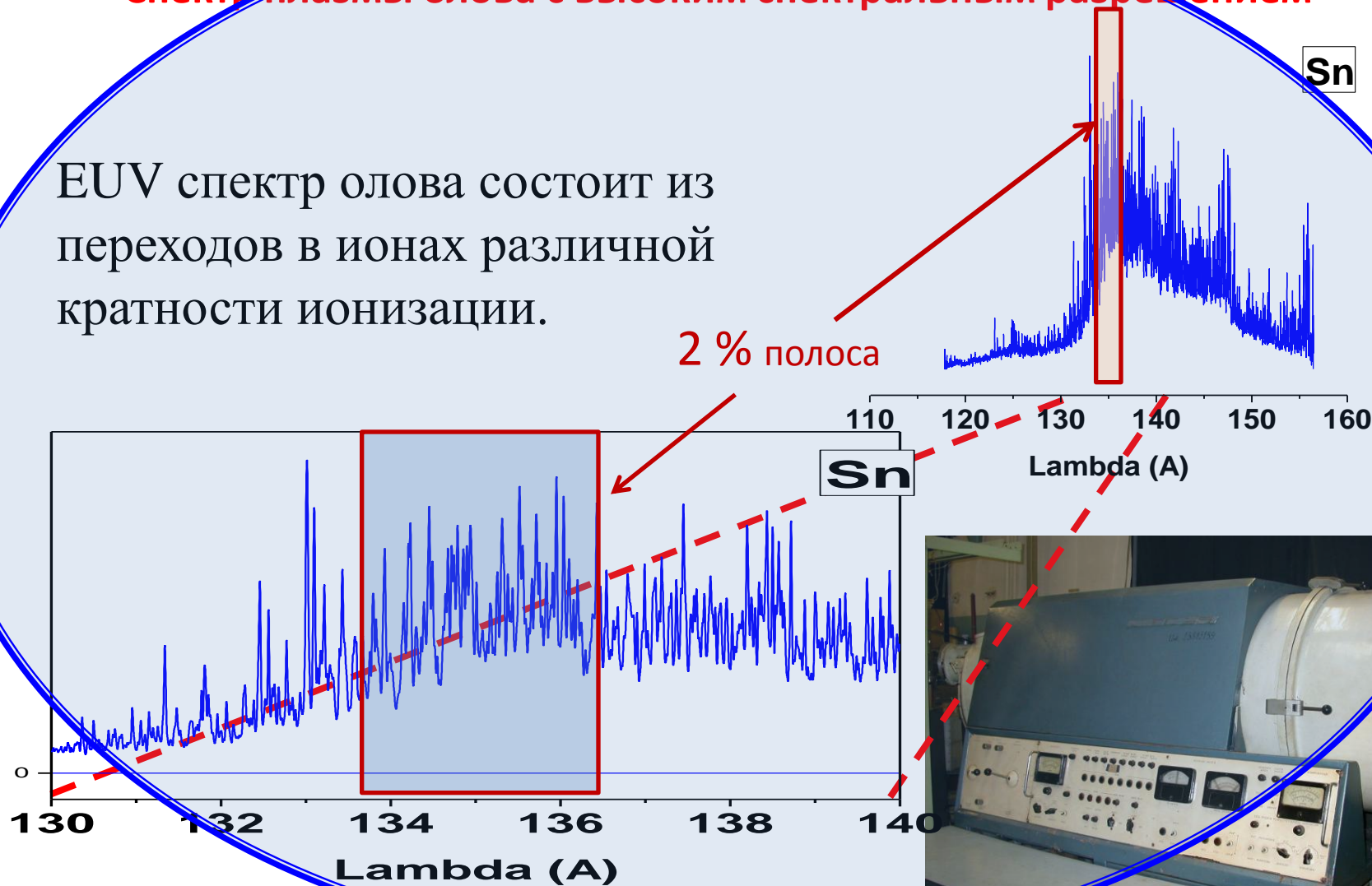


*** - HVM – High Volume Production**

ВУФ спектроскопия многозарядных ионов:

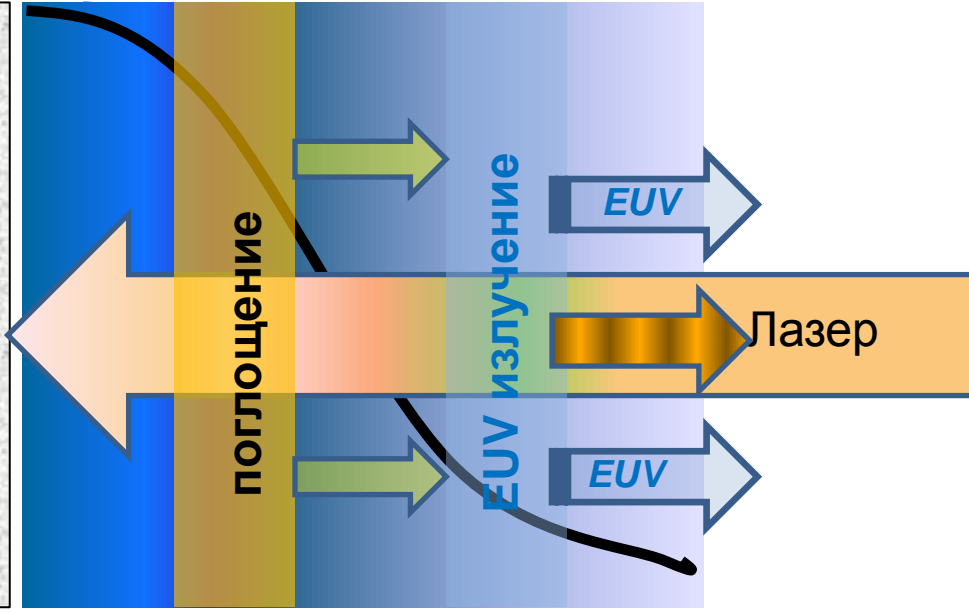
Спектр плазмы олова с высоким спектральным разрешением

EUUV спектр олова состоит из переходов в ионах различной кратности ионизации.



плотность

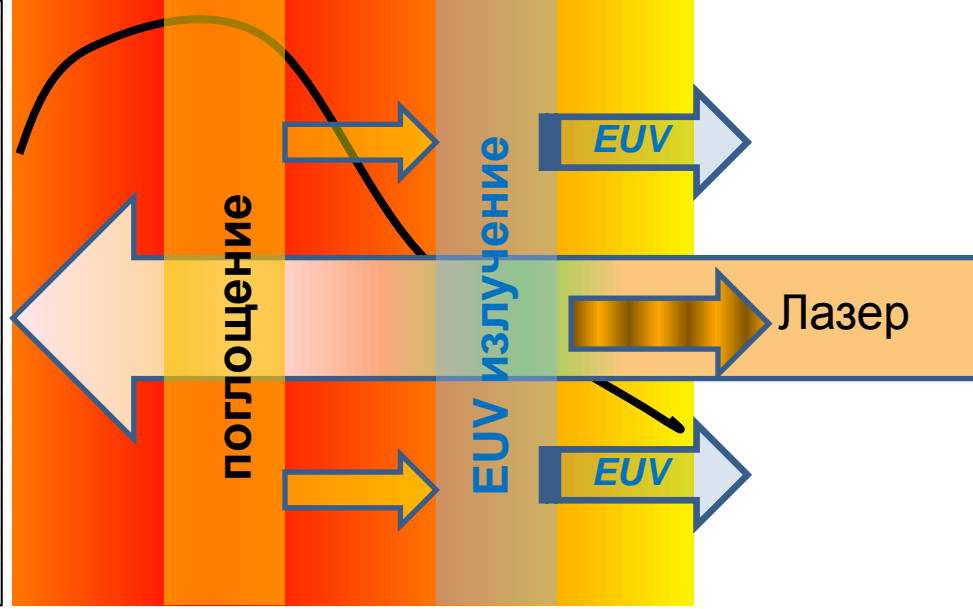
Мишень - олово



Плазма, создаваемая
при фокусировке
лазерного излучения
на мишень

температура

Мишень - олово



Plasma density distribution along laser beam for Nd laser, 1.06 μm

Nd

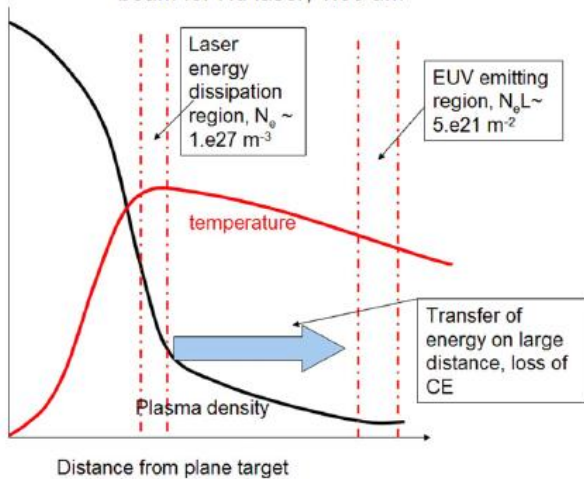
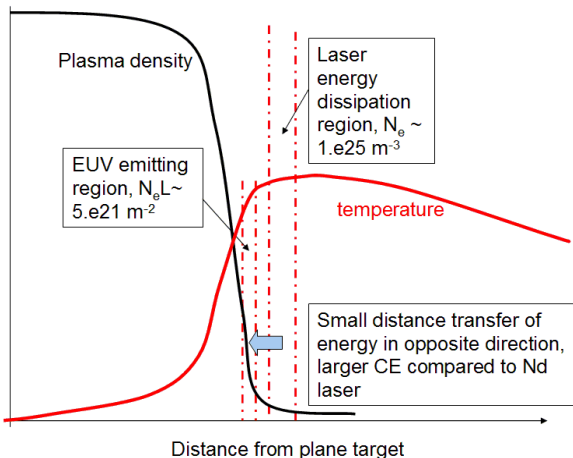


Figure 10. Plasma density distribution along the laser beam for 1.06 μm laser radiation of Nd-Yag laser.

Plasma density distribution along laser beam for CO_2 laser, 10.6 μm

CO₂



Выбор лазерной системы для нагрева плазмы и генерации EUV излучения определяется, в частности, эффективностью процесса переноса энергии из области поглощения лазерной энергии в область, из которой EUV фотоны покидают плазму

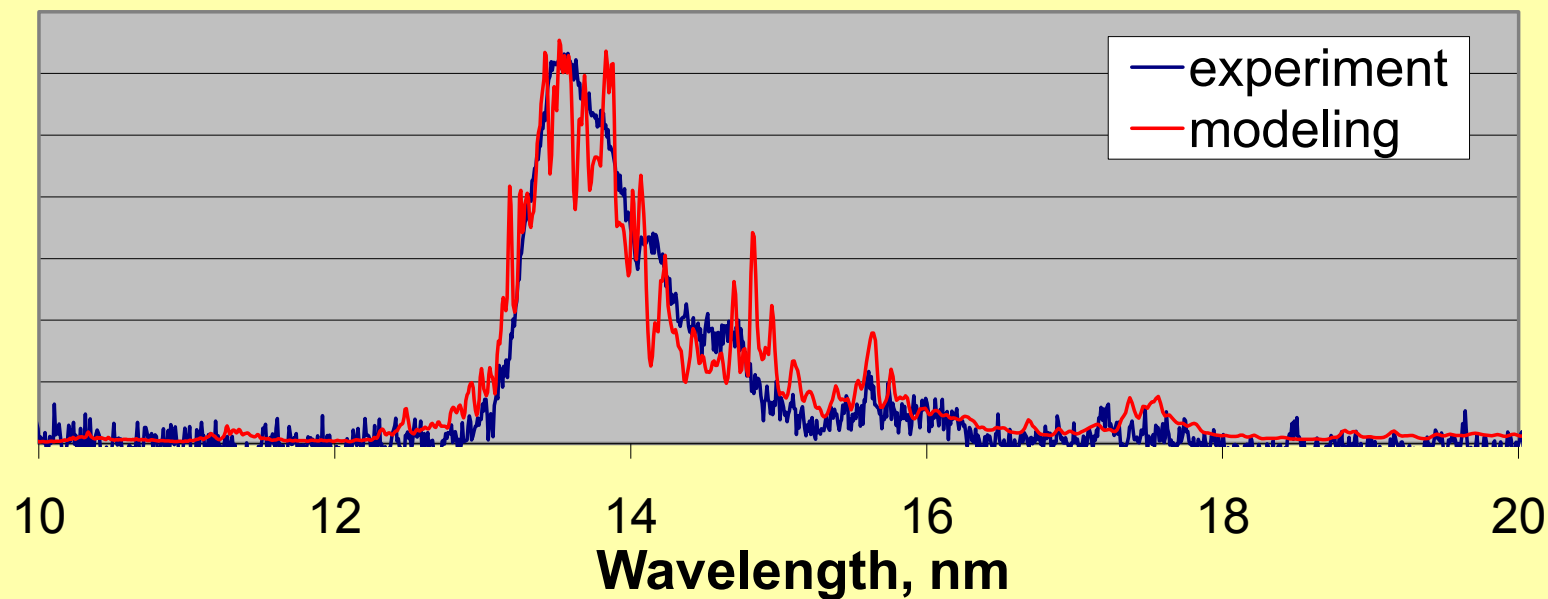
Комплекс программ для численного моделирования *RZLINE – THERMOS - BELINE (R-T-B)*



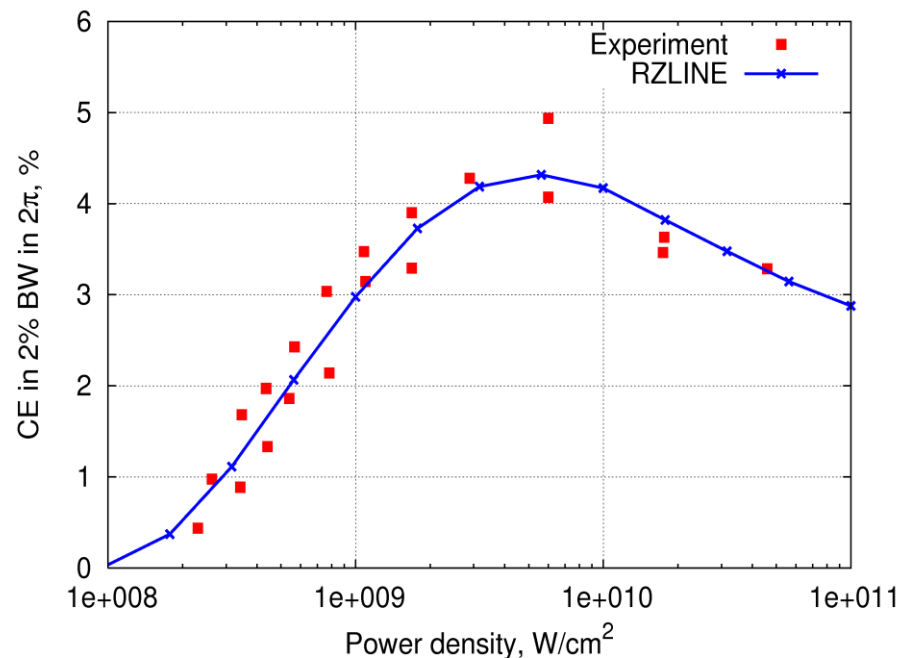
Совместно с ИПМ им М.В.Келдыша



Experimental and calculated spectra of Sn flat target EUV source at
0.36 J



Коэффициент преобразования излучения CO₂ лазера в EUV фотоны в узкой спектральной полосе 2 % для плоской мишени.



Плоская мишень не рассматривалась в практическом смысле из-за трудностей сбора излучения (обскурация) и высоких тепловых нагрузок и большого количества разбрызгиваемого олова.

Капельная мишень – mass limited approach.

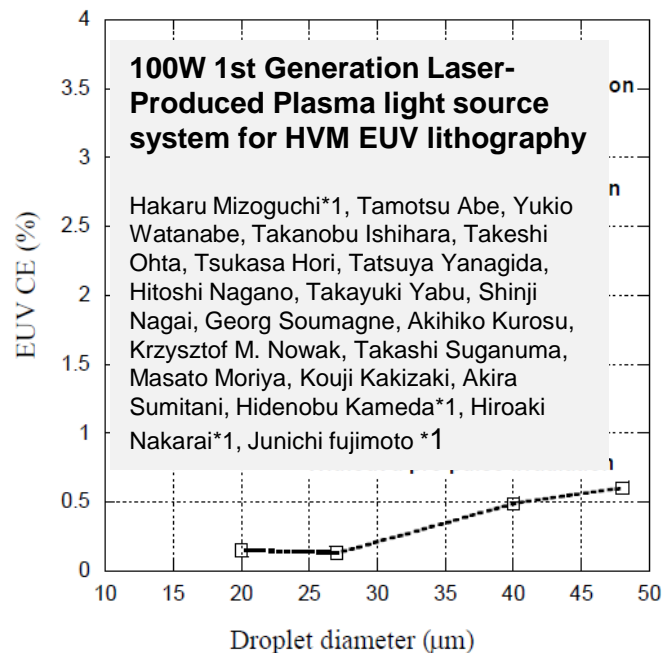
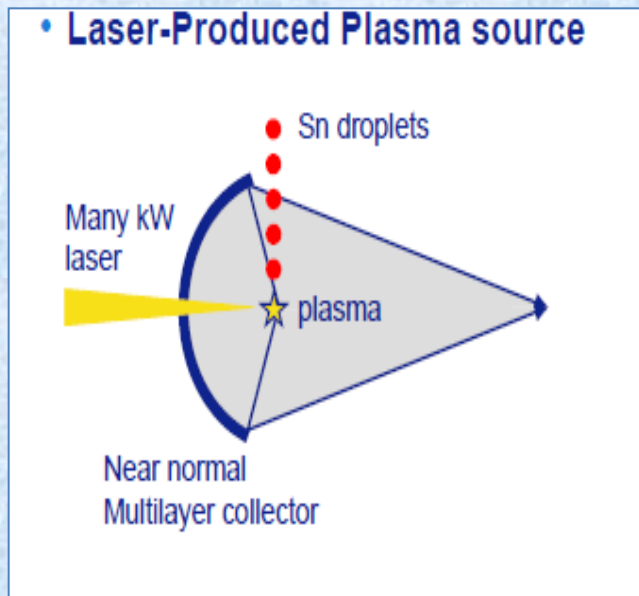


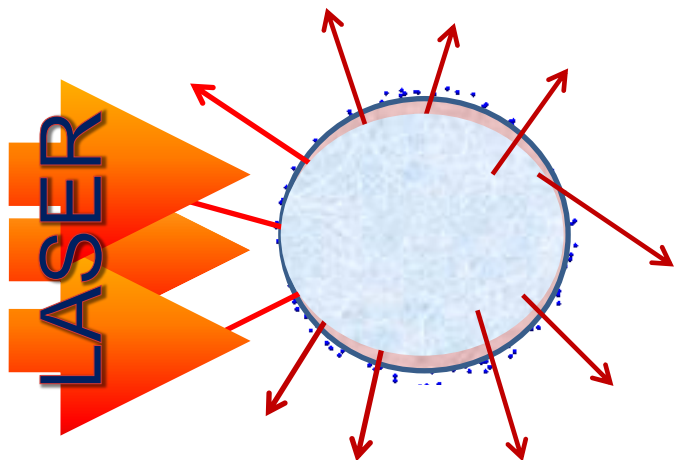
Figure 7. EUV CE as a function of the droplet diameter

Коэффициент преобразования для капельной мишени оказался очень маленьким (0,5 – 1 %).

Причины: 1) сильное отражение ИК; 2) малый размер мишени по сравнению с размером каустики лазерного пучка.

Большое отражение ИК может быть фатальным для литографического процесса

Идеальная мишень (I)

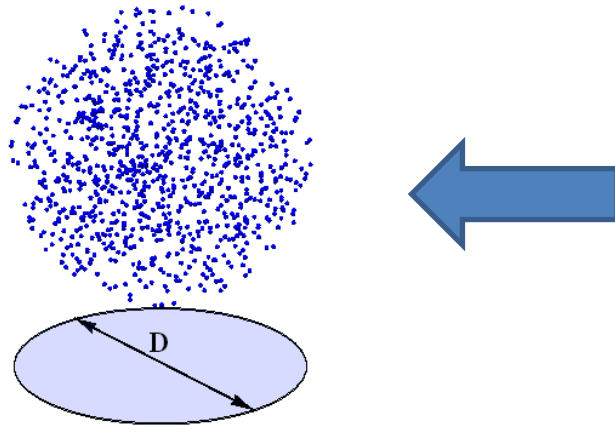


- Облако паров олова с плотностью вблизи/ ниже «критической» чтобы избежать отражения ИК излучения.
- размер – несколько сотен микрометров – соответствует требованиям оптической системы и достаточен для полного поглощения лазерного излучения

Ожидается высокий СЕ;
Низкий уровень рассеянного ИК;
«правильный» размер;

• очень короткое время жизни – при скорости разлета плазмы 5×10^6 см/с и характерном размере $D = 3 \times 10^{-2}$ см – время жизни – несколько наносекунд

Идеальная мишень – распределенная мишень



Состоит из большого числа микрокапель с размером 1 – 3 мкм, которые постепенно испаряясь поддерживают существование плазменной мишени в течении всего лазерного импульса.

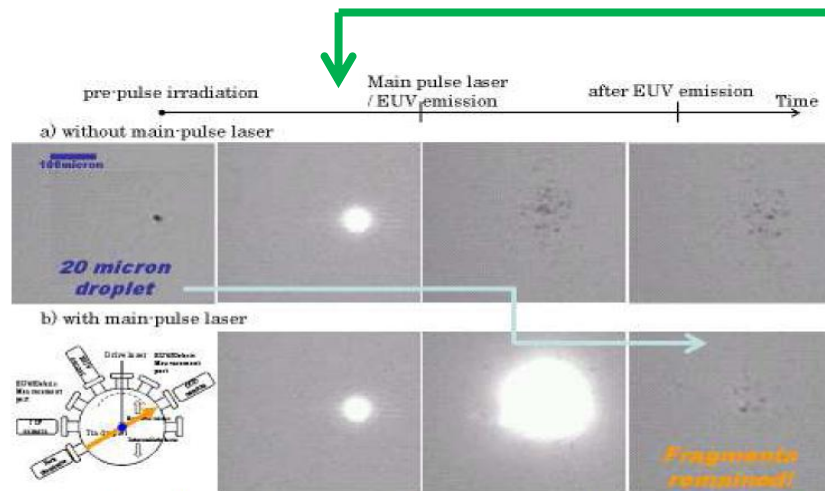
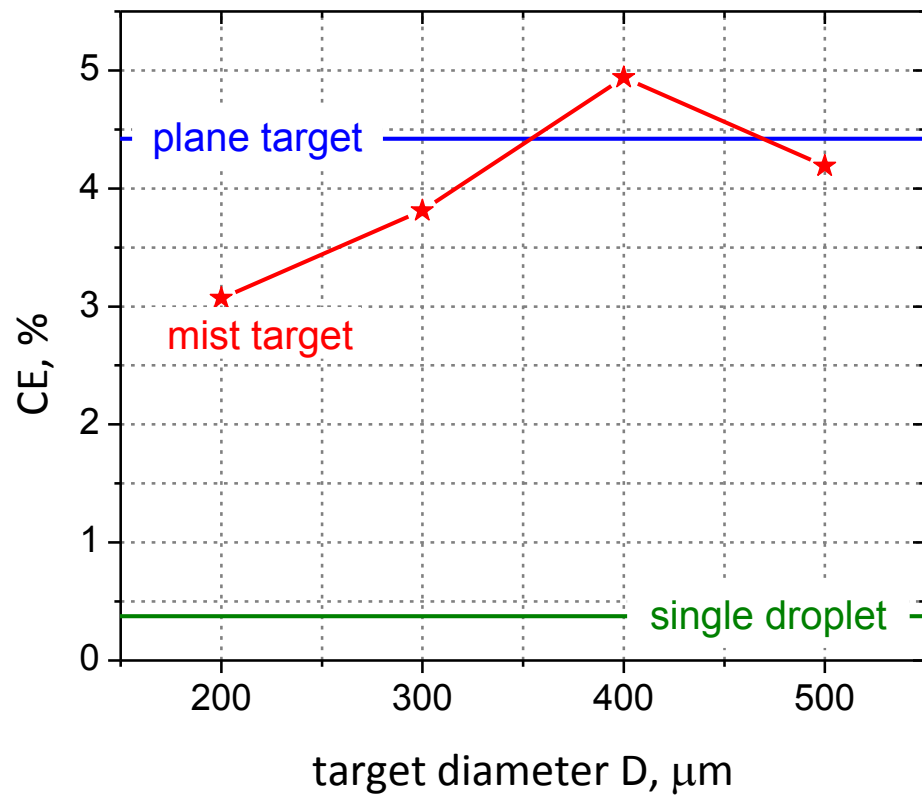


Figure 5. Shadowgraph images of the Sn fragments I (a proper condition)

Лазерный «пред-импульс» разбивает каплю олова на микрокапли

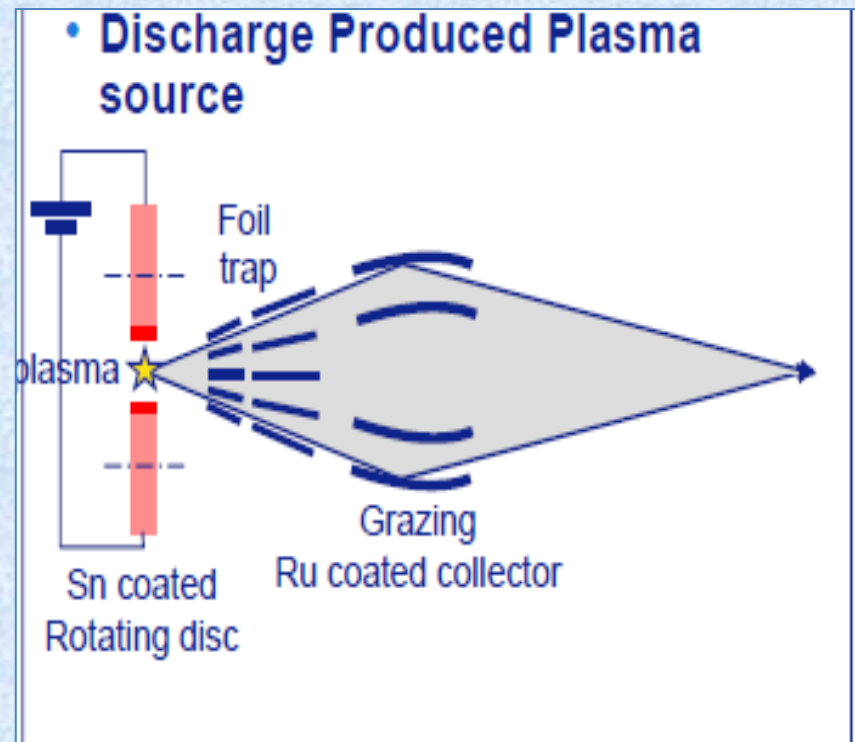
Основной лазерный импульс создает плазму, излучающую EUV



Плазма, создаваемая при фокусировке лазерного излучения на мишень

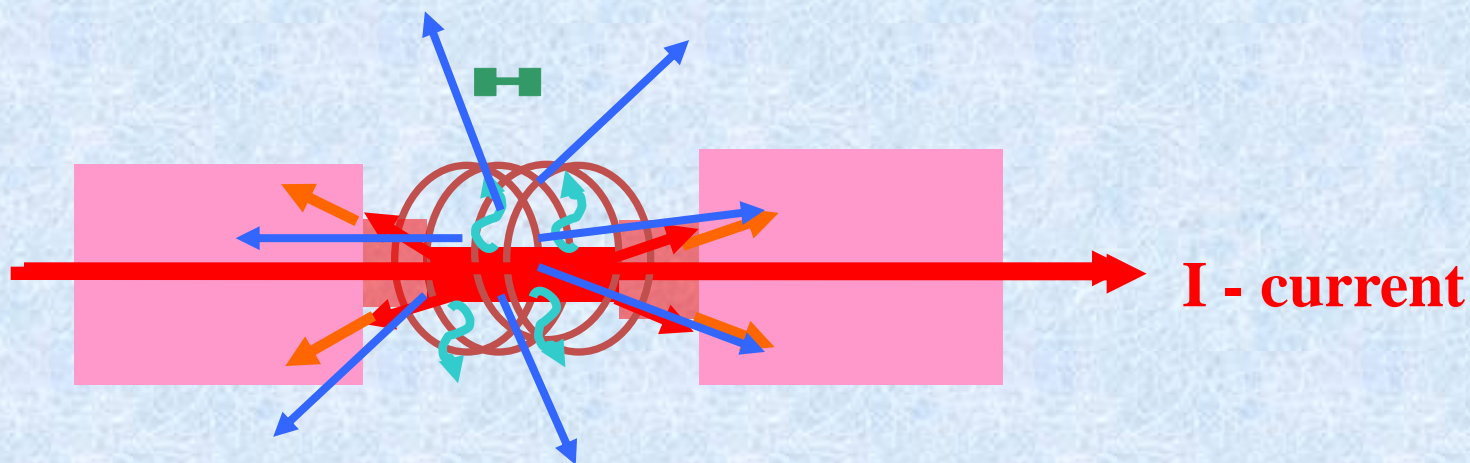
- * Большие надежды, напряженная работа сотен (если не тысяч) людей;
- Остаются проблемы с рассеянным (отраженным) ИК излучением
- Еще один порядок по мощности EUV

Разрядная плазма, как источник EUV излучения



Развитие «микропинчей» в режиме радиационного сжатия

В аксиально-симметричных разрядах с энергией 1 – 10 Дж излучение EUV происходит в момент развития перетяжечной неустойчивости в столбе разряда.



Развитие микропинчей в режиме радиационного сжатия

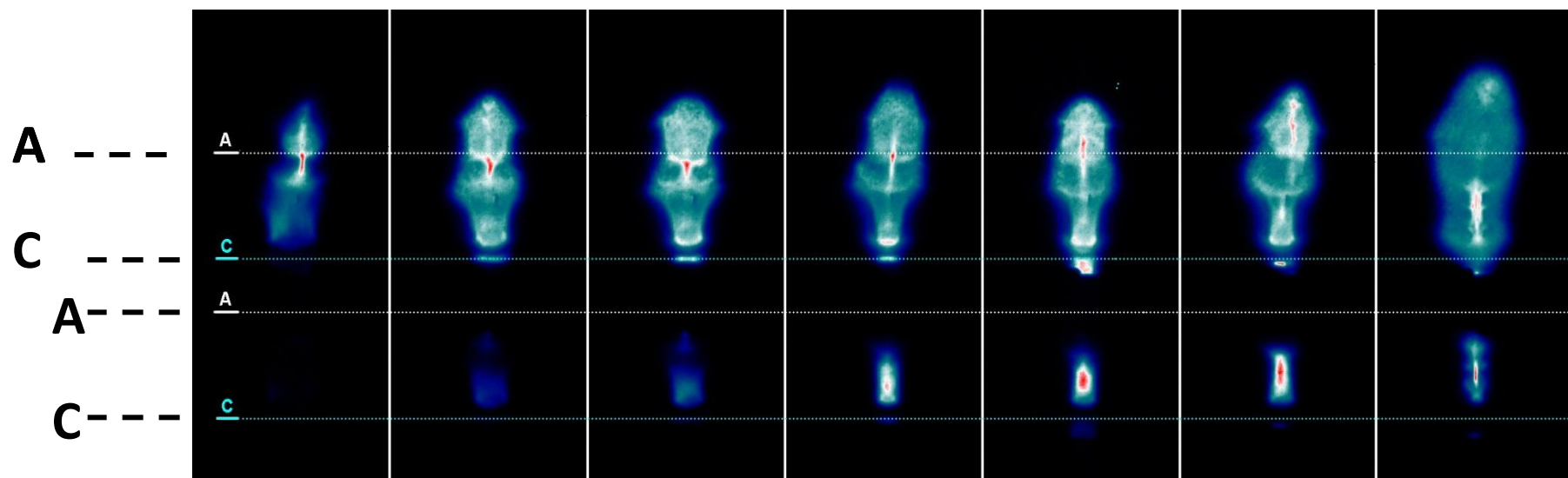
Наблюдение образования перетяжек – микропинчей в аксиально – симметричном разряде в парах олова.

А – анод: С – катод:

верхнее изображение – VUV (1 – 100 nm)

Нижнее изображение – EUV (10 – 20 nm) – Zr/Si фильтр

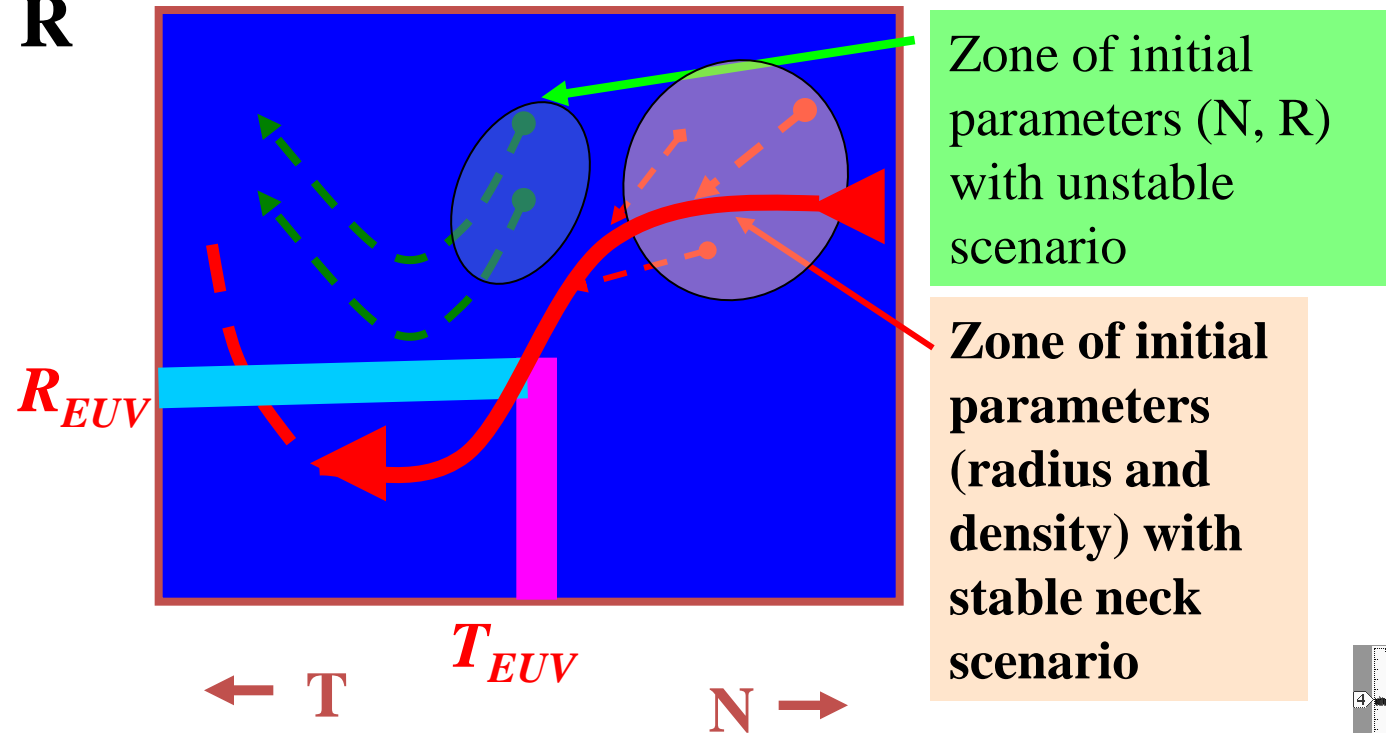
Время экспозиции – 10 нсек: время между кадрами – 10 нсек.



Развитие микропинчей в режиме радиационного сжатия

«Устойчивый» характер сценария развития перетяжечной неустойчивости

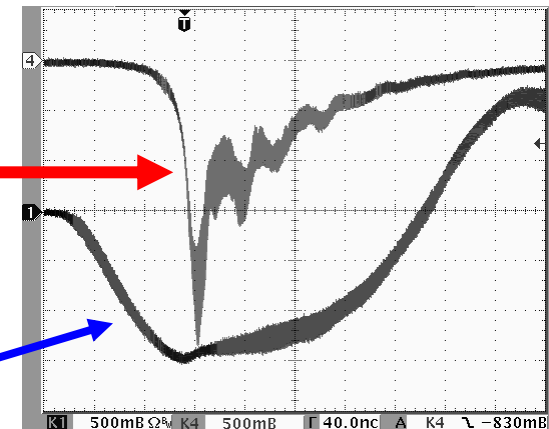
R



Наложенные друг на друга EUV сигналы
256 последовательных разрядов
демонстрируют хорошую
повторяемость.

EUV

TOK

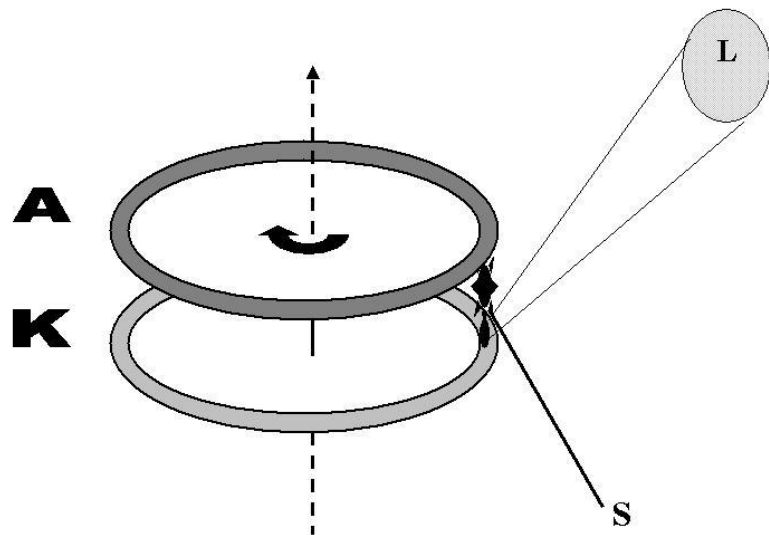


Разрядная плазма, как источник EUV излучения

Проблема : перегрев электродов

Решение – «мультиплицирование» разряда

МУЛЬТИПЛИЦИРОВАНИЕ ИСТОЧНИКА (I)



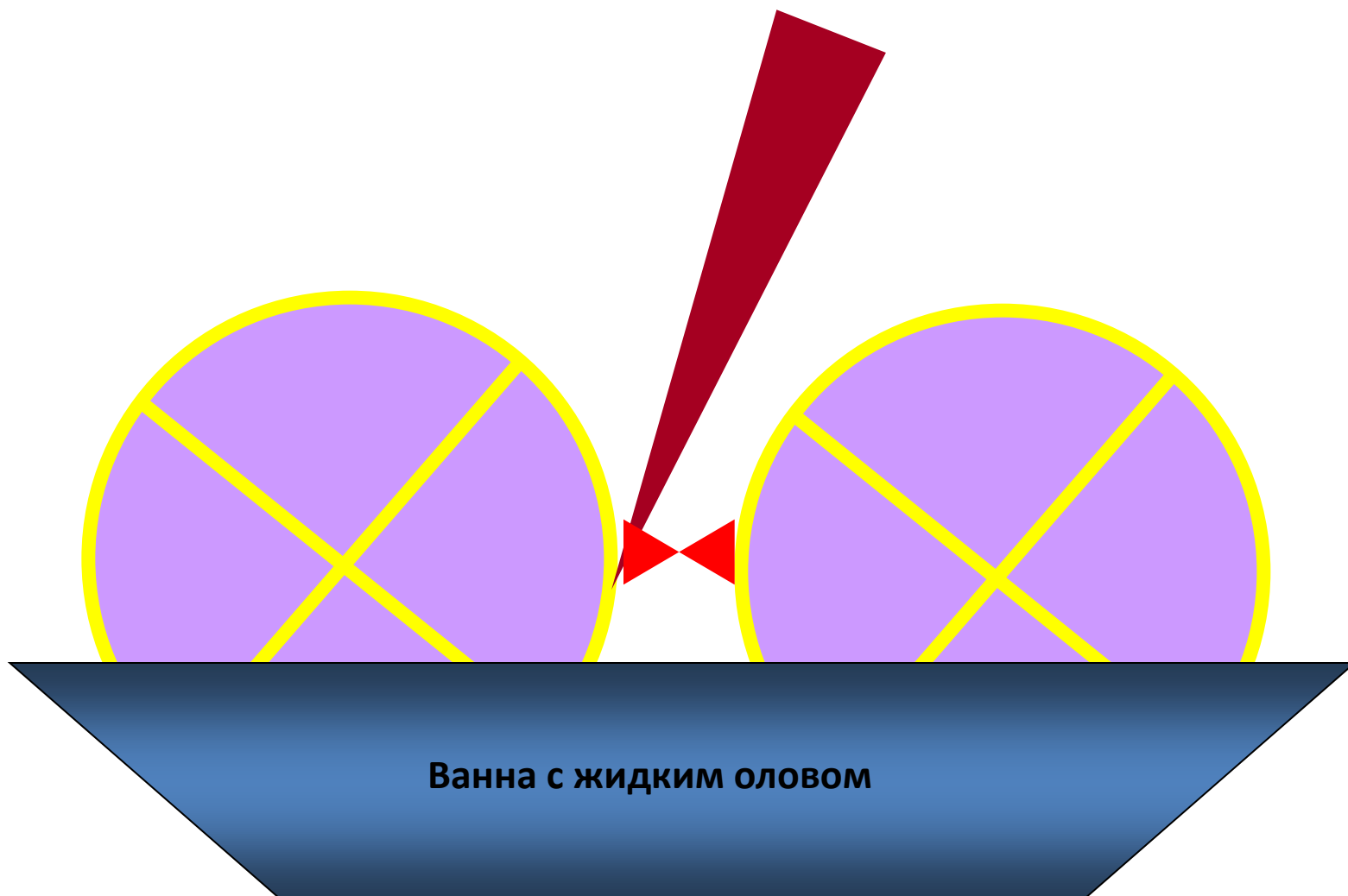
2004

Achieved:

- 2 % CE
 - **18 kW** (Continuous)
- 360 W in 2p in-band
(about 36 W IF)



МУЛЬТИПЛИЦИРОВАНИЕ ИСТОЧНИКА (II)

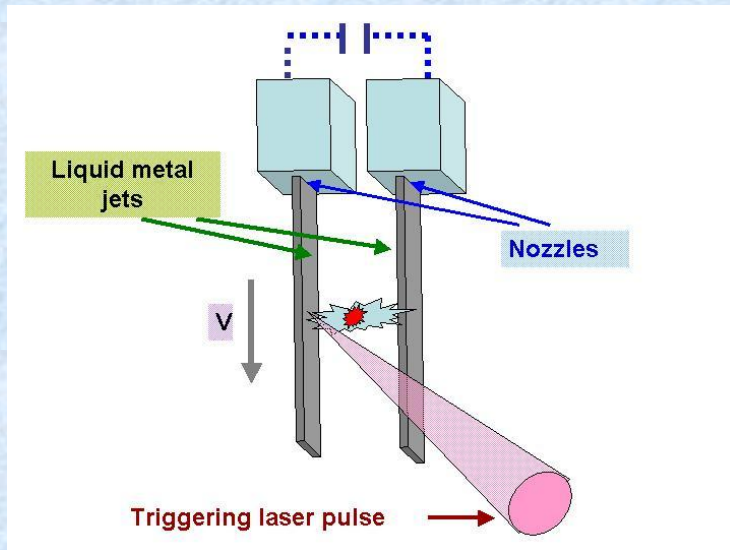


Разрядная плазма, как источник EUV излучения

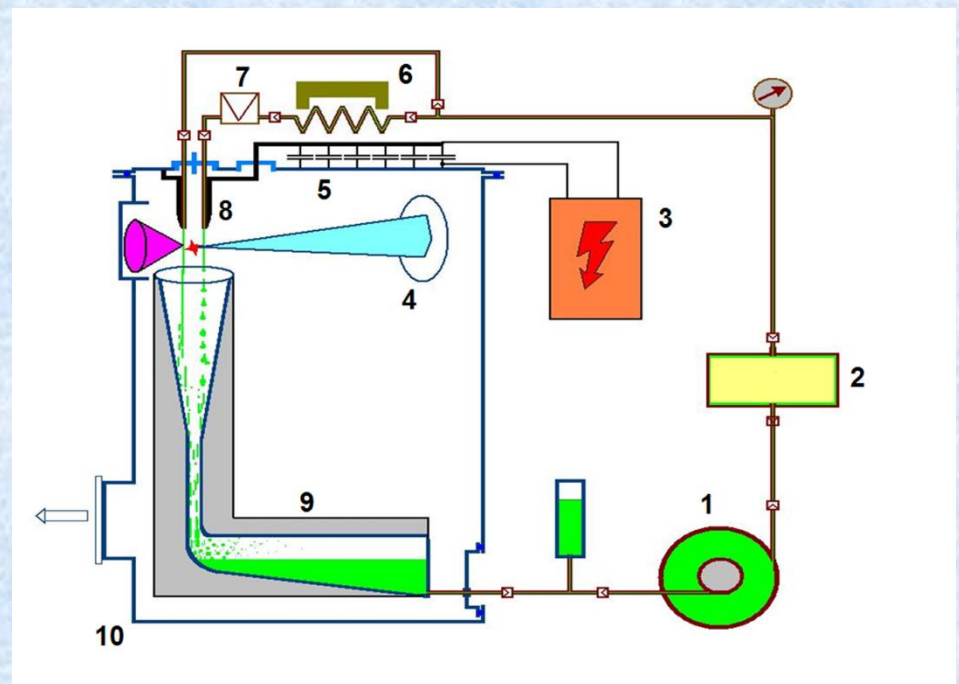
Реализованы схемы с «колесными» электродами, получены мощности, превышающие те, что достигнуты в «лазерных» схемах...

Ожидаются принципиальные ограничения в величине вкладываемых мощностей (не более 100 кВт), связанные с конечной допустимой скоростью вращения «колёс»-электродов в жидком олове.

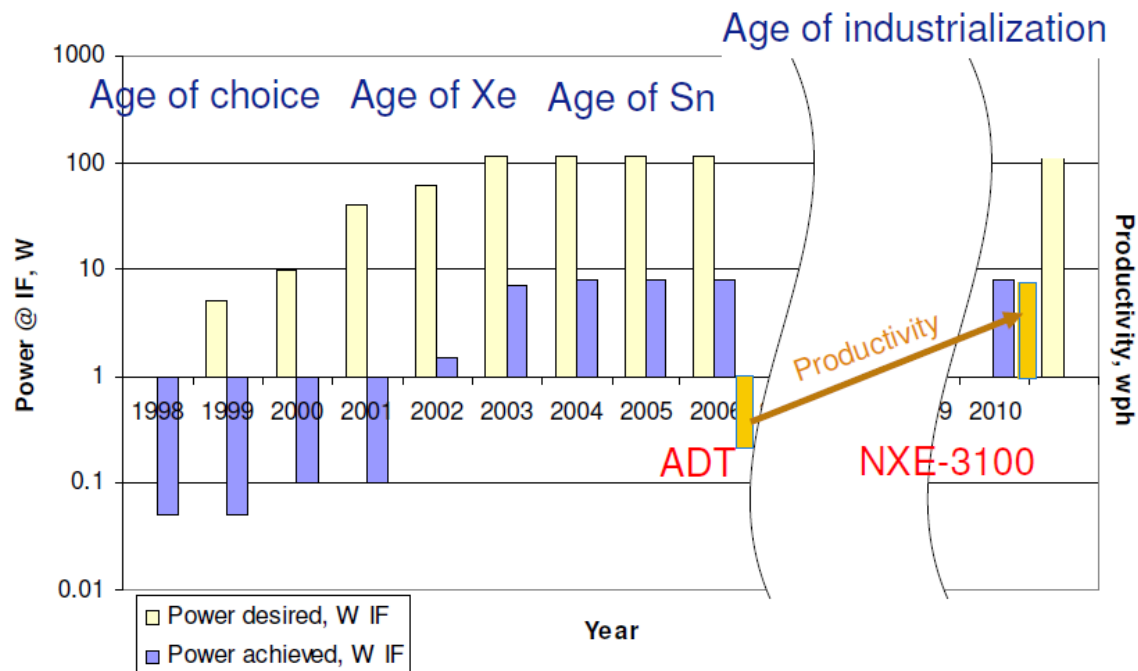
Разряд с использованием быстрых струй жидкого олова в качестве электродов



Скорость струй может достигать десятком метров в секунду, что позволяет поднять тепловую нагрузку до 200 - 250 кВт.



Historical perspective: Production power requirement, achieved power, productivity



Averaged and independent on supplier

Gap in productivity is being bridged,
in reliable power is still 10x to go.

Переход на длину волны 6,7 нм



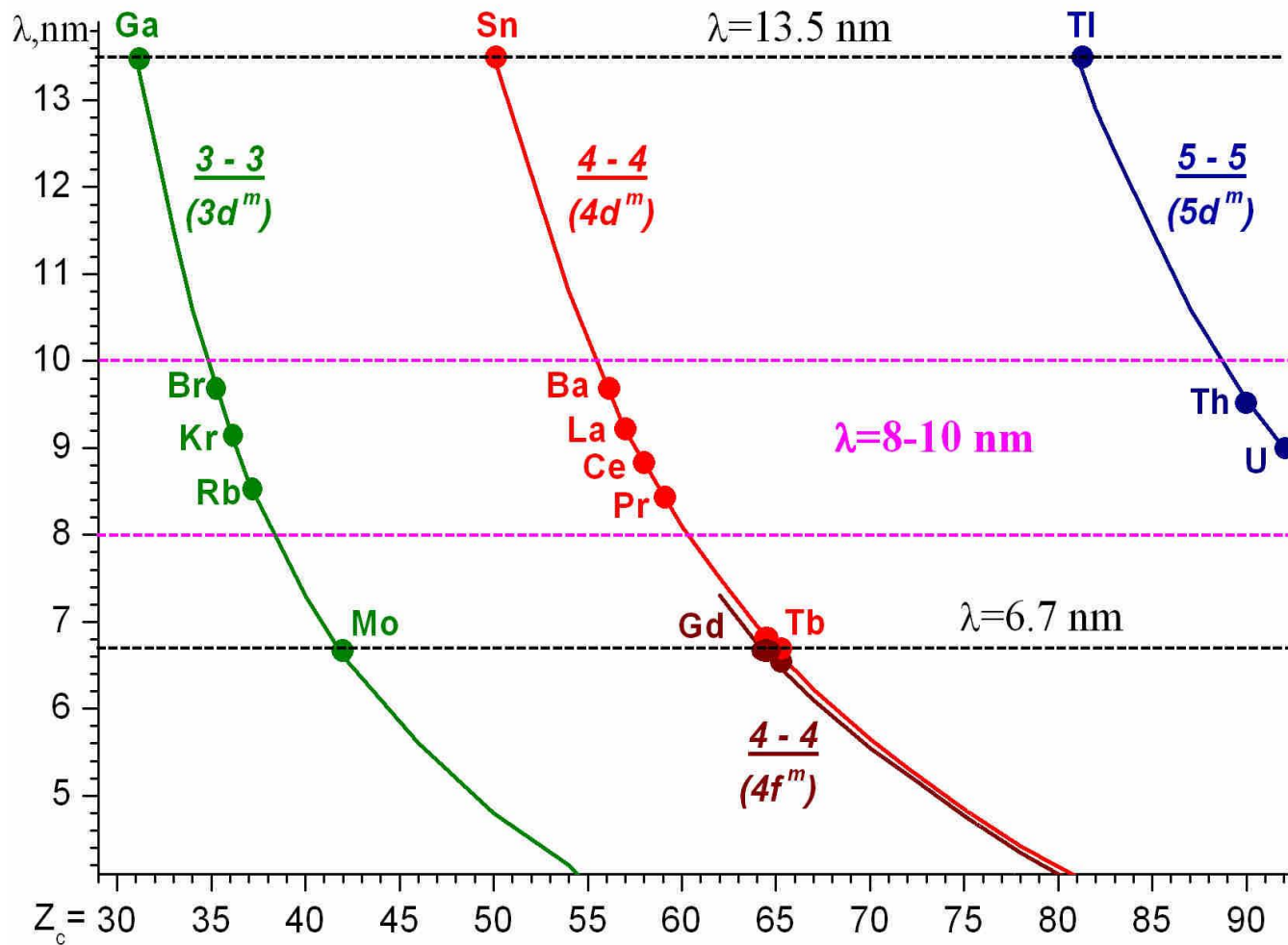
(Мотивации):

- Разрешение повышается вдвое: $\delta x \approx 8 \text{ нм} !!!$
- Для формирования и управления излучением оптимальны многослойные интерференционные зеркала на основе La/B.

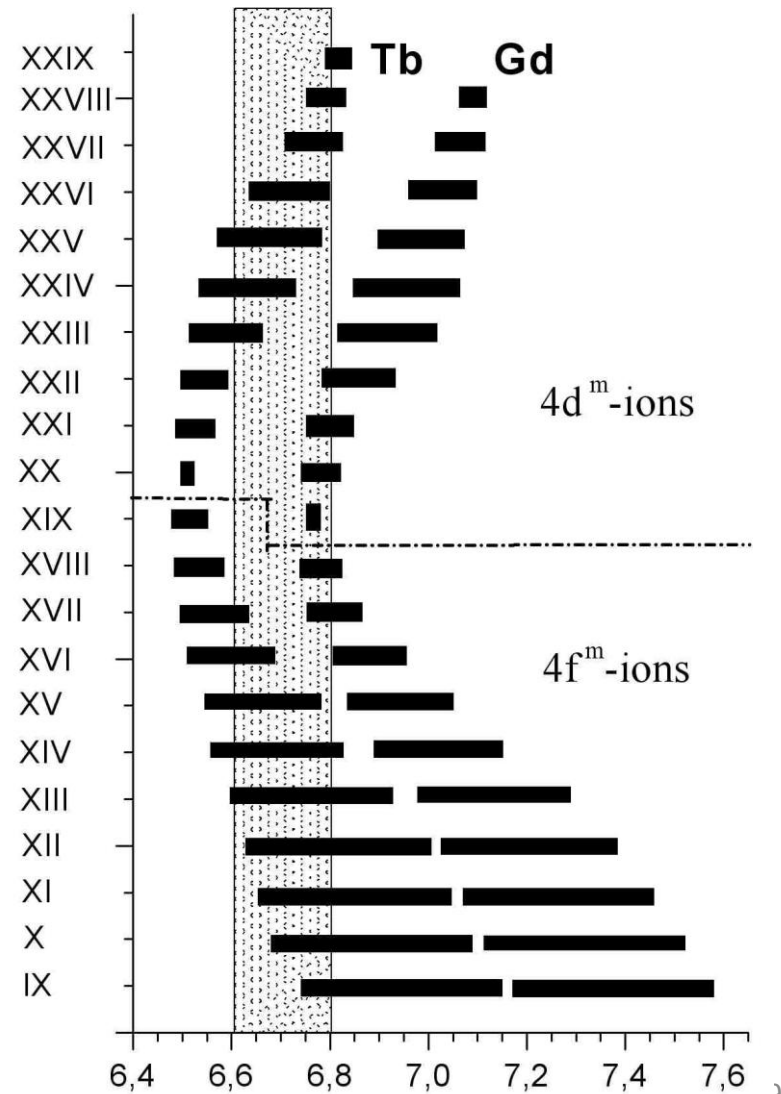
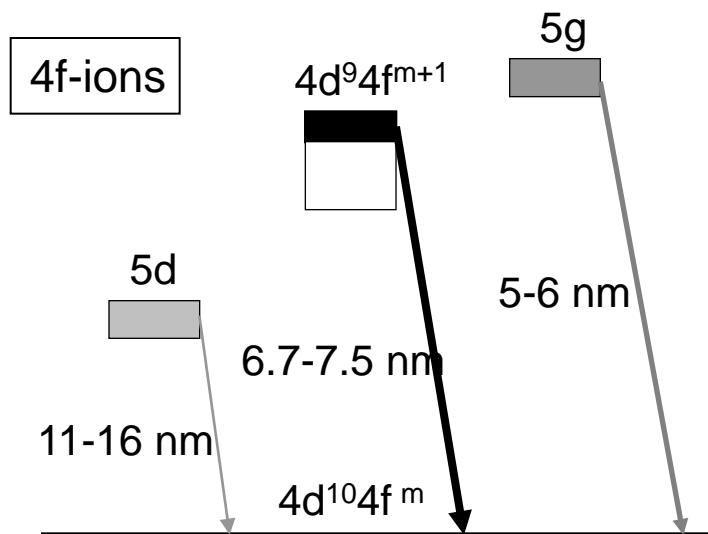
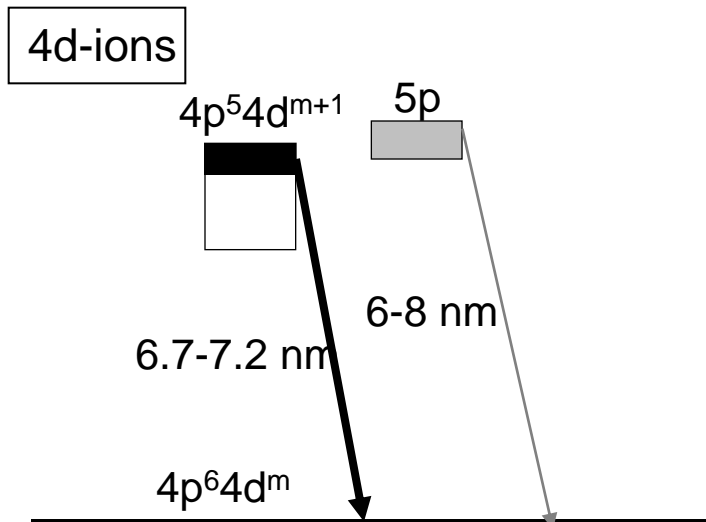
$$R_{\max}(\text{La/B})=80\%$$

- Возможно ли создание мощных источников излучения ?

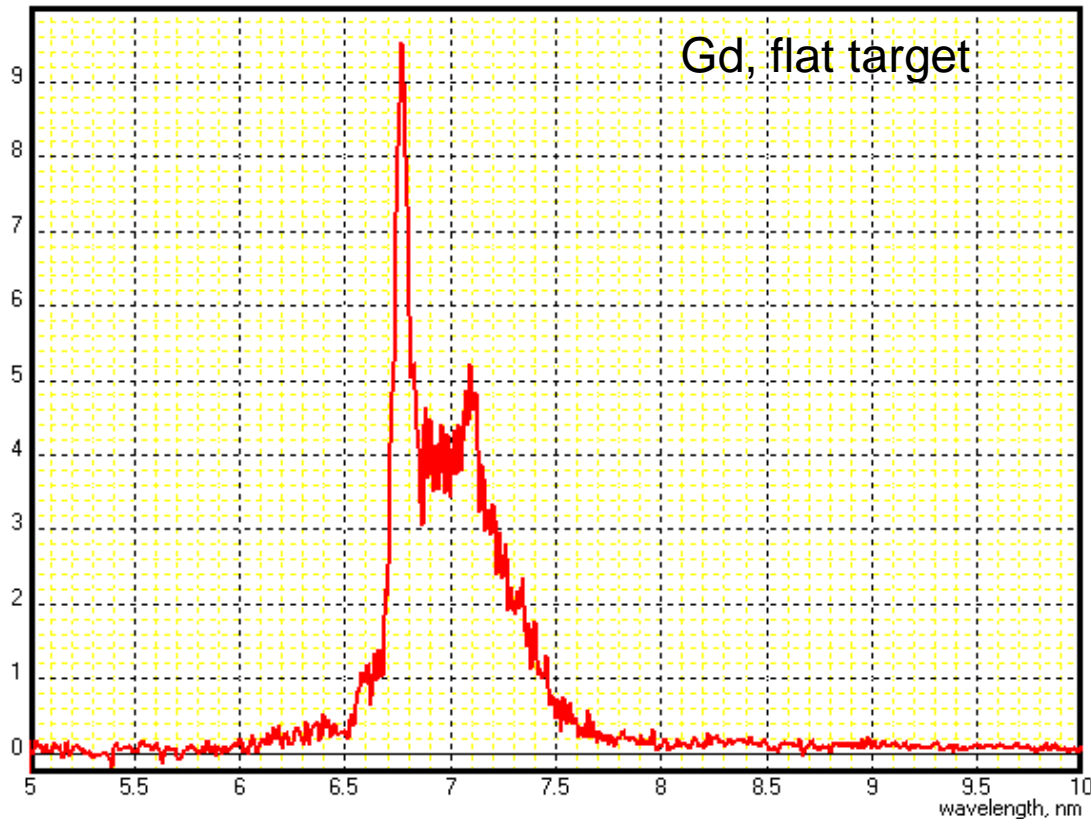
Δn=0 переходы в трёх изоэлектронных последовательностях для различных атомов



4-4 переходы в Tb и Gd



Спектр Gd плазмы при возбуждении излучением CO₂ лазера



Typical spectrum of CO₂ laser produced Gd plasma

Plasma is optically transparent

CE increases with laser power density on the target

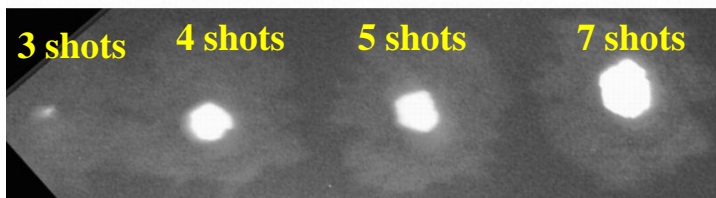
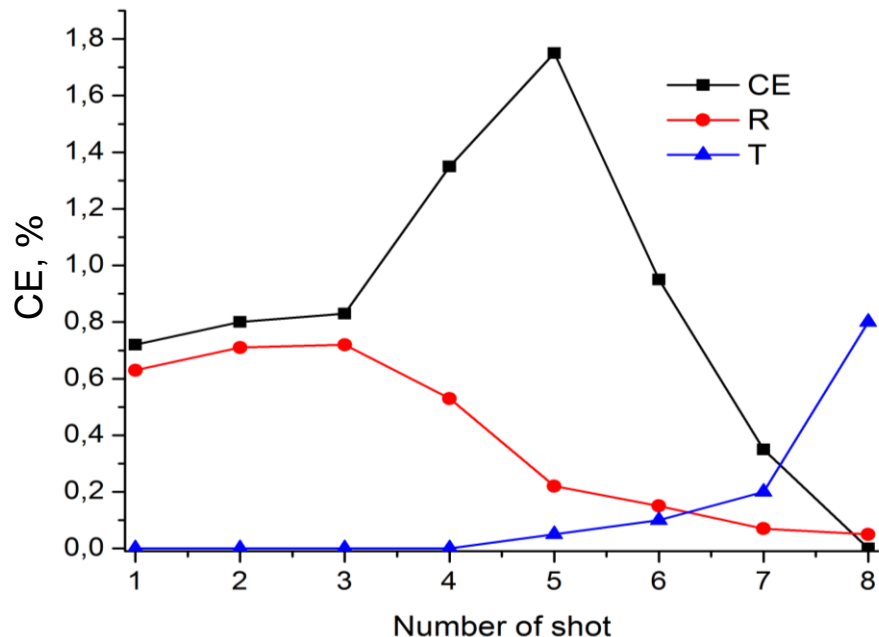
CE measured at $3 \cdot 10^{10}$ W/cm² is about 1% as maximum

Strong reflection of laser radiation is observed and it increase with increasing of laser power density

Absorption coefficient decreases with temperature

$$k_{abs}^{las} = \frac{16\pi Z n_e^2 e^6 \ln \Lambda(\nu)}{3c \nu^2 (2\pi m_e k_B T_e)^{3/2} (1 - \nu_p^2 / \nu^2)^{1/2}}$$

Измерение СЕ для плазмы Gd при возбуждении CO₂ лазером



View of holes in 80 μ Gd foil after defined number of laser shots

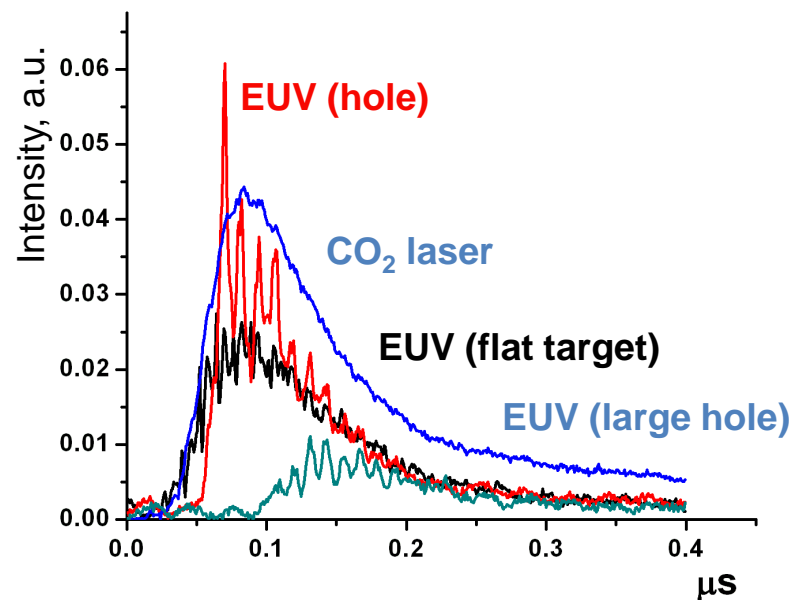
Target – Gd foil 80 μ thick

Laser energy 600 mJ

Laser spot dia. 300 μ

Pulse duration 100 ns

Pow. density $\sim 10^{10}$ W/cm²



Проблемы изготовления многослойной оптики на основе La/B(B₄C)



Чрезвычайно низкая скорость распыления мишени бора при магнетронном распылении. Поэтому произошла замена чистого бора на его карбиды (B₄C, B₉C).

$$R_{\max}(\text{La/B}_4\text{C}) = 70\%$$

$$d=3.4 \text{ нм}, \theta = 90^\circ$$

Реально получен коэффициент отражения La/B₄C - зеркал нормального падения:

45%-47%.

Пути повышения отражательной способности La/B(B₄C) зеркал



- **Использование альтернативных методов напыления многослойных структур (распыление ионными пучками, распыление неоном)**
- **Ионное ассистирование (*взаимодействие ионов инертного газа с плазмой конденсата, налетающего на подложку*)**
- **Ионная полировка (*травление каждой границы раздела слоев низкоэнергетичными ионами*)**
- **Азотирование (образование на границах La/N и B/N)**

С целью реализации возможности управления шириной границ раздела слоев в многослойных структурах изготовлен специальный технологический стенд, в котором сочетаются возможности нанесения МС методами



- **магнетронного распыления**
(включает четыре магнетронных источника)
- **ионного распыления**
(включает два ионных источника)
- **ионной полировки каждой границы раздела слоев**
(два источника низкоэнергетических ионов).

Это была история о том, как результаты фундаментальных исследований оказались ключевыми для развития одной из наиболее важных технологий сегодняшней цивилизации

Мы благодарны научным коллективам
ФИАН , МГУ, ИПМ....
которые принимали и продолжают принимать участие в
Проекте.

Благодарю за внимание!