

EUVアブレーションプラズマの 分光観測

西村博明¹, 羽根一嘉¹, 四方宏紀², 藤岡慎介
阪大レーザー研¹, 近大²

2012年度 原子分子データ応用フォーラムセミナー
平成24年12月12日 核融合科学研究所

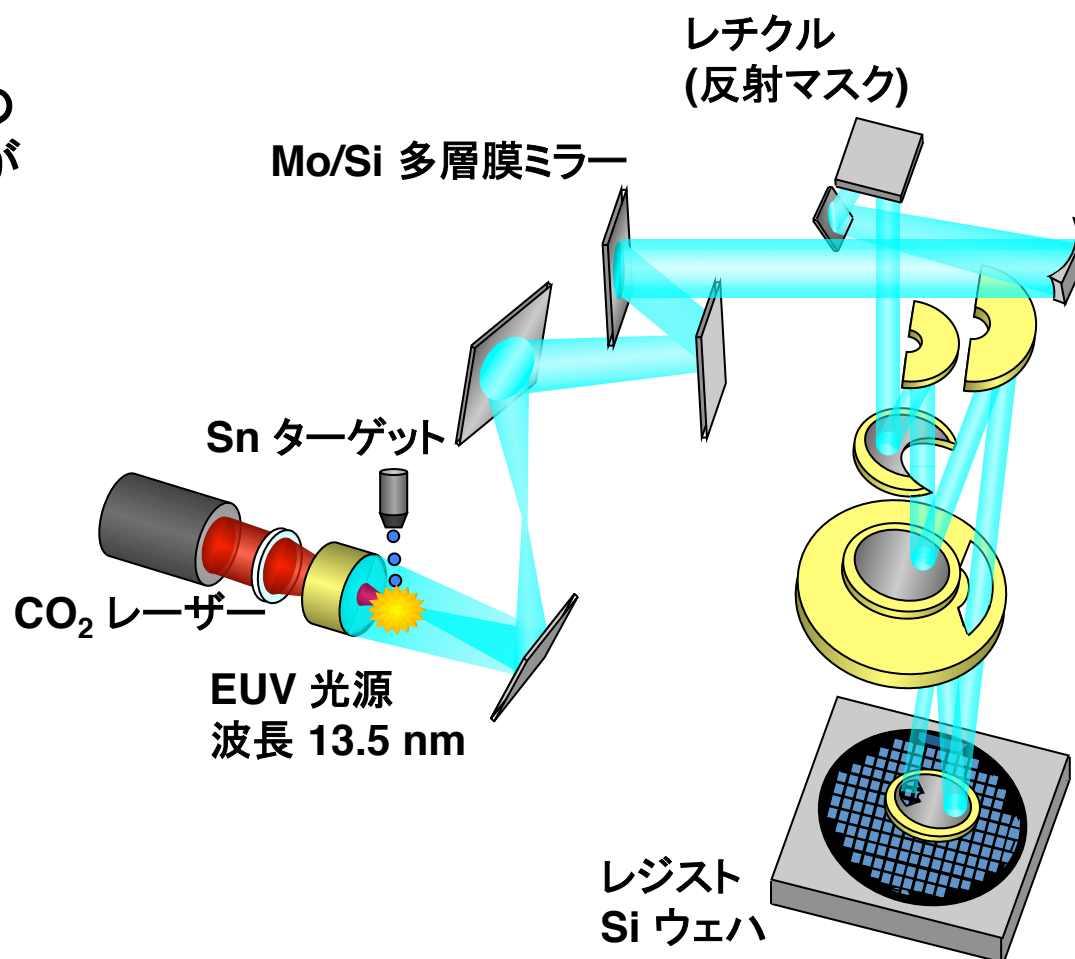
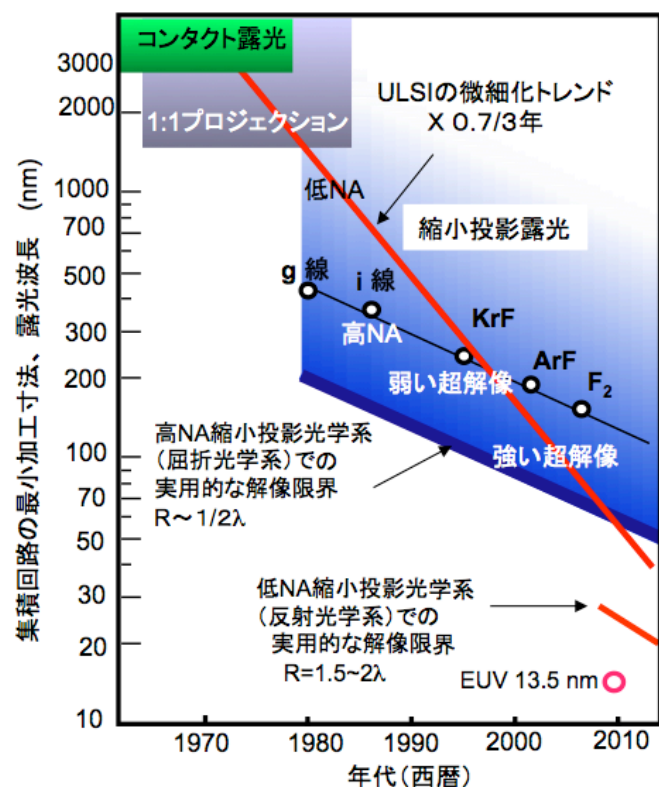
概要

- 背景: EUV光を用いた応用研究の開始
- EUVアブレーションの期待される特徴
 - ✓ 高密度領域へのエネルギー注入が可能
 - ✓ エネルギー注入領域が局所的
- EUVアブレーション研究用光源の開発
 - ✓ 低デブリ、10 Hzパルス出射型
- EUVによるSi、Alの発光スペクトル観測
 - ✓ 電子温度、電子密度の推定
- まとめ、展望

背景：次世代半導体技術としてのEUVリソグラフィの盛んな研究

EUV リソグラフィ

EUV 光源により22 nm以下のノードを持つ半導体デバイスが製造可能になる

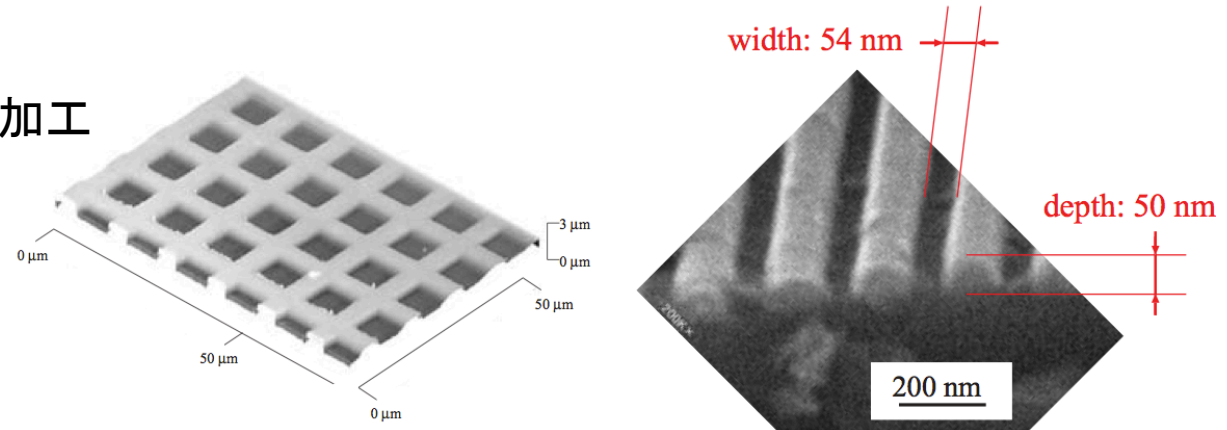


背景：高出力EUV光源を用いた応用研究の開始

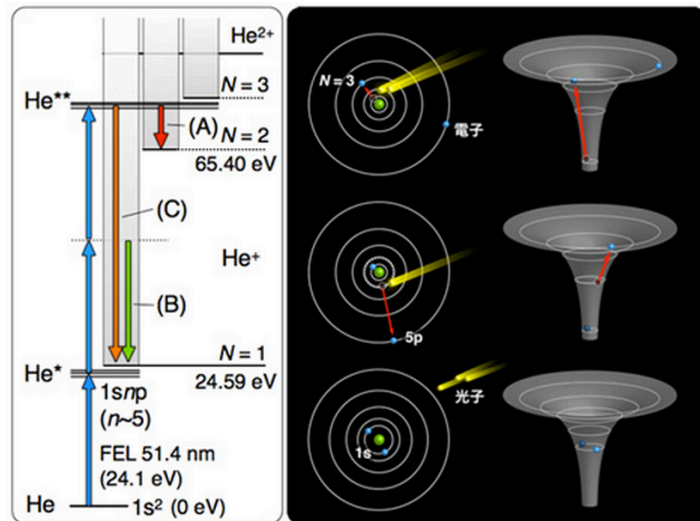
EUV光による石英ガラスの微細加工

EUV光源材料：Ta

EUV強度： $3 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$



T. Makimura et al., Journal of Nanophotonics, Vol. 4, 040305



X線自由電子レーザー施設SACLAでの実験

強いEUV光領域の光を受けた物質では
3光子吸収過程が起こり易く、3光子吸収は
2電子励起状態への遷移に由来する。

A. Hishikawa et al., PRL 107, 243003 (2011)

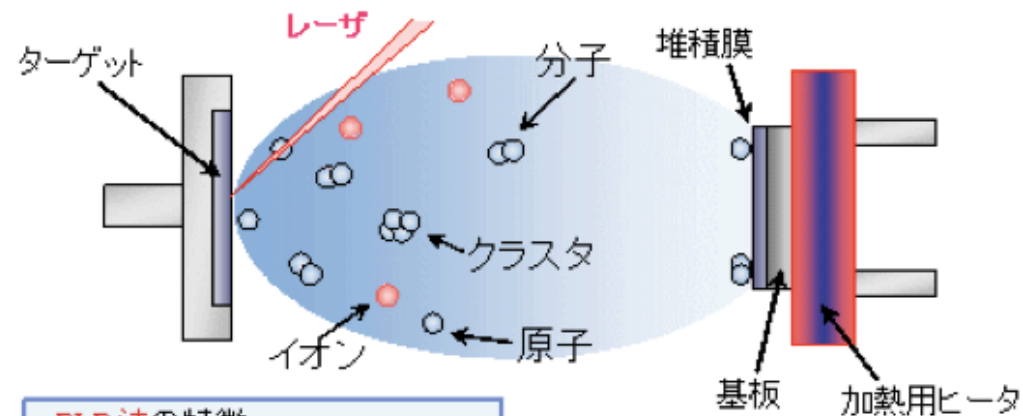
<http://www.ims.ac.jp/topics/2011/111205.html>

加熱光源をレーザーから EUVに変えてみる。その背景にある物理は？

通常、加熱源はエキシマレーザー(紫外光)

レーザーアブレーション法 (Laser Ablation)

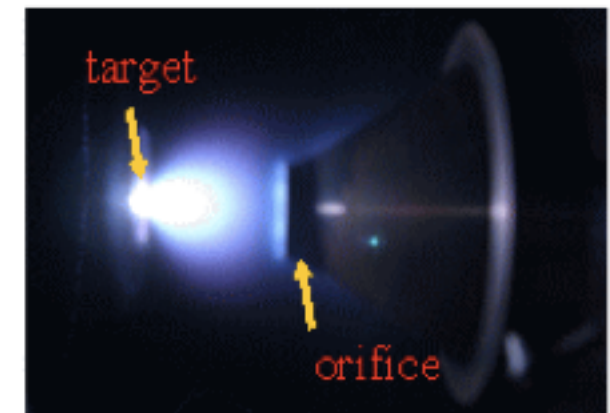
パルスレーザー堆積(Pulsed Laser Deposition: PLD)法



<PLD法の特徴>

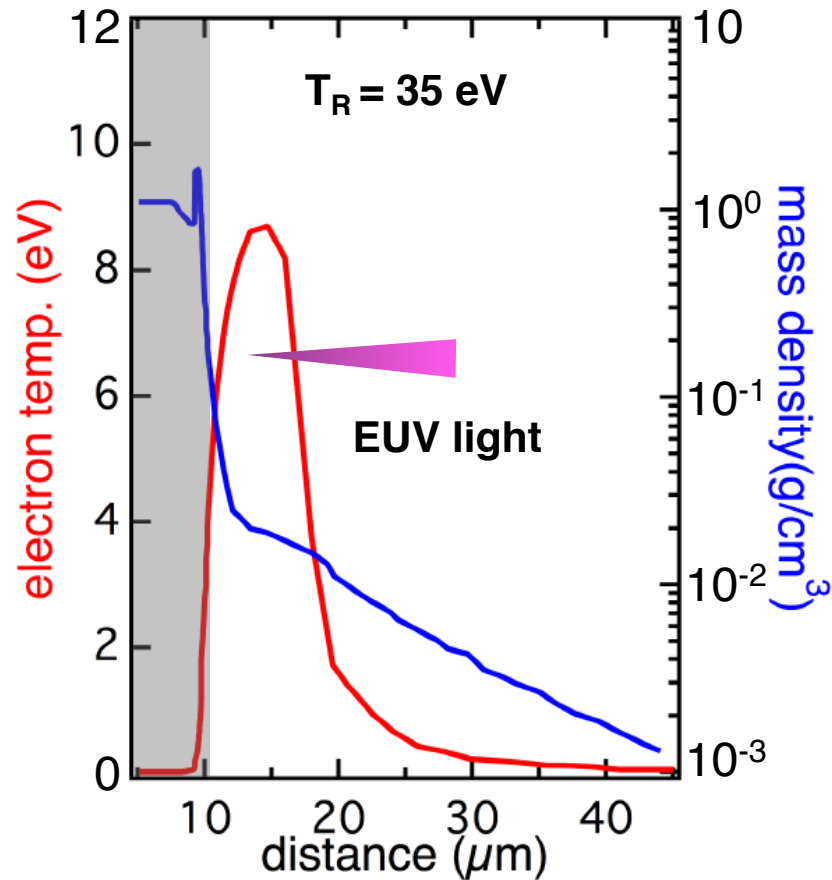
- 高融点材料の薄膜化が可能
- 成膜条件を独立に制御できる
- 再現性がよい
- 成膜速度の制御が可能

多くの元素を用いた複合組成物質の合成に有利

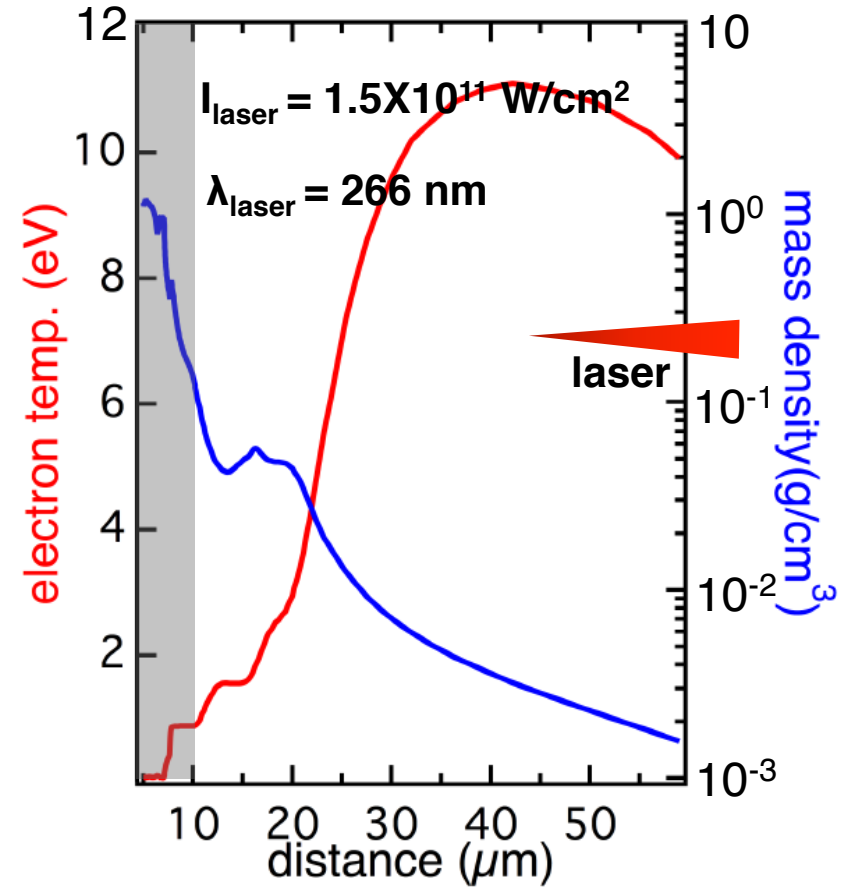


EUV 光は高密度領域まで侵入し、局所的に加熱

(a) EUV Ablation

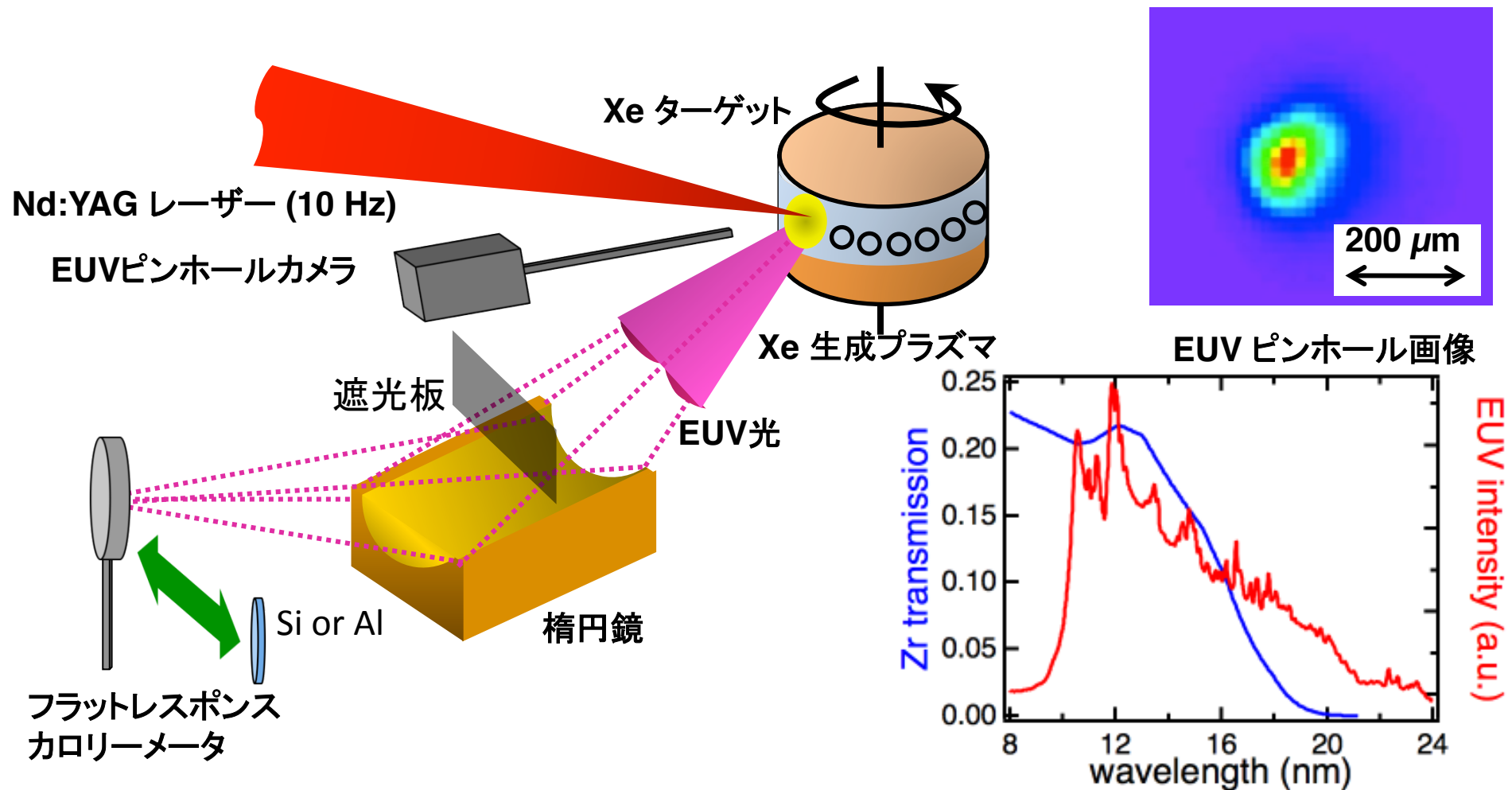


(b) Laser Ablation



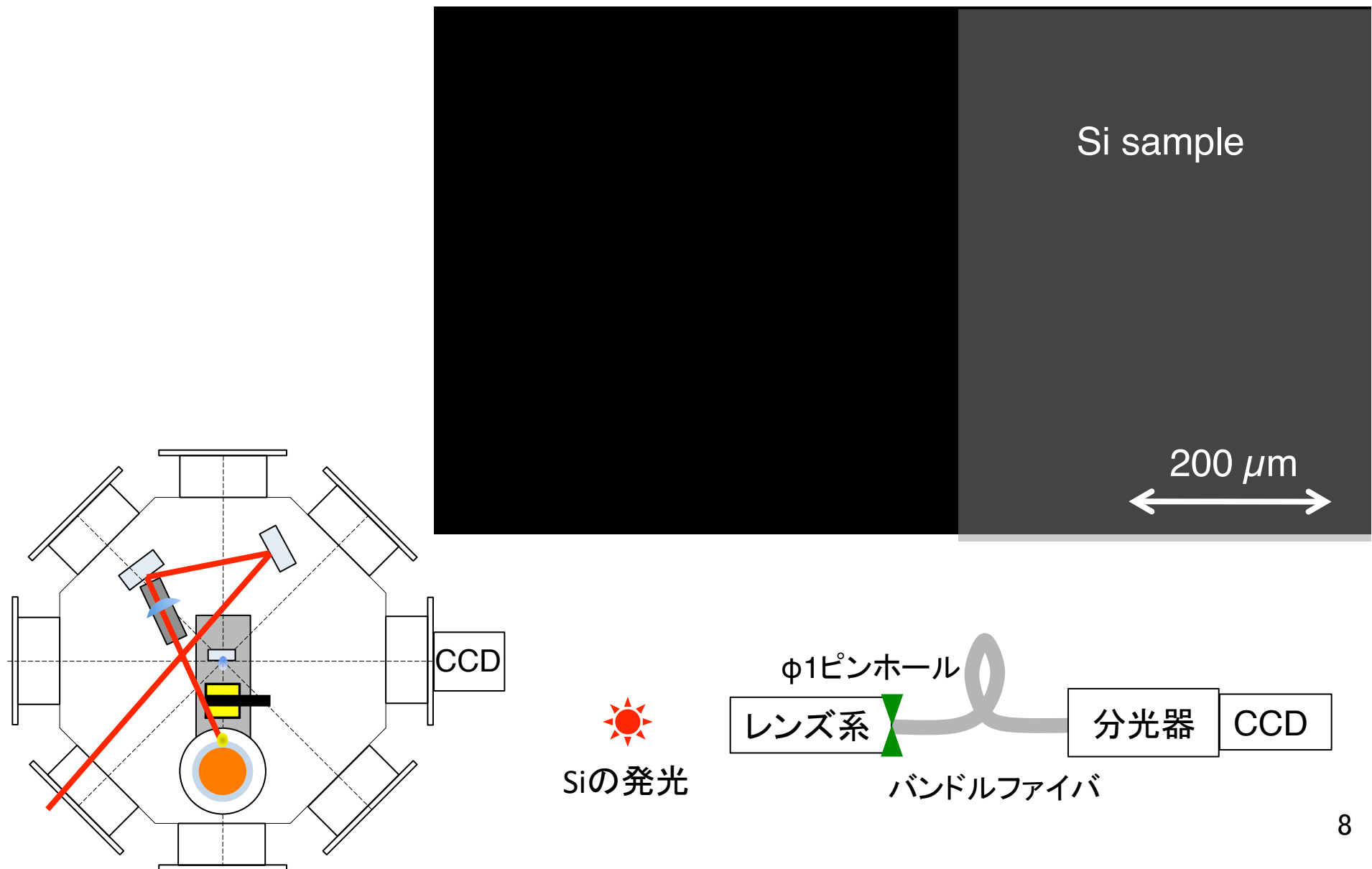
HELIOS: J.J.MacFarlane., et al, 1-D rad.-magnetohydrodynamics
code with inline atomic kinetics modeling

EUVアブレーション研究用として低デブリEUV光源を開発



実験スペクトル & Zr透過率
帯域外放射 (長波長側) : 5%

EUVによるSiの可視発光を確認



ボルツマンプロットによる電子温度の導出

$$I_{ki} = h\nu \frac{g_k}{Z(T)} A_{ki} N \exp\left(-\frac{E_k}{kT}\right)$$

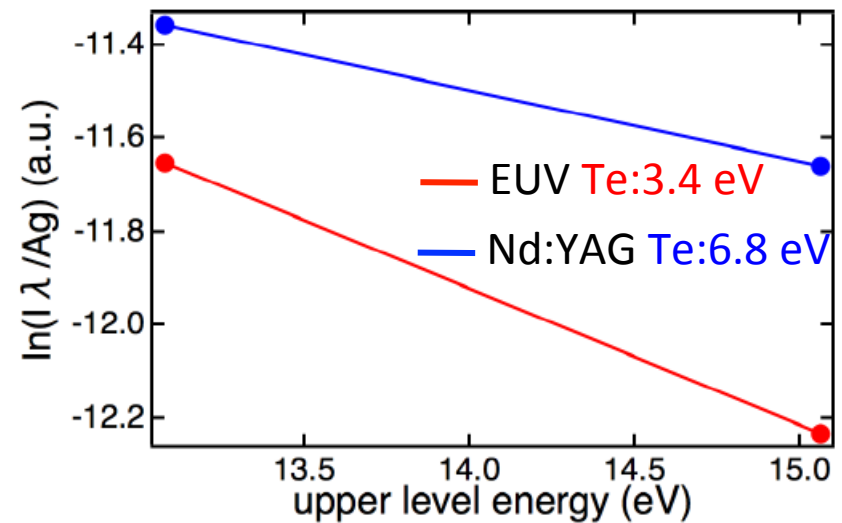
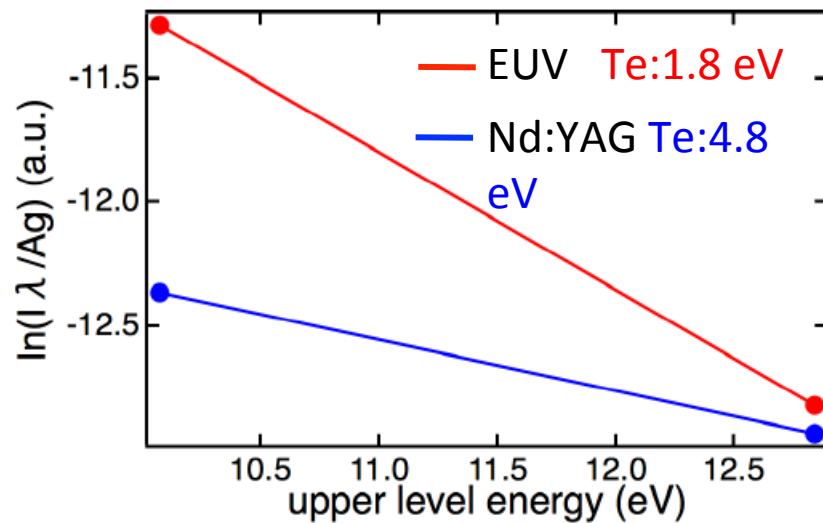
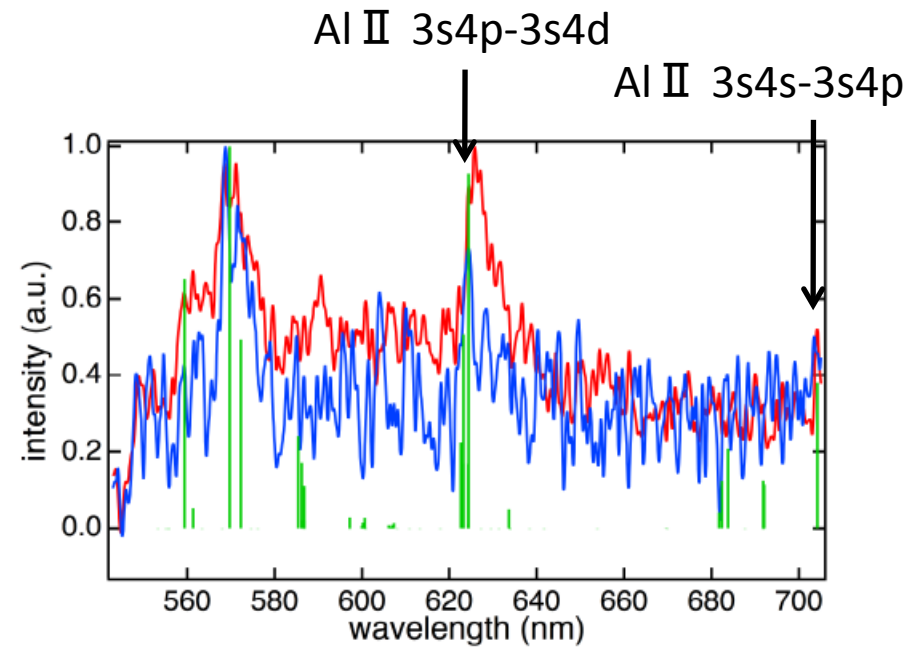
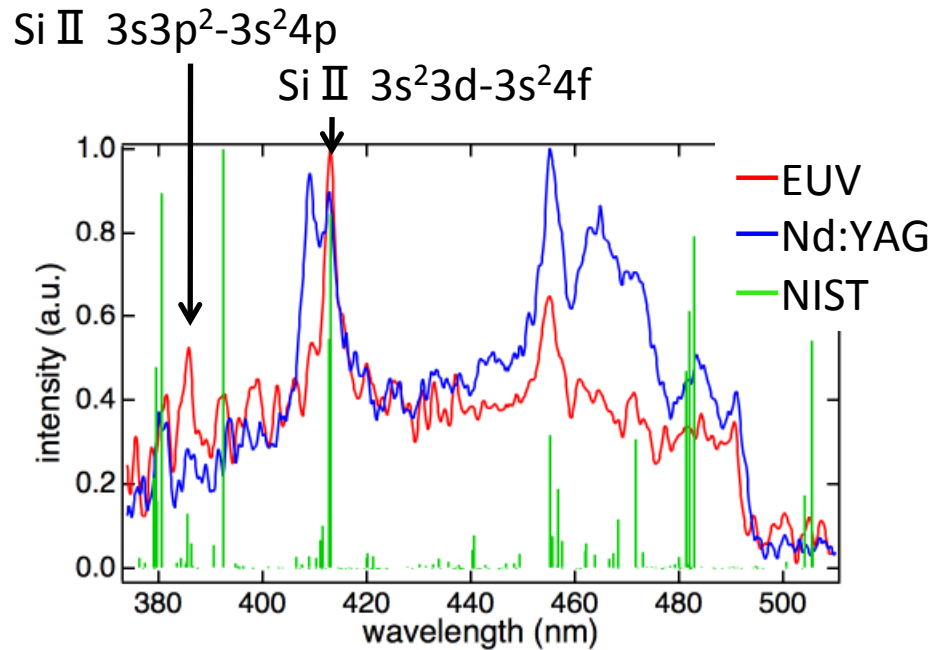
$$\frac{I_{ki} \lambda_{ki}}{A_{ki} g_k} = \exp\left(-\frac{E_k}{kT}\right) \frac{hc_0 N}{Z(T)} = K \exp\left(-\frac{E_k}{kT}\right)$$

$$\ln \frac{I_{ki} \lambda_{ki}}{A_{ki} g_k} = -\frac{E_k}{kT} + \ln K$$

価数が同一のスペクトルであれば
傾きより電子温度Tが求められる

I_{ki} : 準位 k から準位 i の遷移スペクトル線相対強度
 h : プランク定数
 ν : 遷移によって放出される光の振動数
 g_k : 励起準位 k の統計的重価
 A_{ki} : 遷移における遷移確率
 $Z(T)$: 温度 T におけるその原子の分配関数 (状態和)
 N : 準位 k に存在する数密度
 E_k : 準位 k のエネルギー
 k : ボルツマン定数
 T : 電子温度
 λ_{ki} : 遷移によって放出される光の波長
 c_0 : 真空中の光の速さ
 K : 同一温度、同一原子で共通の定数

ボルツマンプロットによる電子温度の導出



シュタルクブロードニングによる電子密度の導出

$$\Delta\lambda_{1/2} \approx 4 \left(\frac{1}{3} \right)^{3/2} \sqrt{\pi} \frac{\hbar \lambda^2}{m_e a_0 c} n_e \left(\frac{E_H}{kT_e} \right)^{1/2} \\ \times \left[\langle i | r^2 | i \rangle \bar{g}_{se} \left(\frac{3kT_e}{2|\Delta E_i|} \right) + \langle f | r^2 | f \rangle \bar{g}_{se} \left(\frac{3kT_e}{2|\Delta E_f|} \right) \right]$$

$$\langle i | r^2 | i \rangle = \frac{n_i^2}{2(z+1)^2} [5n_i^2 + 1 - 3l_i(l_i + 1)] a_0^2$$

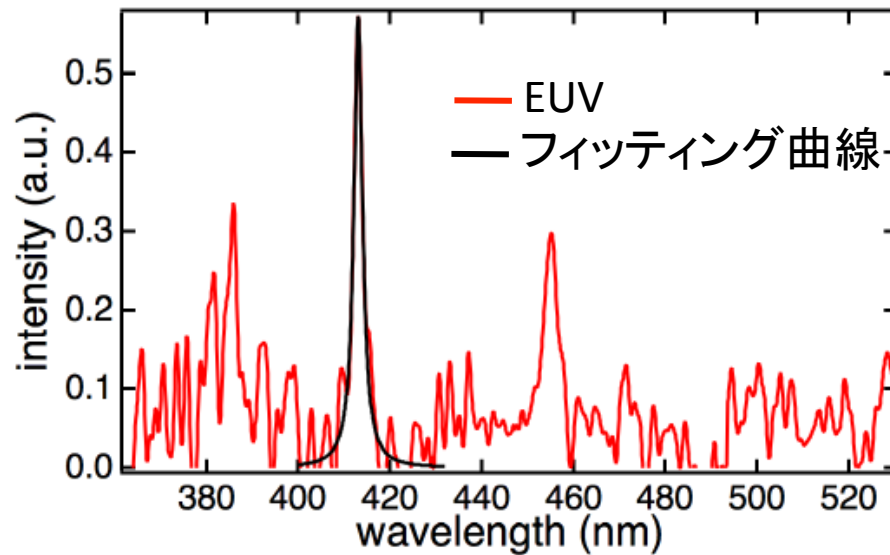
**スペクトルの半値半幅、電子温度から
電子密度が求められる**

$\Delta\lambda_{1/2}$: 半値半幅
 λ : 中心波長
 m_e : 電子質量
 a_0 : ボーア半径
 c : 真空中の光の速さ
 E_H : 水素のイオン化エネルギー
 n_e : 電子密度
 $\bar{g}_{se}$: 有効ガウント因子
 $\Delta E_i, \Delta E_f$: 各準位のエネルギー
 n_i, n_f : 各準位の有効主量子数
 l_i, l_f : 各準位の軌道量子数
 z : 電離度

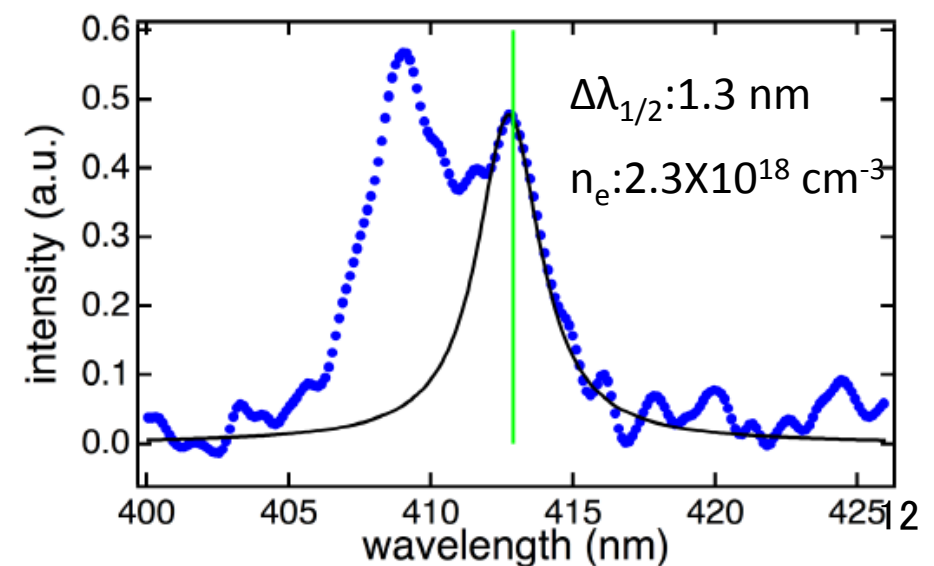
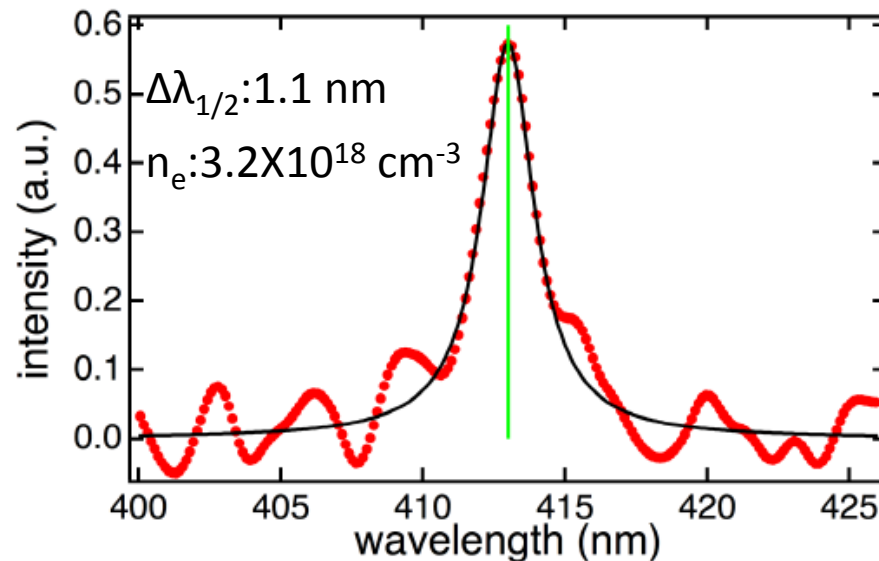
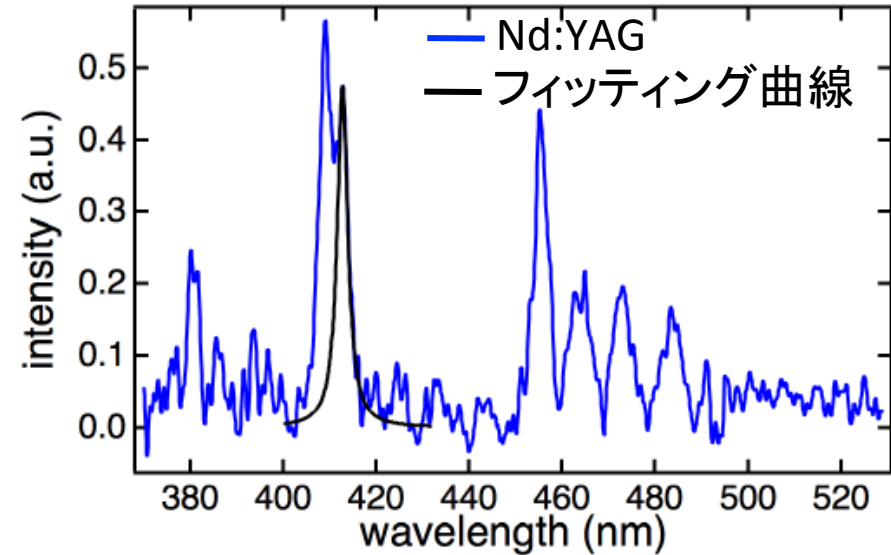
S. Namba et al., J. Appl. Phys. 104, 013305 (2008)

シュタルクブロードニングによる電子密度の導出

EUVによるSiの発光

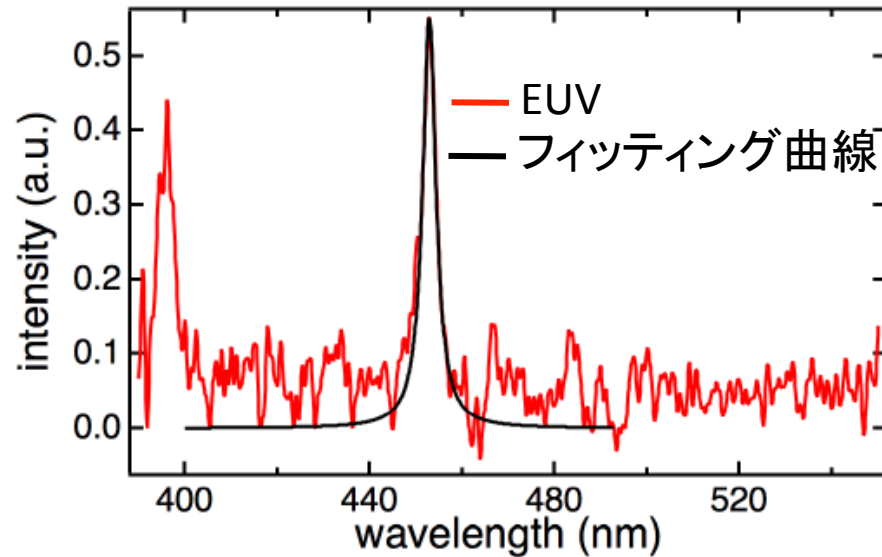


Nd:YAGによるSiの発光

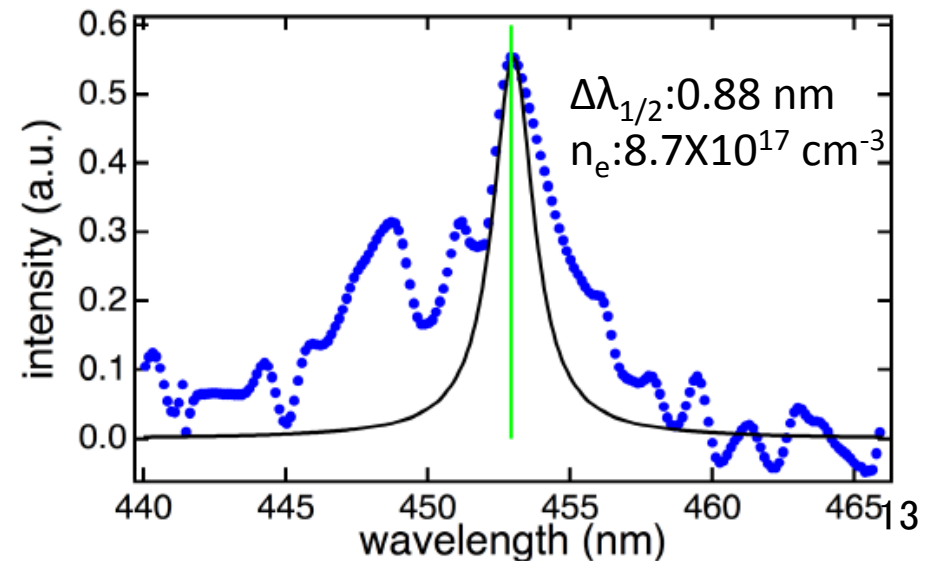
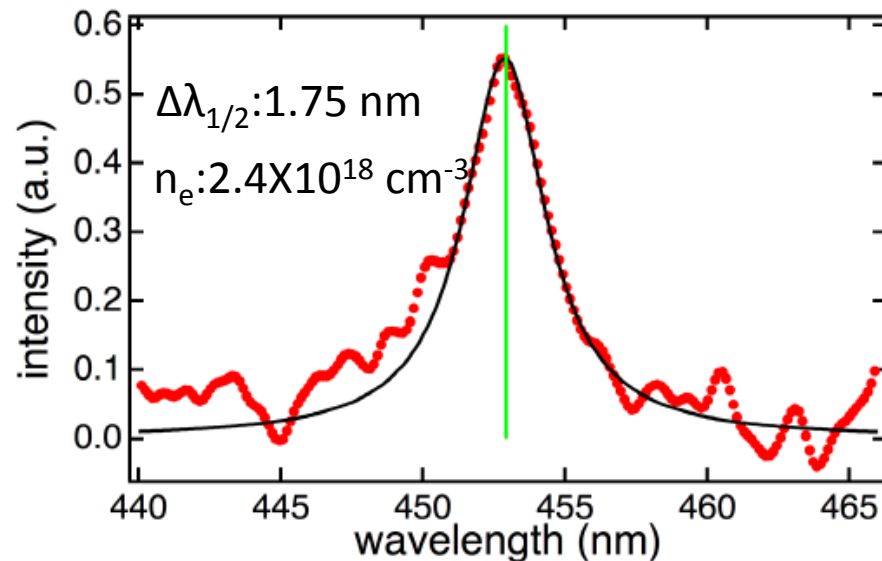
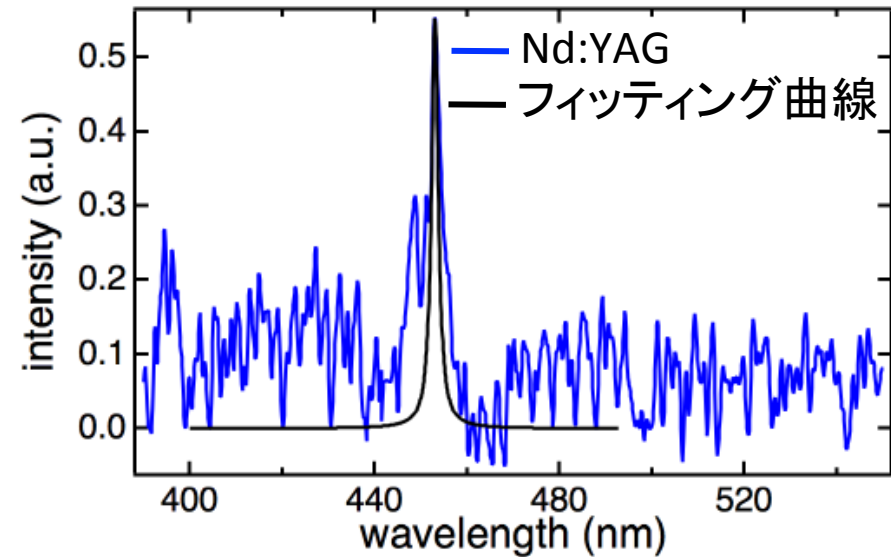


シュタルクブロードニングによる電子密度の導出

EUVによるAlの発光



Nd:YAGによるAlの発光



まとめ

I. 低デブリなパルス出射型のレーザープラズマEUV光源を開発した

- ターゲット：回転ドラム上に冷却固化したXe
- 発生周波数：10 Hz
- サンプル上での最大EUV強度： $4.8 \times 10^9 \text{ W/cm}^2$

II. 高出力EUV光源を用いてアブレーション実験を行った

- EUVアブレーションによるSi、Alの可視分光観測を行った。
- ✓ スペクトル比→電子温度
- ✓ スペクトル幅→電子密度
- シミュレーションの結果と概ね一致することを確認した。
→Warm Dense Matterとしての診断手法の開発

今後の展開

- 時間分解した発光スペクトル、真空紫外領域の観測、粒子観測を実施