

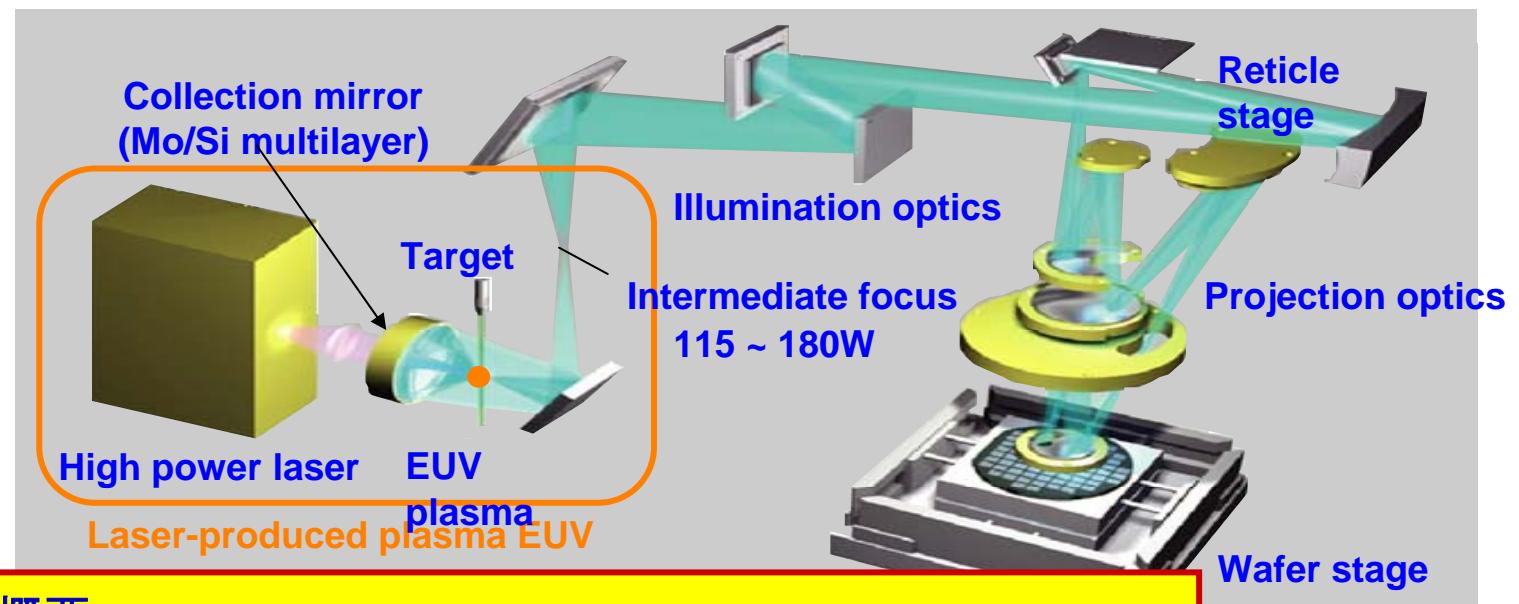
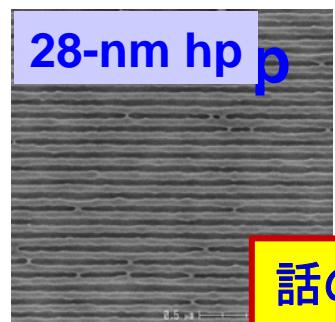
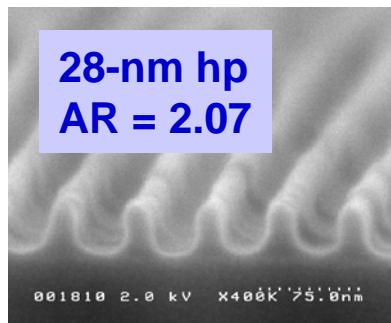
EUV光源開発における原子過程と放射流体シミュレーションの現状

西原 功修¹、砂原 敦¹、佐々木 明²、田沼 肇³、小池文博⁴、V. Zhakhovskii

大阪大学レーザーエネルギー学研究センター

¹レーザー技術総合研究所, ²日本原子力研究開発機構・量子ビーム応用研究部門,

³首都大学理学研究科, ⁴北里大学医学部

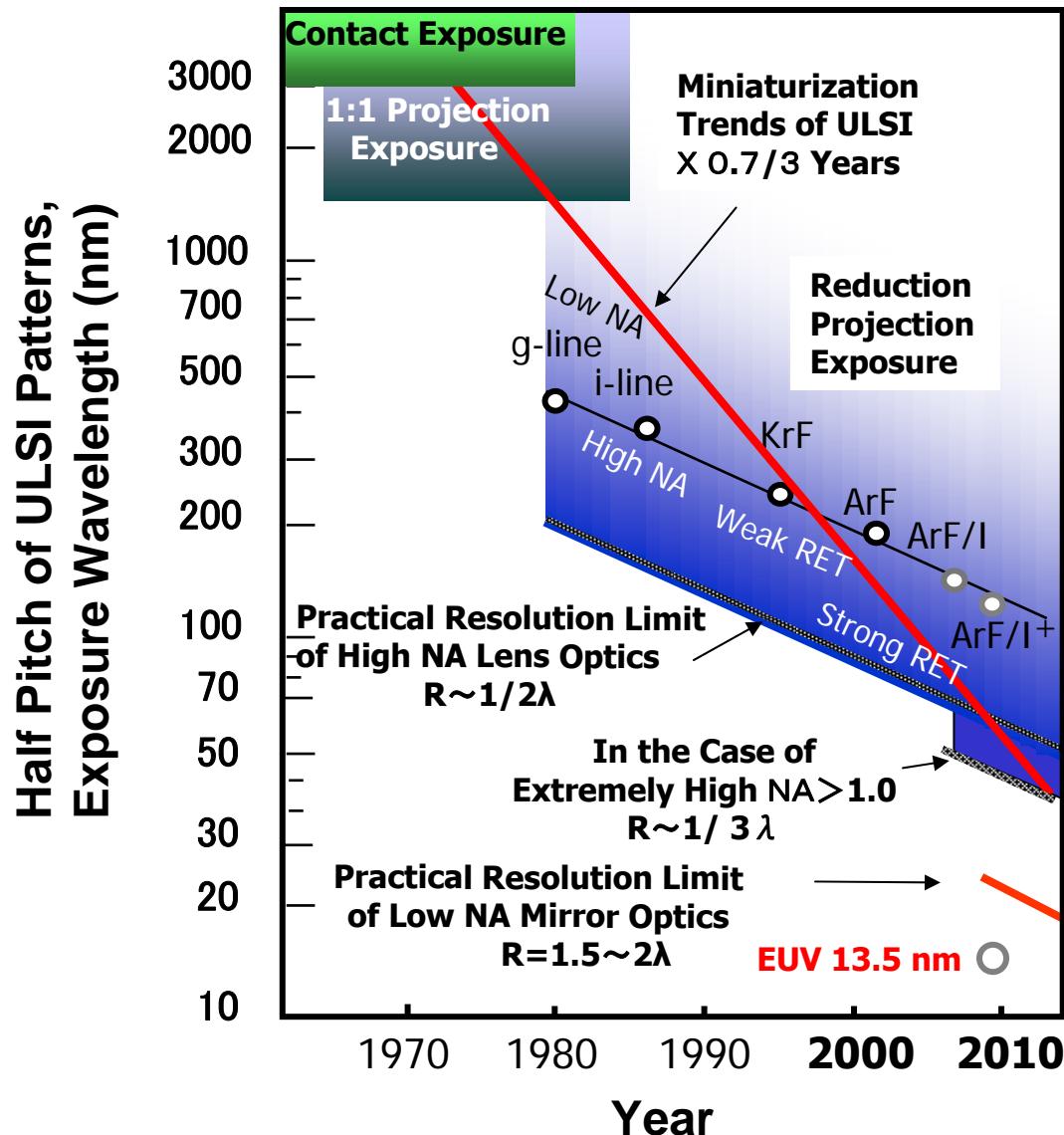


話の概要

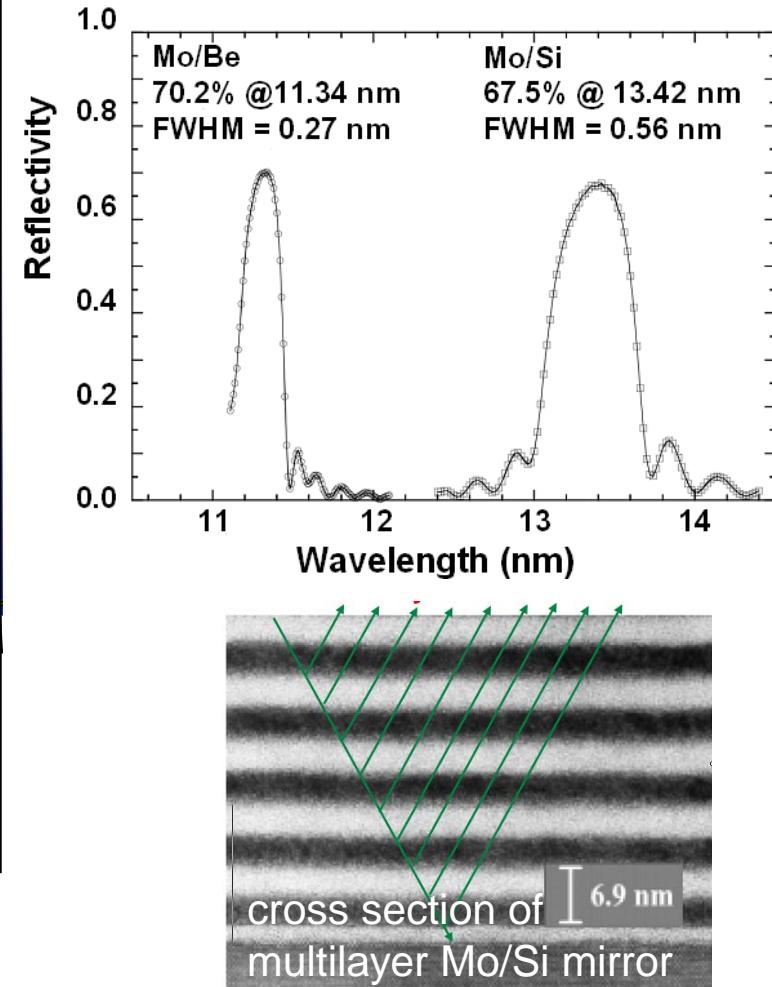
- EUV(13.5nm)光源の概要 / 波長13.5nmを放出する原子
- スズからの13.5nm放射 / 実験データの必要性
- 放射流体シミュレーション / EUV光源実用化への指針
- 残された課題

EUV光源開発研究の経験:「原子分子データ協会」への雑感

Miniaturization Trend of ULSI Devices and Exposure Wavelength Reduction Trend



Reflectivity of multilayer Mo/Si mirror has a sharp peak (70%) at 13.5 nm



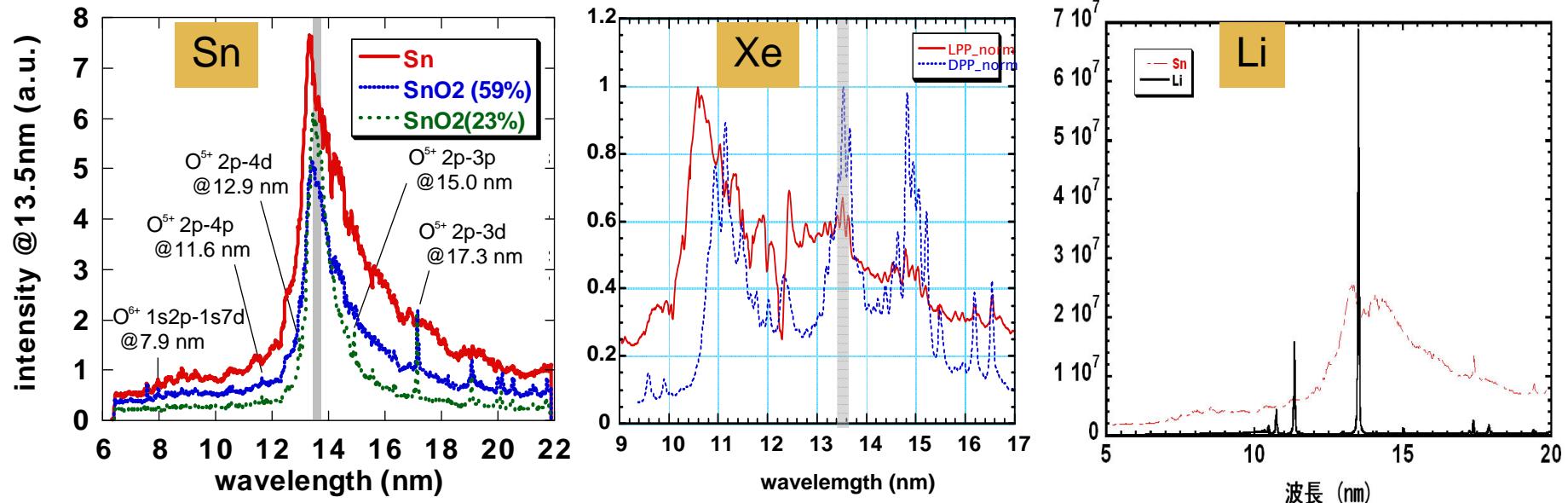
Extreme ultra-violet lithography (EUVL) is a leading technology for semiconductor devices at 32 nm node and below.



Sn, Xe, Li emit strong 13.5 nm light, however their spectra are quite different.



materials and transitions for 13.5 nm emission



Sn: Sn⁺⁸ - Sn⁺¹⁴ (4f-4d)
(many lines 10⁵)

transitions are not assigned for Sn and Xe yet

Xe: Xe⁺¹⁰ (5p-4d)
(more than 100 lines)

Li: Li⁺¹ Ly- α (2p-1s)
(narrow bandwidth)



understanding of atomic processes

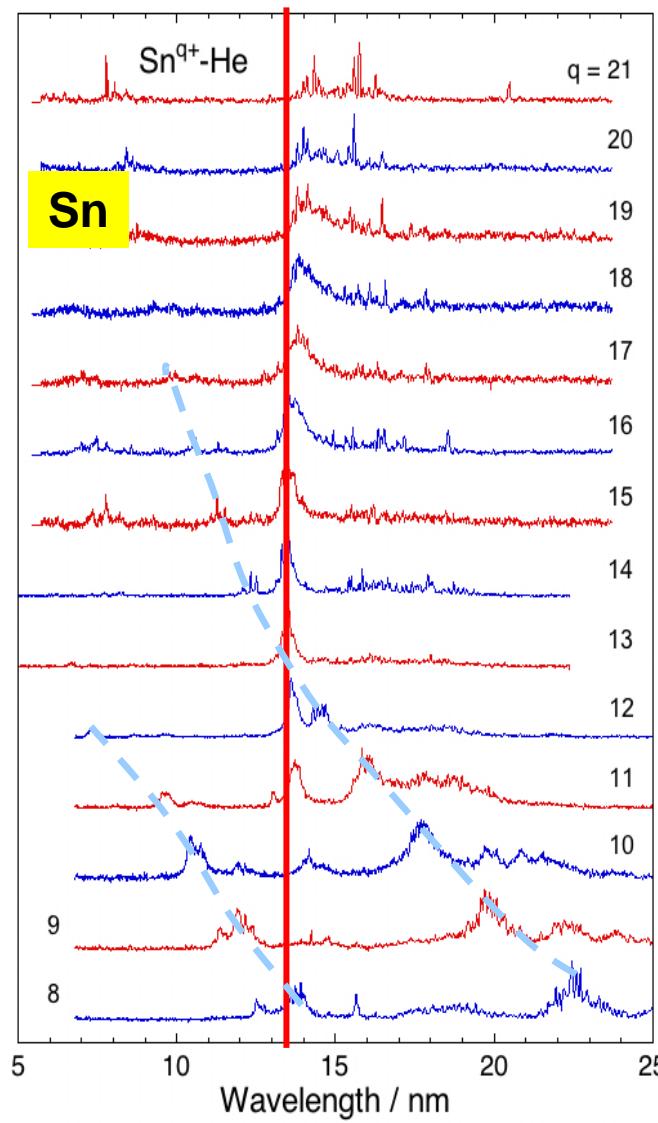
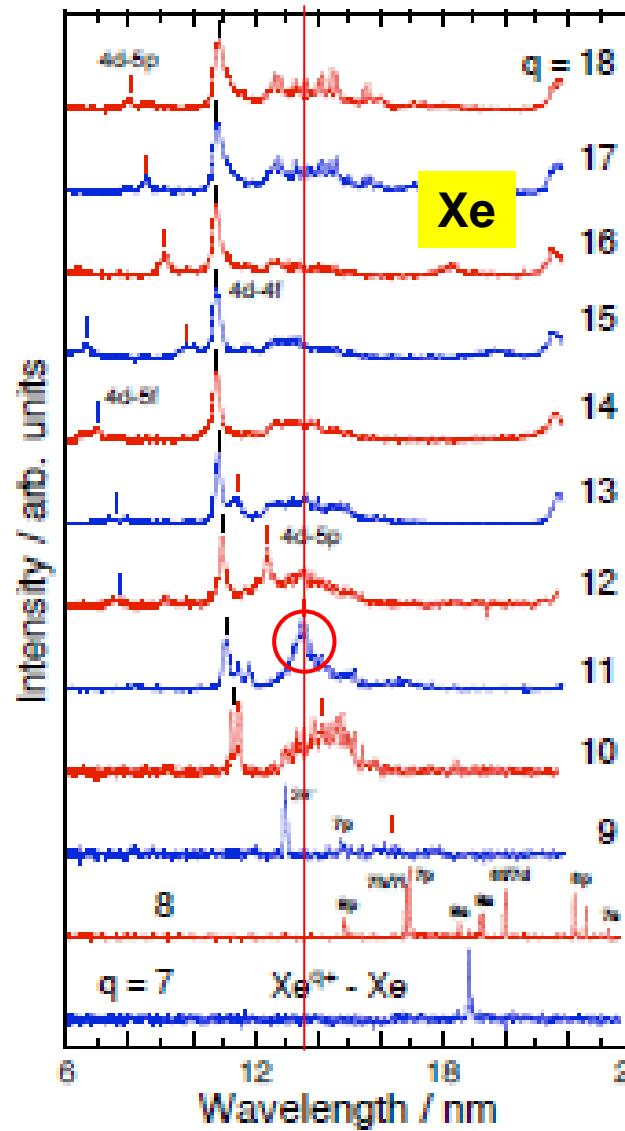


Importance of atomic data base

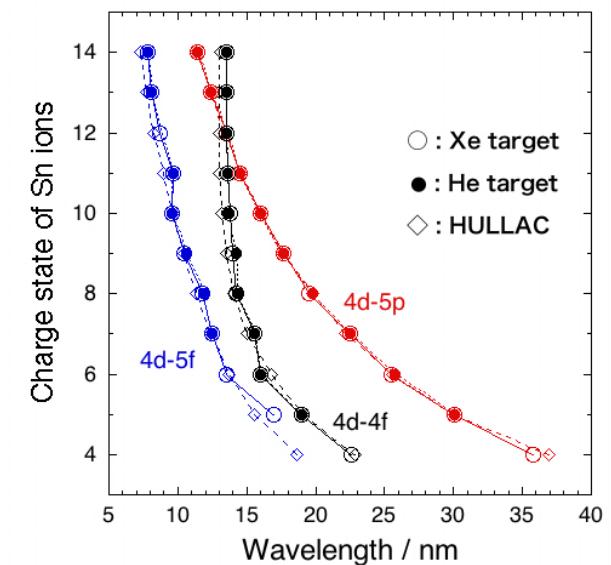


DB 1

Transitions between the same principal quantum number result in strong emission near 13.5 nm even for different charge states.



Energy levels calculated using detail atomic codes such as HULLAC / GRASP agree with those observed except 4d-4f transition with about 0.4 nm difference.



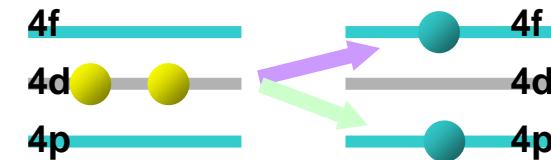
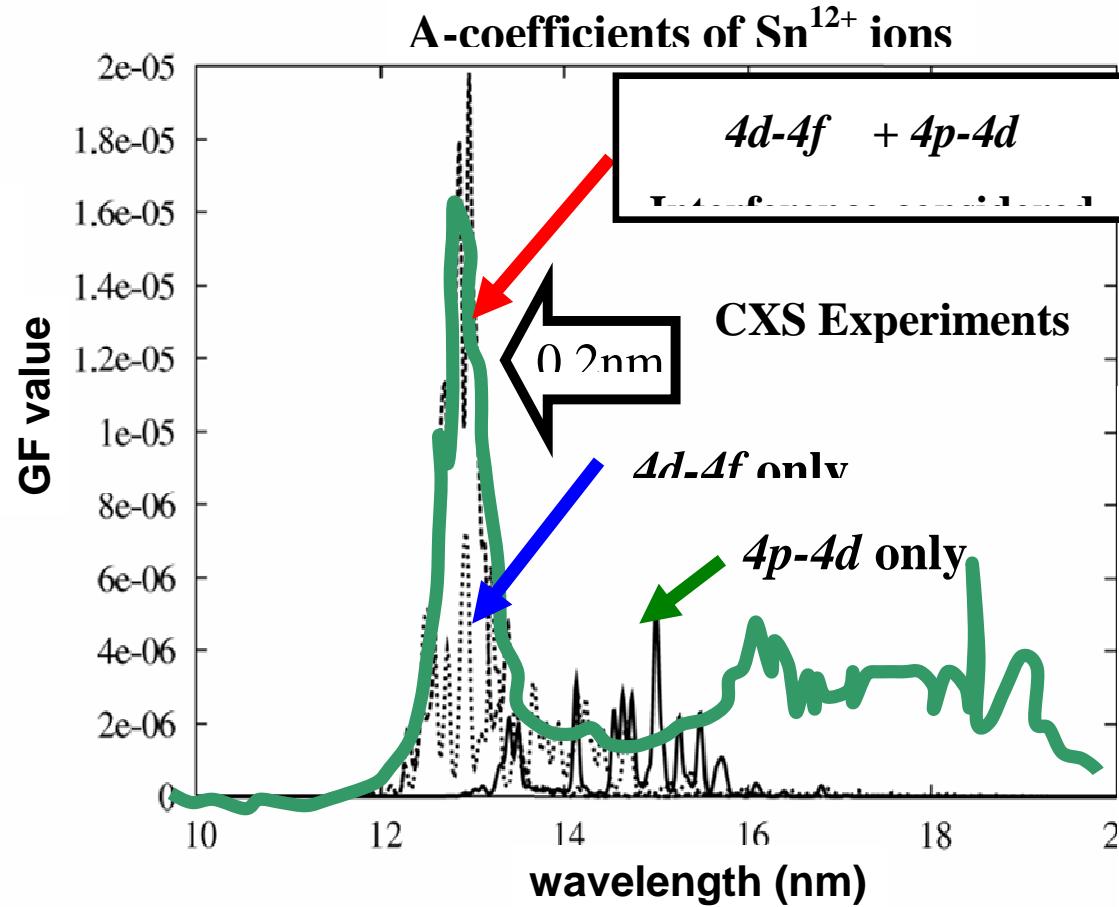
comparison of Sn energy level between theory and experiments



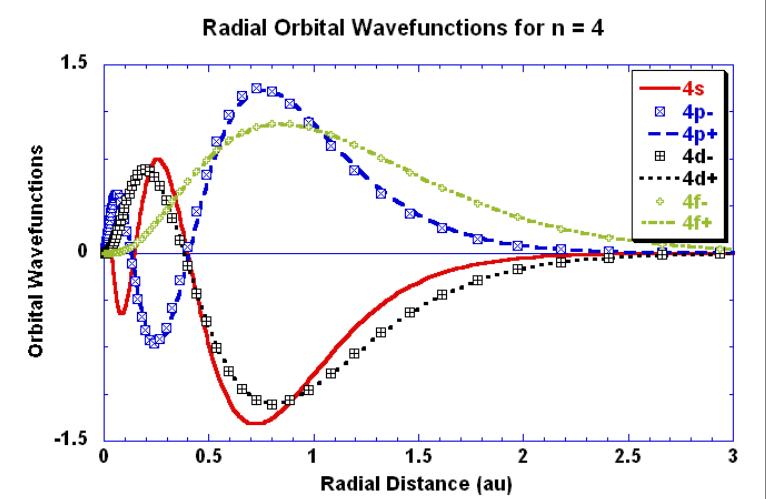
Spectral shift and narrowing occur for ions having 4d-open valence shell, due to configuration interaction.



The Sn UTA is due to $4p^64d^n \rightarrow (4p^54d^{n+1} + 4d^{n-1}4f + 4d^{n-1}5p)$ ($n=0,1,\dots,9$) transitions.

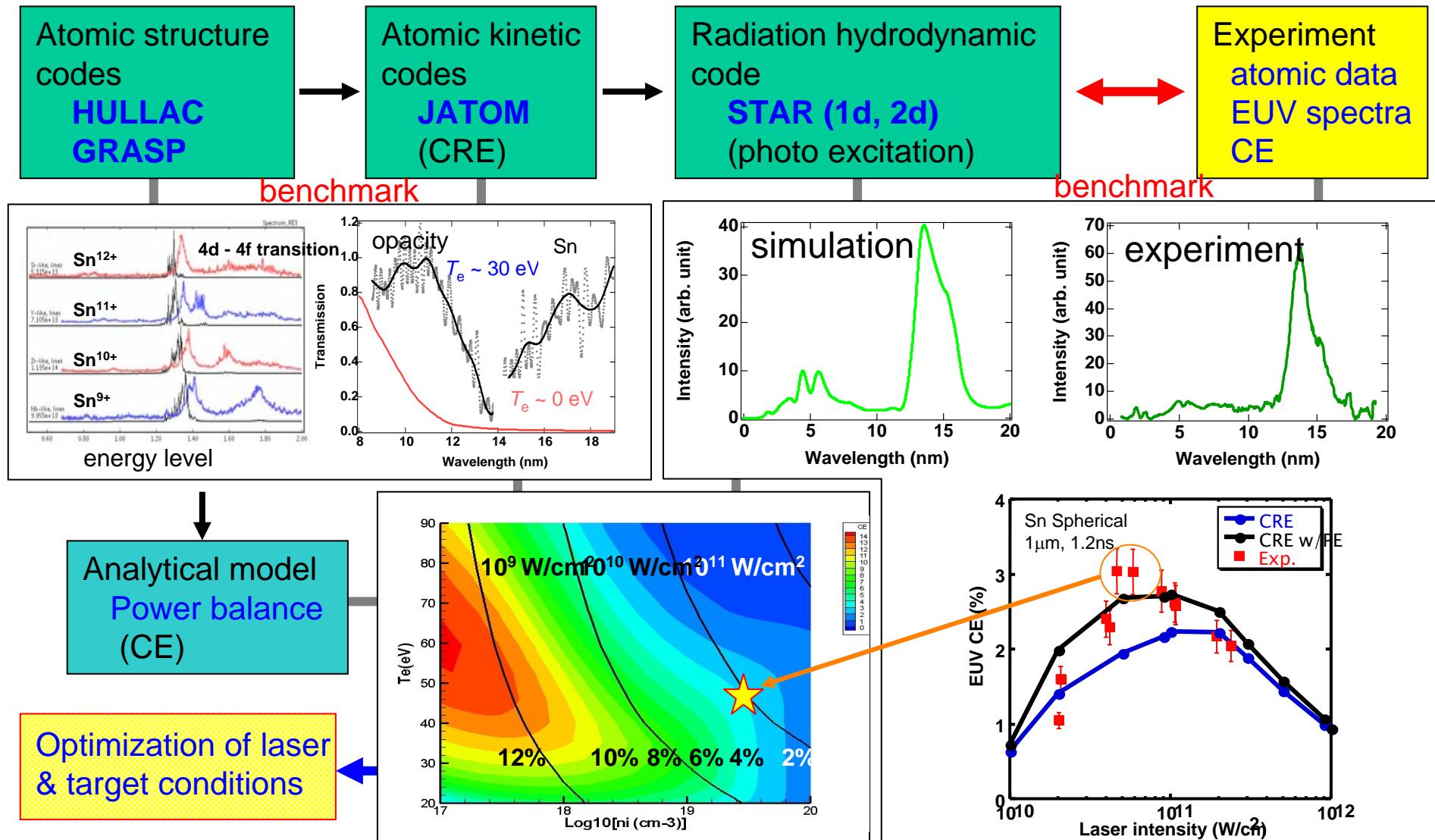


Overlapping of wave function causes resonant interaction among them



code 1

Integrated 1d & 2d radiation hydrodynamic codes were developed,
which are used for design of a high power EUV source.



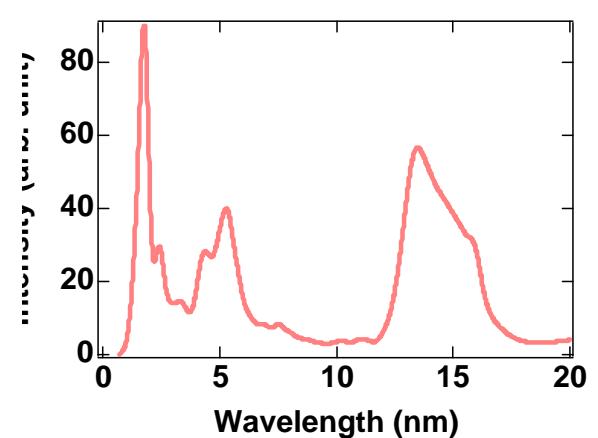
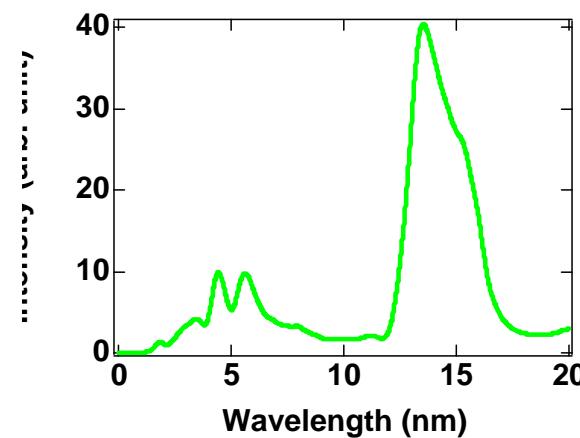
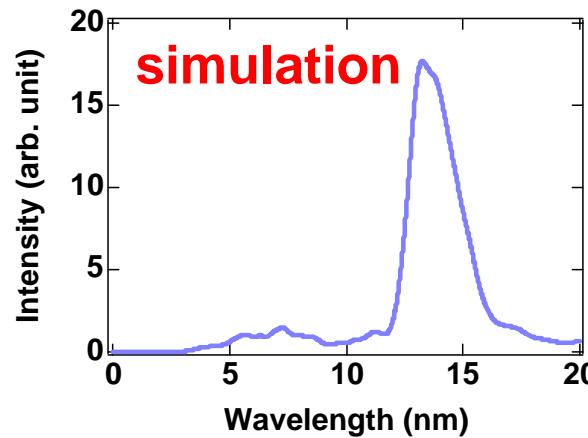
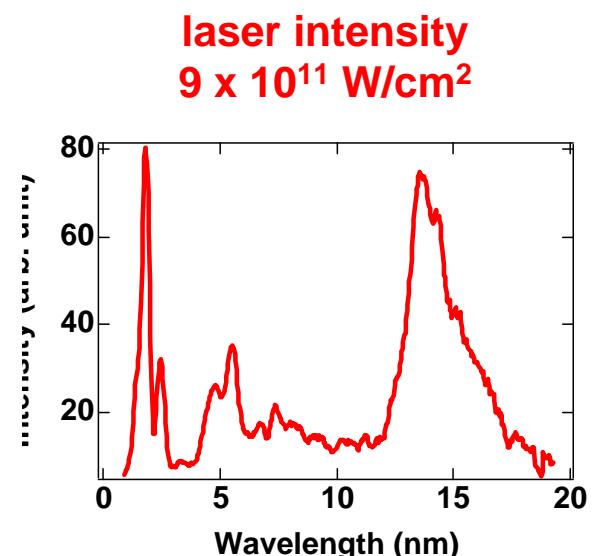
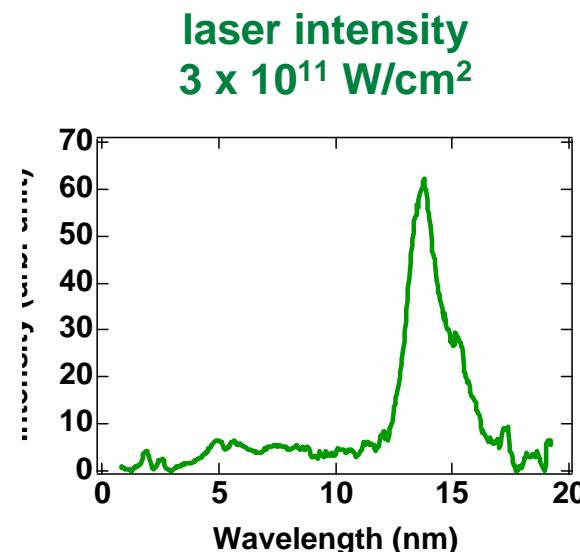
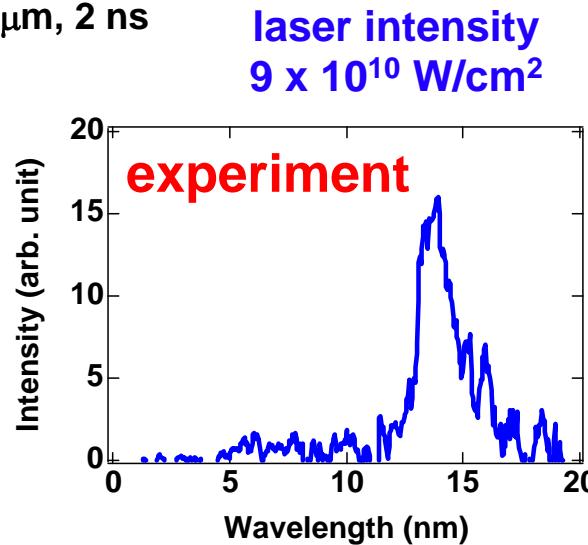
code 2

Radiation hydrodynamic simulations reproduces well measured spectra at different laser intensities.



Sn, planar target

1 μm, 2 ns

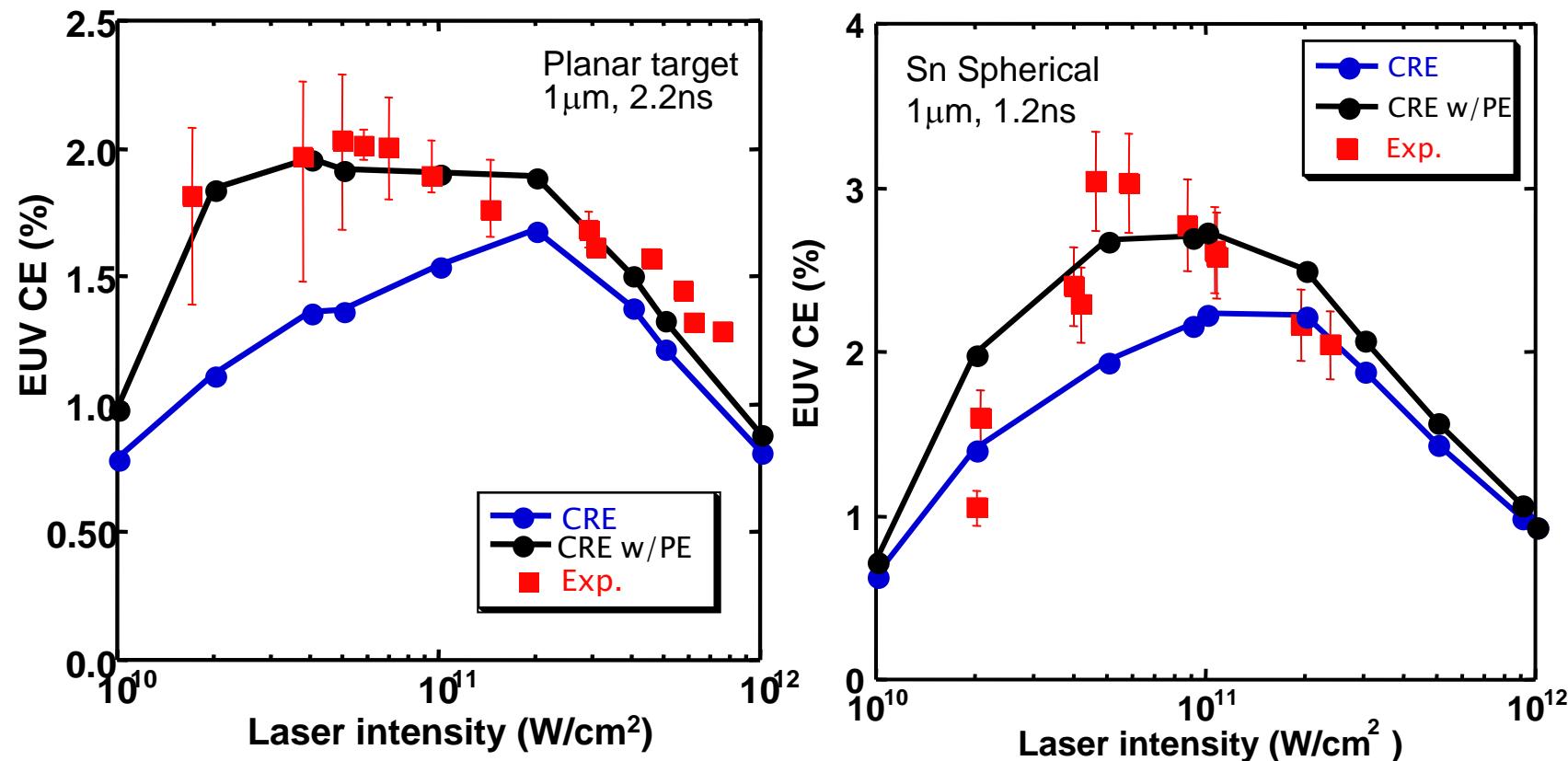


code 3

Radiation hydrodynamic simulations represent well the conversion efficiency for different laser and target conditions.



CRE: collisional radiative equilibrium
w/PE: with photo-excitation



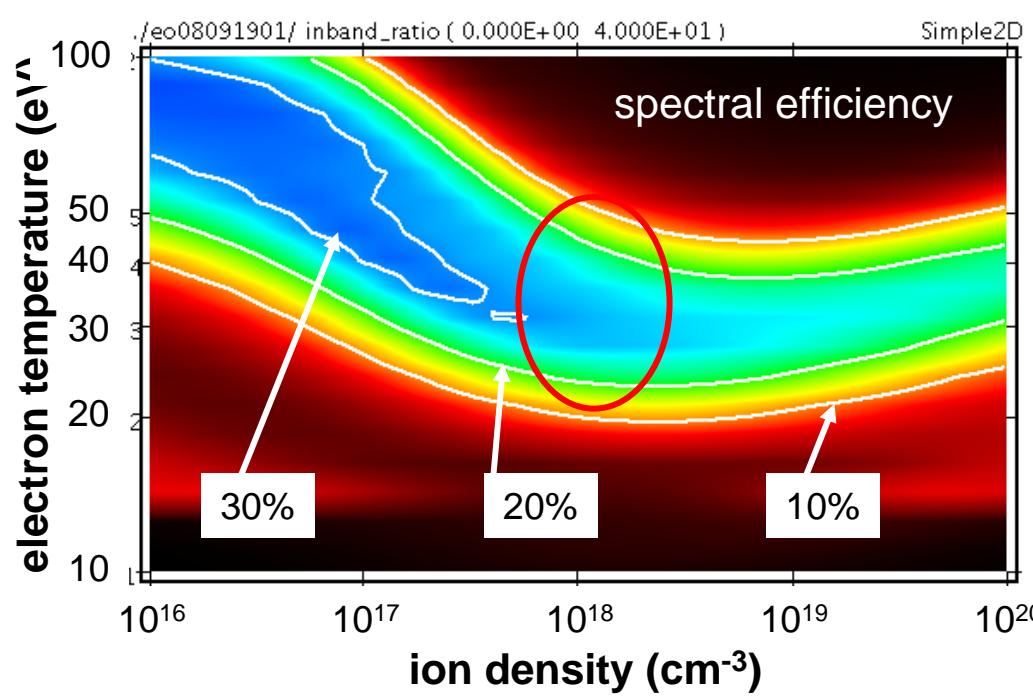
In Sn plasma, photo-excitation process by EUV absorption is important.



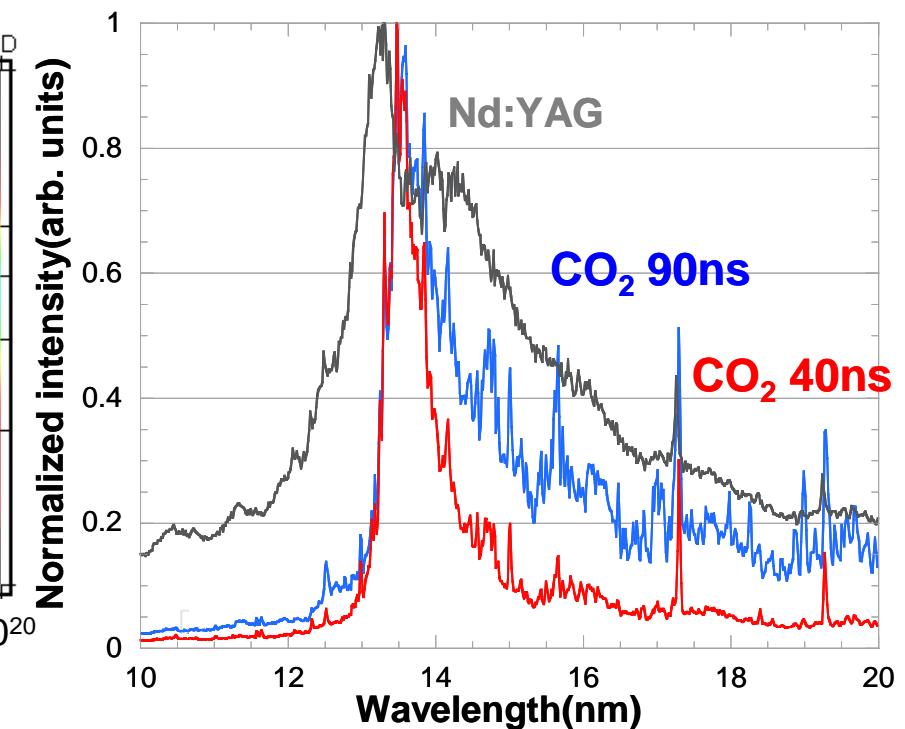
High efficiency in CO₂ laser is mainly due to spectrum narrowing peaked at 13.5 nm.



spectral efficiency (%)
(13.5 nm with 2 % band width
to total radiation)



dependence of EUV spectra
on laser wavelength and
pulse duration



Nd:YAG : $4 \times 10^{10} \text{ W/cm}^2$, 7.5 ns

CO₂ : $2 \times 10^{10} \text{ W/cm}^2$, 40 ns or 90 ns

after Shimada

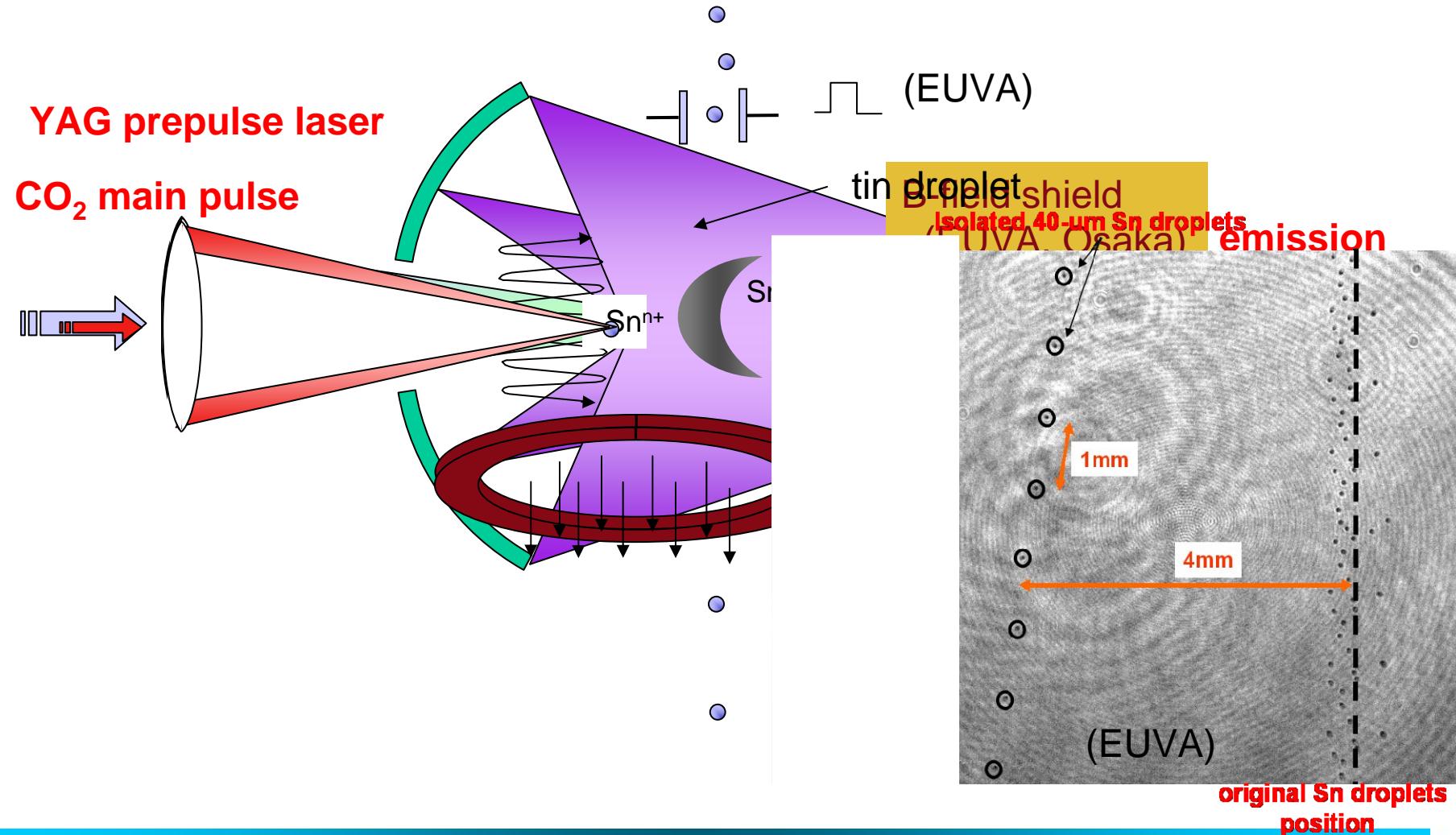


double pulse 1

We proposed double laser pulse irradiation scheme
with tin droplets in EUVL06 & EUVL07 symposiums.



concept of double pulse irradiation scheme



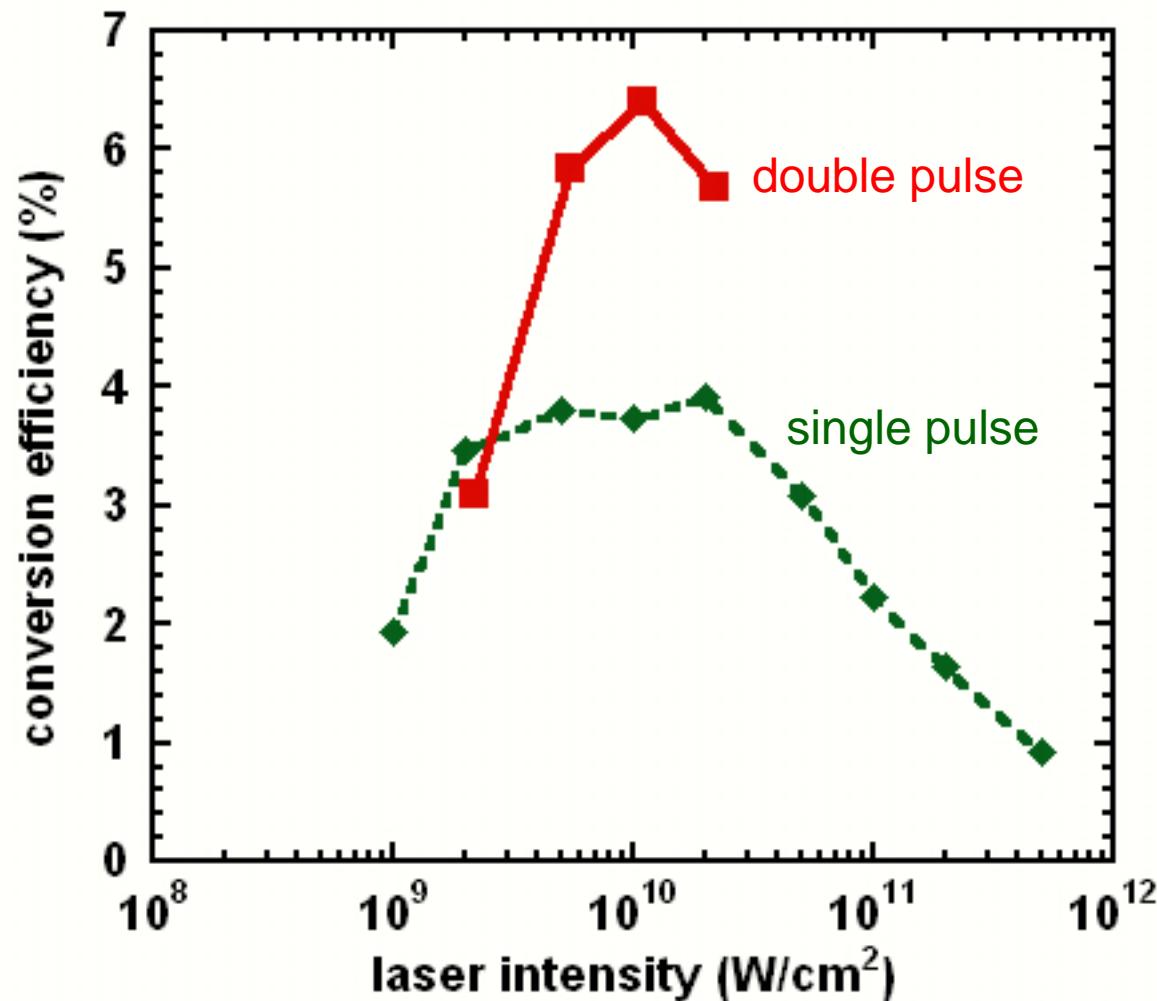
Nishihara et al SPIE08



Double pulse irradiation scheme with a droplet target Results in high conversion efficiency up to 5 – 6 %



benchmarked radiation hydro code, STAR simulation

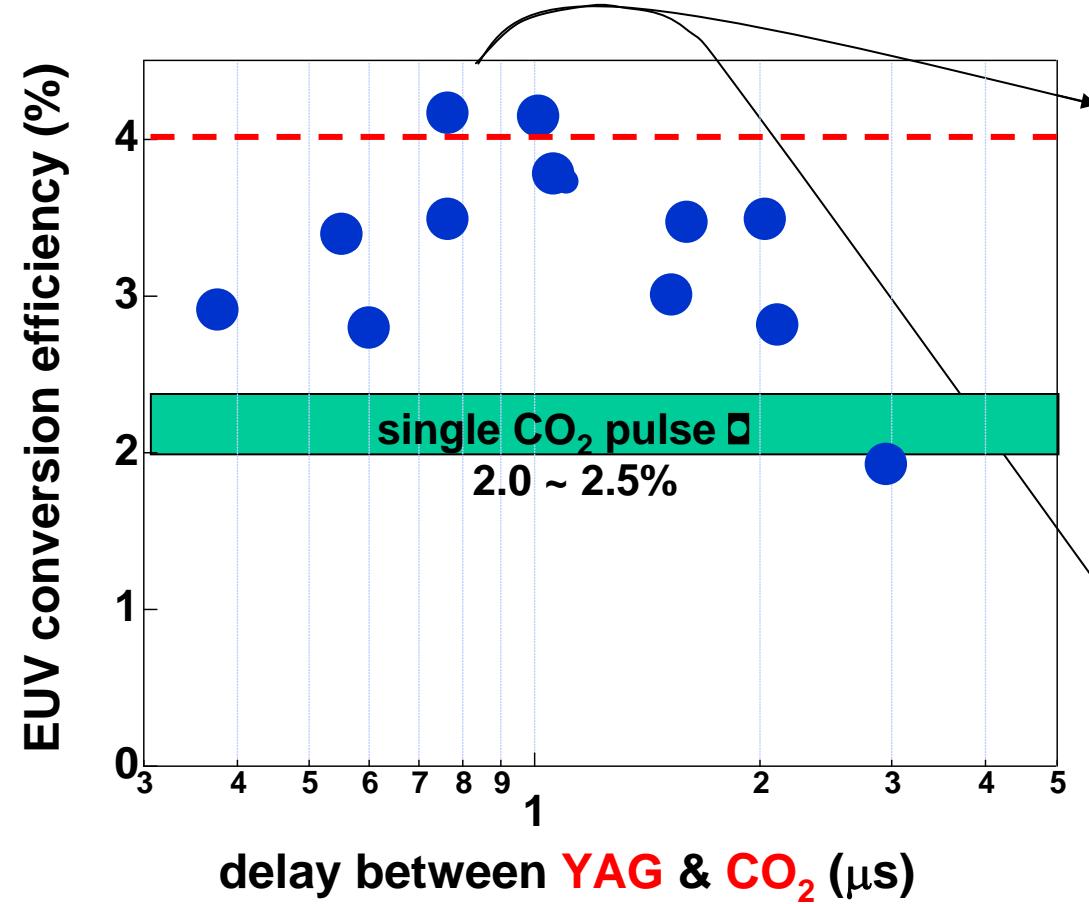


double pulse 4

CE of > 4% is obtained from $36 \mu\text{m}^{\phi}$ pure Sn droplet
in two-color lasers, double pulse irradiation scheme.

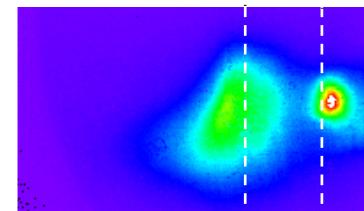
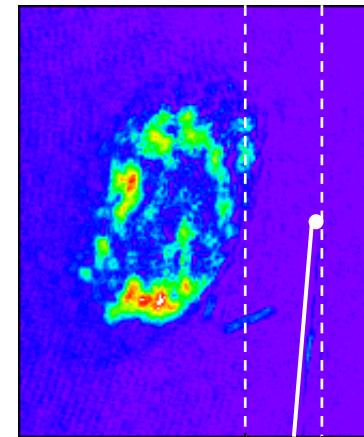


EUV-CE from two-color laser
irradiated Sn droplet



laser shadowgraph

↔ 0.3 mm



↔ 0.3 mm

monochromatic EUV image

Fujioka et al APL (08)



ダブルパルス(メインレーザー: CO₂)・スズドロプレットによる高変換効率 EUV量産光源 のパラメータ

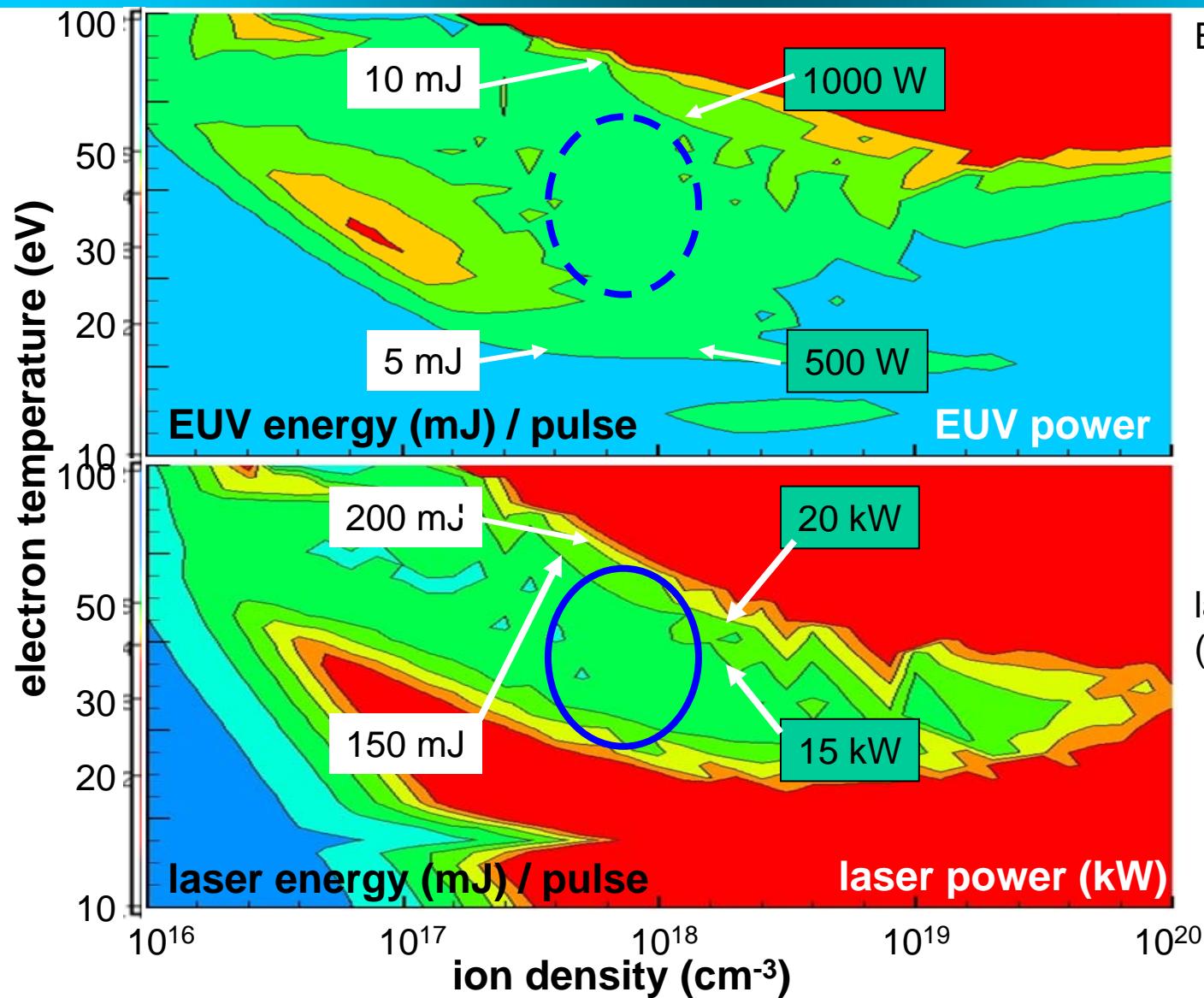


EUVA 計画	量産光源 2010年	変換効率 > 4 % 以上 (実験) (理論的予測: 5 - 7 %)
EUV パワー (中間集光点) レーザー 繰り返し 変換効率 (光源) ターゲット 安定性	110 W ¹⁾ / 140 W ²⁾ CO ₂ : 10 kW 100 kHz 4 % スズ液滴 $3\sigma < +/- 0.3 \%$	注) 光源から中間集光点までの透過率 1) 28 % スペクトル純化フィルタあり 2) 36 % スペクトル純化フィルタなし
LP成果に基づく指針	推奨パラメータ メインパルス	推奨パラメータ プレパルス
レーザー レーザーエネルギー パルス幅 レーザー強度 レーザースポット直径 レーザー出力 / 繰り返し	CO ₂ 100 mJ / pulse 20 ns $7 \times 10^9 \text{ W/cm}^2$ $300 \mu\text{m}^\phi$ 10 kW / 100 kHz	Nd:YAG 3 mJ / pulse 10 ns $4 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$ $10 \mu\text{m}^\phi$ 0.3 kW / 100 kHz



optimization 1

EUV power of 500 – 1000 W can be obtained with CO₂ laser
< 15 kW at optimized conditions (power balance model*)



EUV energy
(mJ) / pulse

laser spot size
600 μm ,
repetition rate
100 kHz

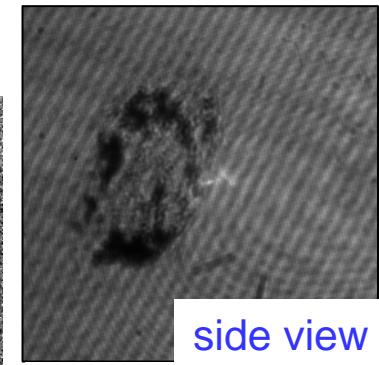
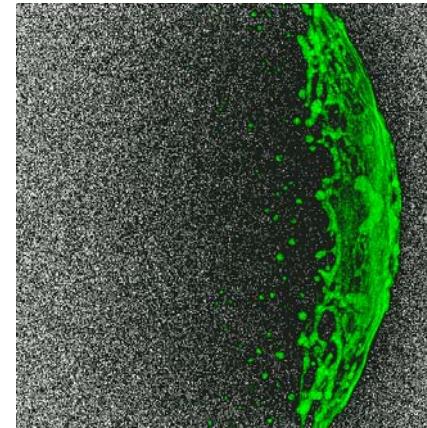
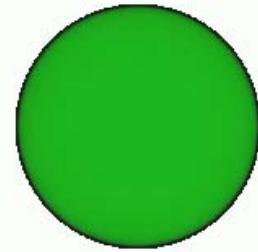
laser energy
(mJ) / pulse

*Nishihara et al EUVL04, PoP (08)

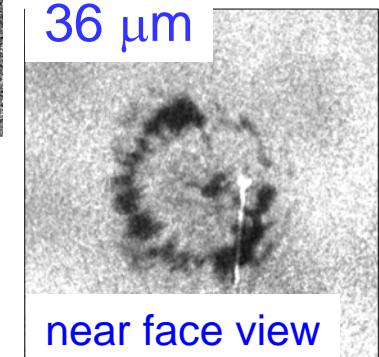
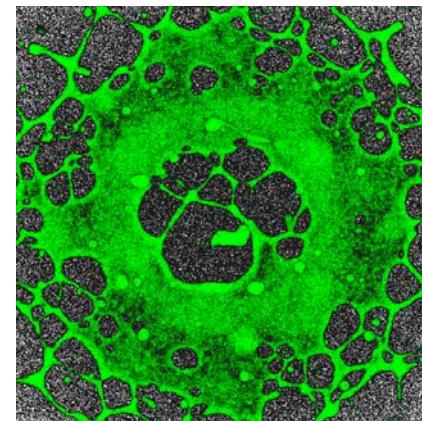


debris 1

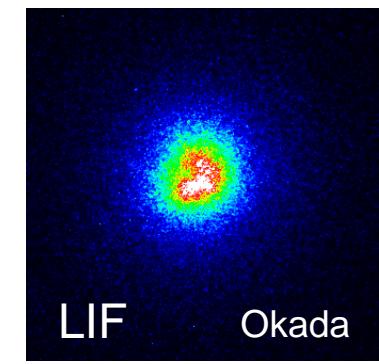
Atoms, clusters and solid states are coexisting and expands after prepulse (MD simulation)



side view



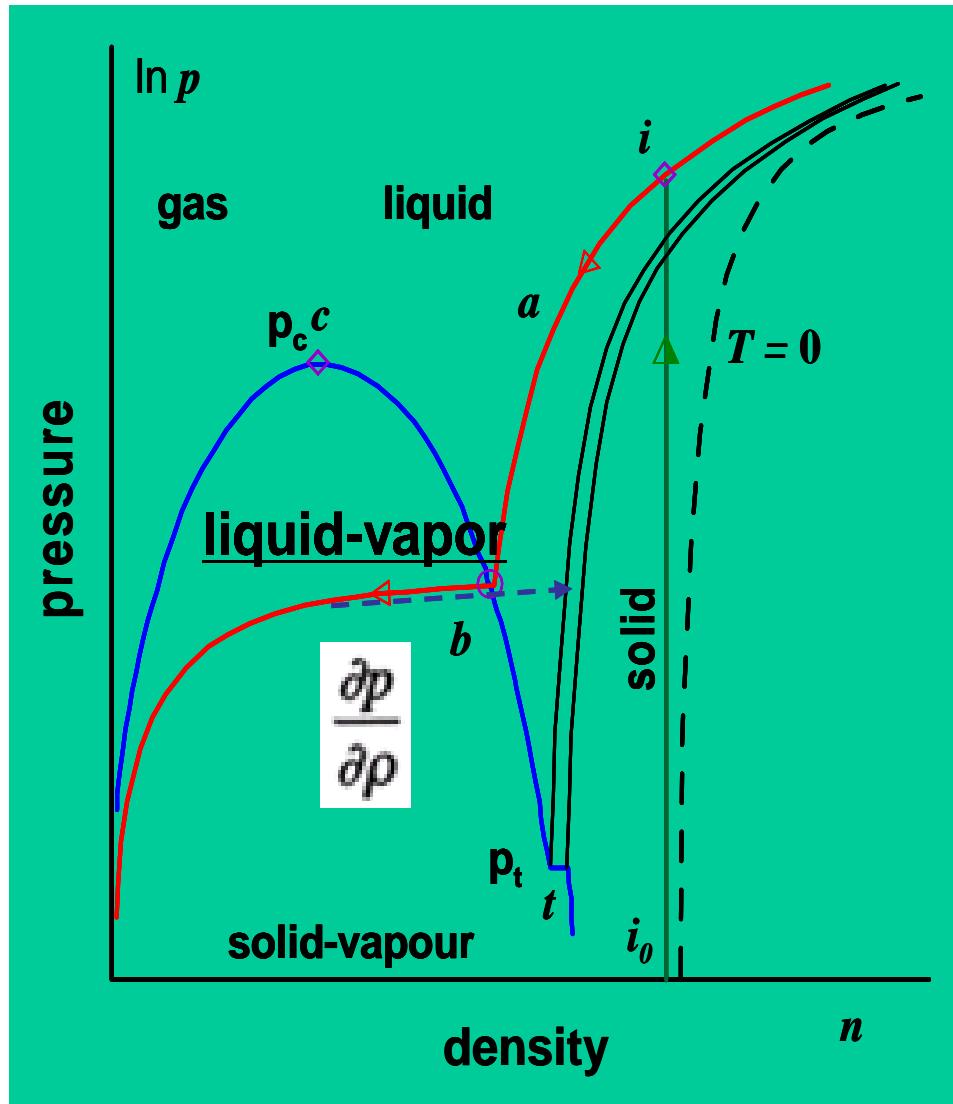
near face view



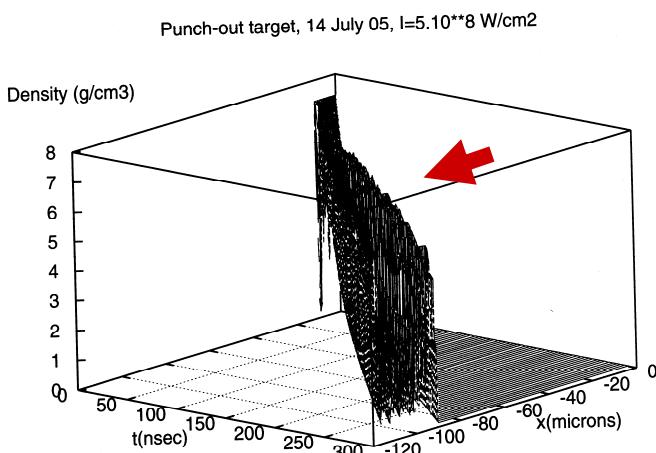
Aluminum sphere $R_0 = 57.4$ nm, $F = 0.4$ J/cm², $t = 0.4$ ps $t = 178$ ps,
after Zhakhovskii $V_{\text{shell}} \sim 560$ m/s



原子・分子物理, プラズマ物理, 気体物理, 液体物理, 固体物理 いづれもそのダイナミックスを記述するには不十分??



液相・気相混合
状態方程式





目的: LPP-EUV光源の物理を解明し、実用化への指針を与える
(光源の要求用件: 光源の出力 115W (2%BW)など)

原子過程・理論モデリング関連の研究者数・研究機関数

- ・ 理論 12名 (9機関) 実験 5名 (3機関)

光源プラズマ実験・レーザー開発・ターゲット制作用等の研究者数・研究機関数

- ・ 22名 + 約10名 (5機関)

PIが明確で強いリーダーシップが可能
年度ごとの明確な目標設定
ニーズとシーズ、および分担課題が明確
課題によって必要な・多様な参加者を得た
参加者間(大学・企業)で問題点を共有

研究作業会・データ検討会など

- ・ 理論グループ 2日作業会 / 2ヶ月 + 夏の合宿
- ・ 実験グループとの打ち合わせ・データ検討会(阪大内:1回 / 2-3週間)
- ・ EUVA(経産省プロジェクト)との開発技術委員会 (1回 / 2ヶ月) + 合宿
- ・ 年度ごとに 年度計画書 ・ 成果報告会 ・ 成果報告書

EUV光源開発研究については未経験者ばかりであったが、
自分の課題として、その基盤となる基礎研究を行い、実力を培っていた



- ・ 多様なニーズへの対応が可能か？
開発のフェーズによって、ニーズや企業からの機密要望が異なってくる

PDP: 実用化され、コスト削減、効率向上などの競争が激しい

EUV: 実用化が見込まれるが、最終的な仕様が未確定

? : 新しいニーズを掘り起こす可能性がある

ニーズをはっきりさせる

- ・ 課題ごとに、必要な研究者を集めることが出来るか？
(離合集散)
- ・ 適切なPI (Principal Investigator) を設定し、分担を明確に出来るか？

研究者は、基本的には学問的に新しいこと(計測手法を含め)しかやらない！

Interpreter が必要
関係者間での問題点などを共有できるか？

中長期的な取り組みを明確に

- ・ 1-2年以内
- ・ 3-5年

