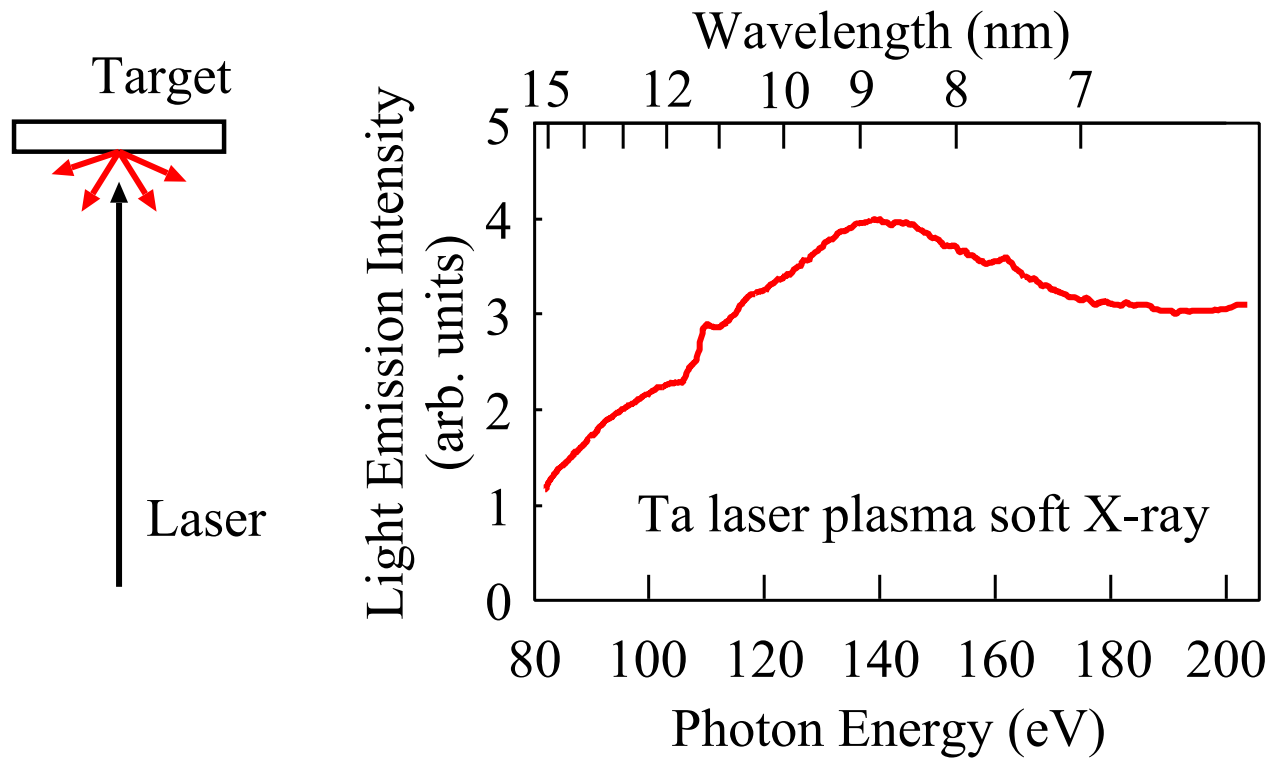


狭帯域レーザープラズマ軟X線の発生と 無機材料のマイクロ・ナノ加工

筑波大学 数理物質系 物理工学域
牧村哲也

レーザープラズマ軟X線

レーザープラズマ軟X線: ターゲット材料にレーザー光を照射
プラズマからの軟X線発光



無機材料の高い解像度での光直接加工が期待できる。

無機材料のマイクロ・ナノ加工

微小化学分析デバイス

材料

- 光学的検出,薬品耐性 → 合成石英(シリカガラス)
- プラスチックを用いるとしても, 金型を作製する必要がある。

微小化のメリット

- 微量の試料, 高速, 廃液が少ない

送液の制御, 3次元集積化 直径 $10\mu\text{m}$ の流路, 貫通孔の作製が重要。

- $10\mu\text{m}$ 以下の流路では表面張力のため送液の制御性がない。
- 1mm 以上では微小化のメリットがない。

従来の加工技術 貫通孔の作製は特に困難。

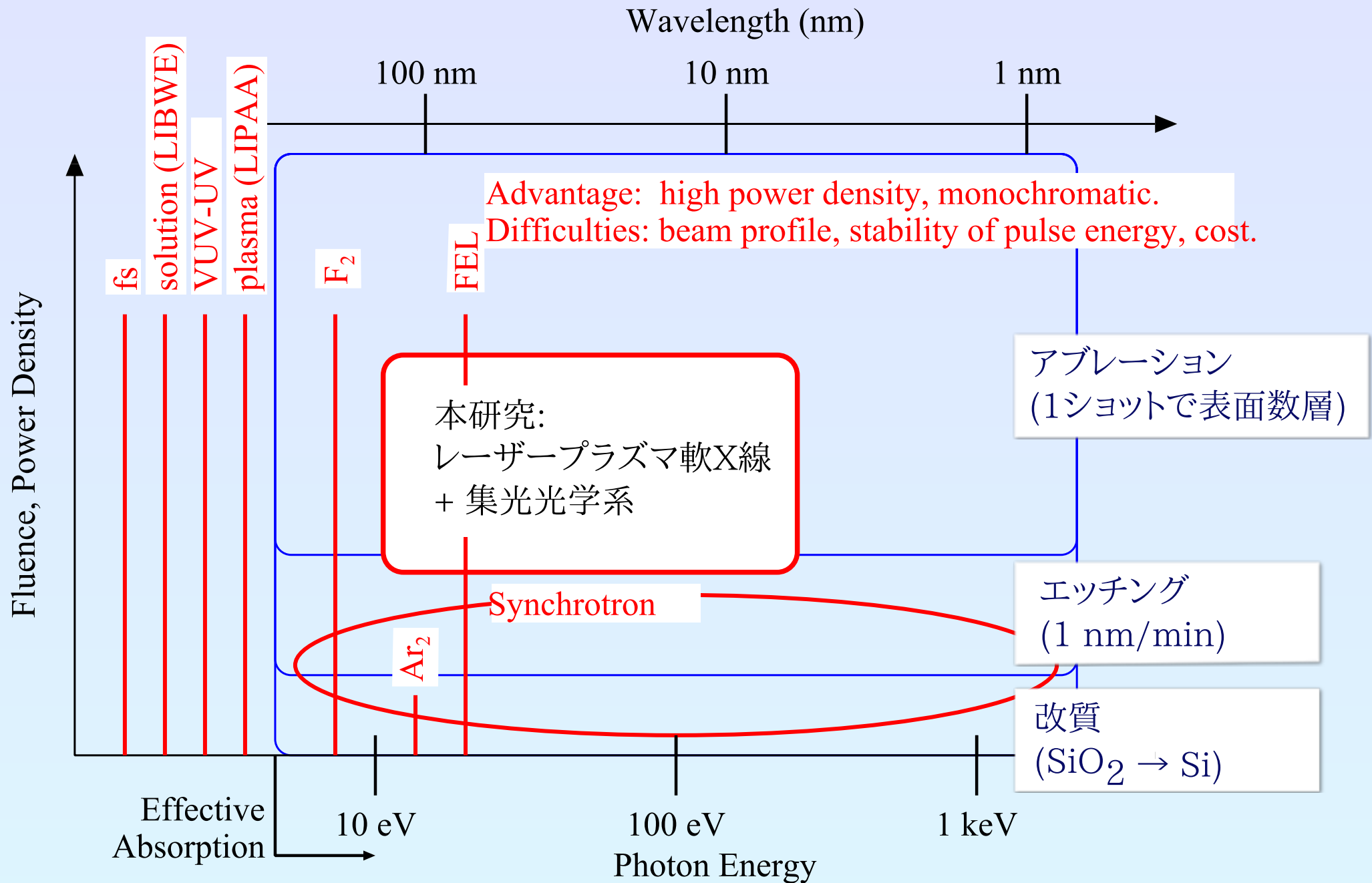
- 半導体技術(反応性イオンエッチング): 精密な $10\mu\text{m}$ の深さの加工は困難。
- 機械加工: $100\mu\text{m}$ より精密な構造は困難。

問題点

- 現実的なコストでの作製が困難。

→短波長光による直接加工が有望

先行研究: シリカガラスの光加工

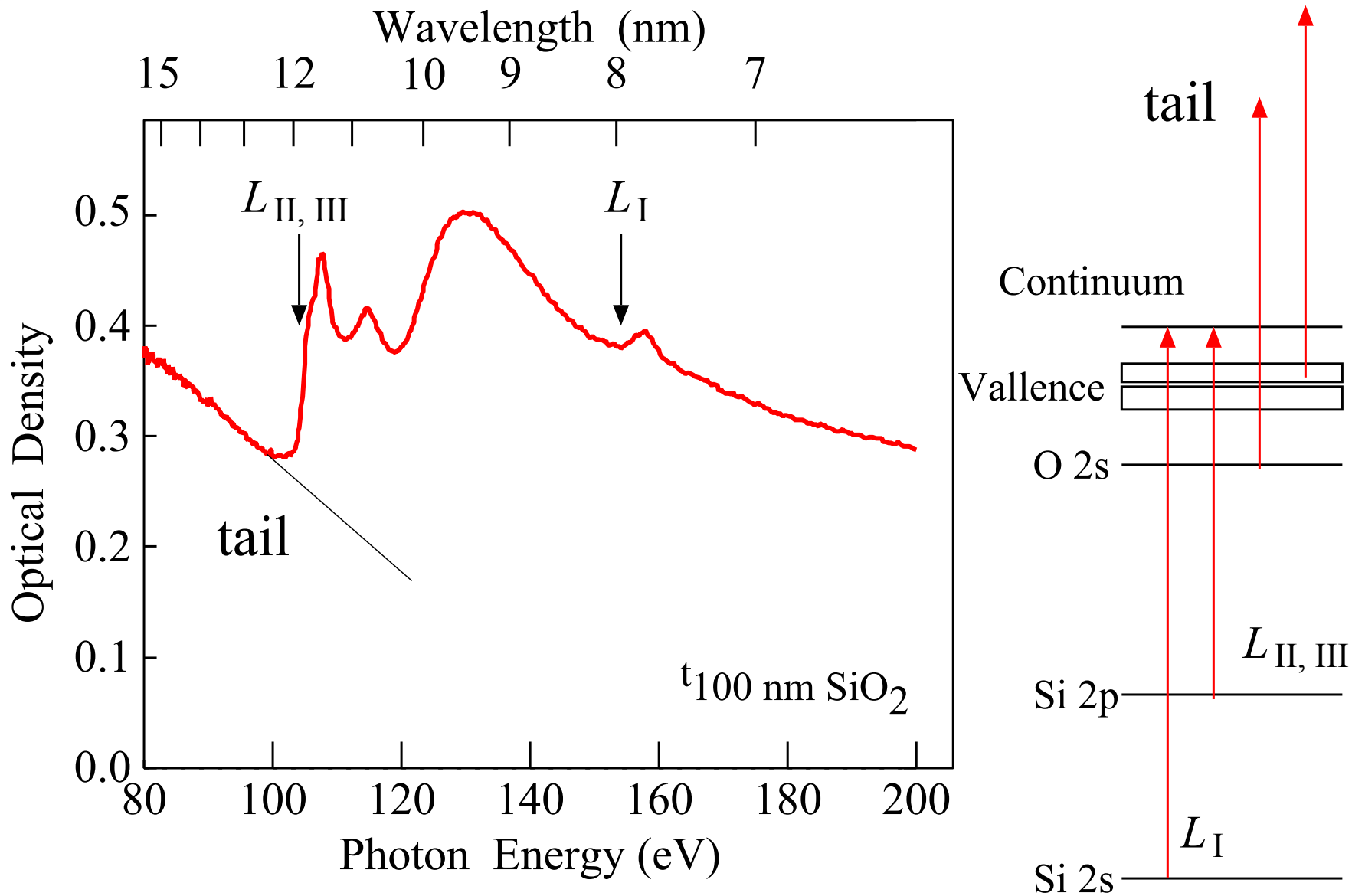


微細な構造の光加工は困難であった。

マイクロ・ナノスケールでの光直接加工のための戦略

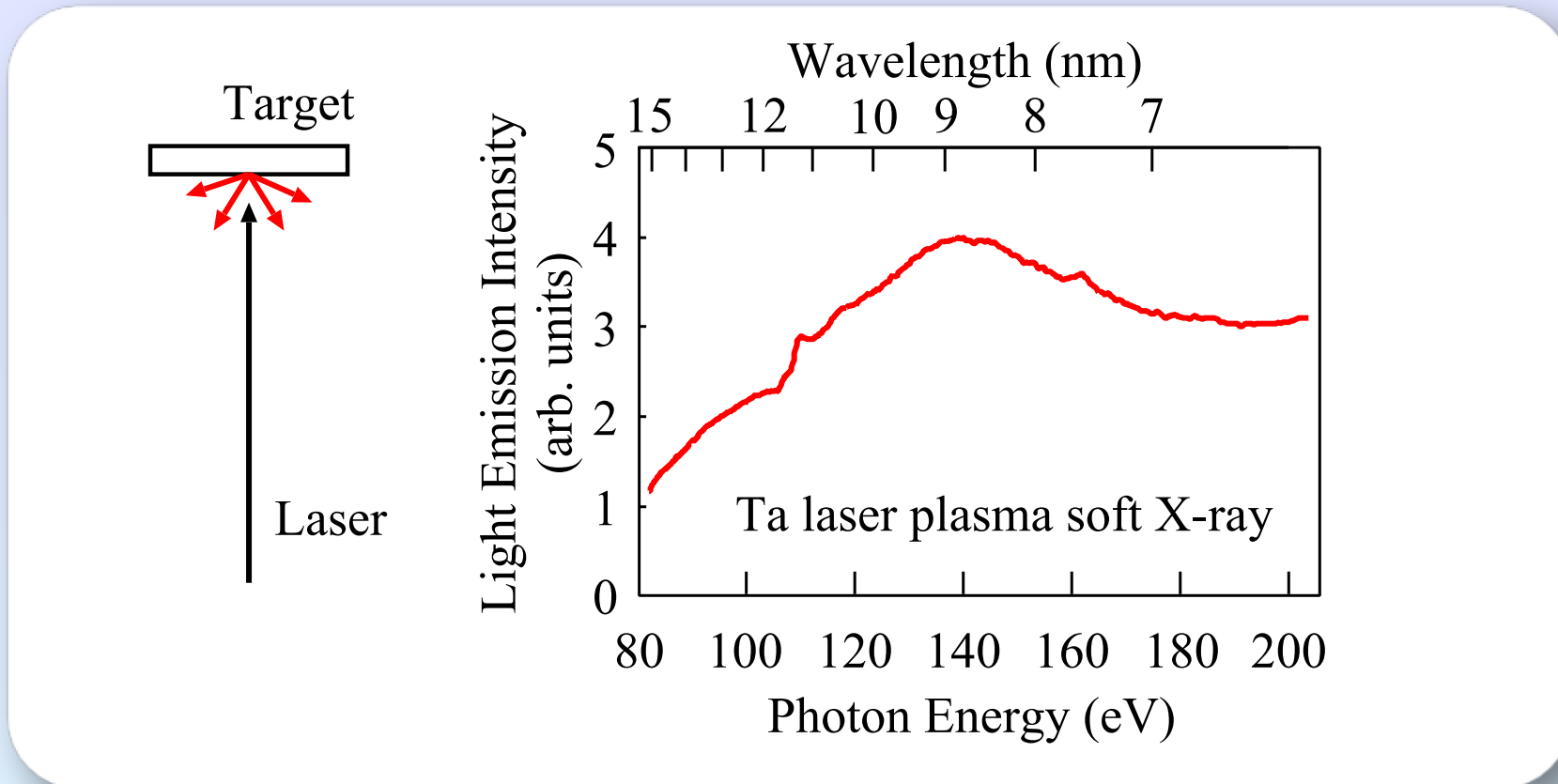
- 波長
- 光源
- 光学系

微細加工に適した波長領域



Siを含む材料では100 eV が適する。より高エネルギーでは吸収が減少する。

光直接加工のための軟X線源



軟X線源

コスト, 輝度の観点からレーザープラズマ軟X線を採用

集光光学系

広い波長域の軟X線を集光するため斜入射型の光学系を採用。
(EUVリソグラフィの多層膜ミラーでは 13.5 ± 1.0 nmのみ集光)

狭帯域レーザープラズマ軟X線の発生とシリカガラス (SiO_2) のマイクロ・ナノ加工

- 軟X線加工装置の開発
(a) 軟X線源, (b) 集光光学系
- Nd:YAG \rightarrow Ta : 約10 eV (150 nm) から 200 eV (6 nm)
(a) マイクロ加工, (b) ナノ加工
- Nd:YAG \rightarrow Ta/Arフィルター: 40 eV (30 nm) から 200 eV (6 nm)
- $\text{CO}_2\rightarrow$ Sn (92 eV, 13.5 nm), $\text{CO}_2\rightarrow$ Xe (113 eV, 11 nm)

軟X線照射装置

Target: (a) Ta, (b) Sn, (c) Xe

Driver Laser:

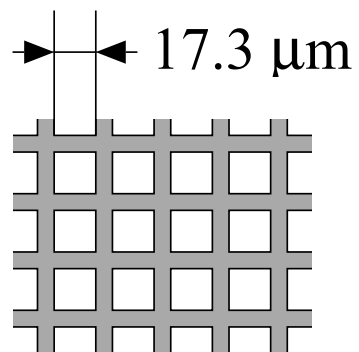
(a) Nd:YAG

(10 ns, 532 nm, 700 mJ/pulse)

(b) CO₂

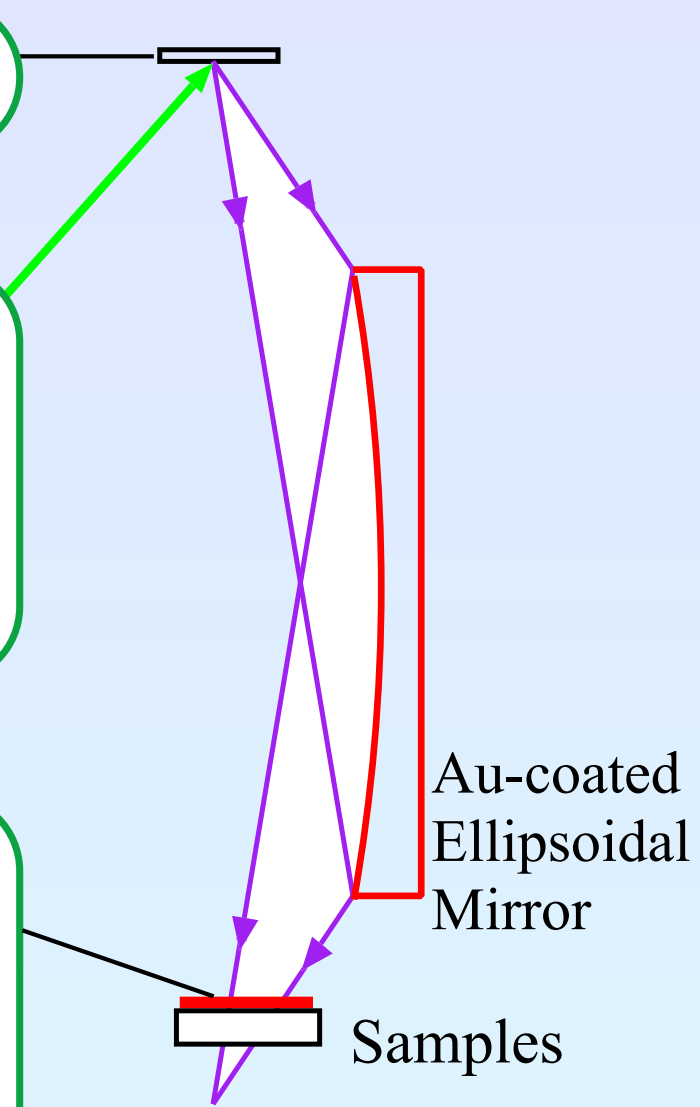
(50 ns, 10.6 μm, 500 mJ/pulse)

A Ni Contact Mask
with Square Apertures



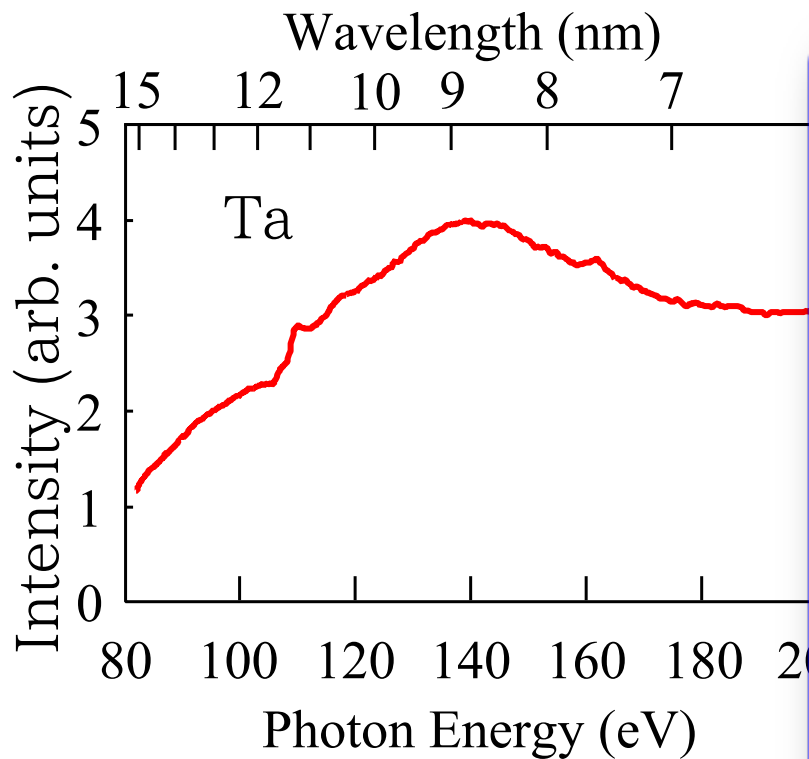
Au-coated
Ellipsoidal
Mirror

Samples

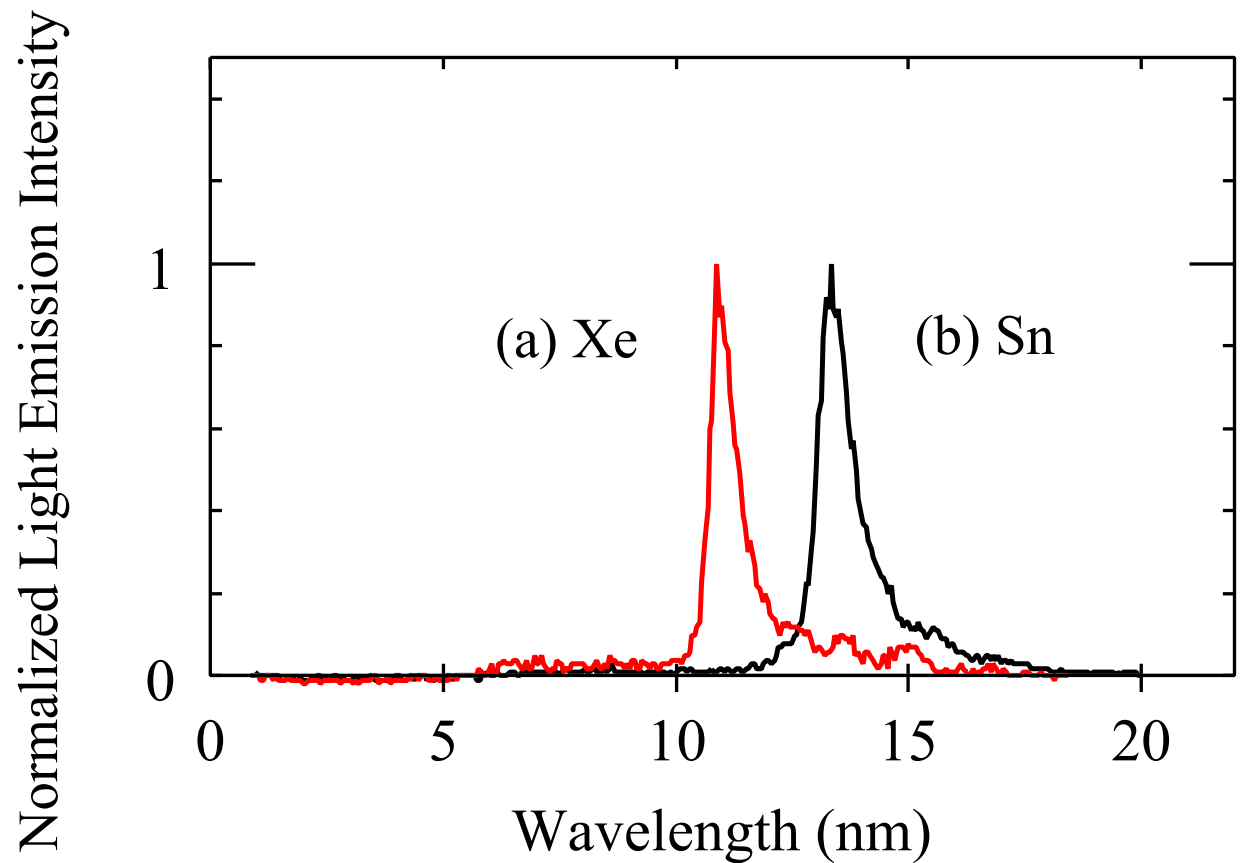


軟X線源の開発

Nd:YAG (10 ns, 700 mJ/pulse)

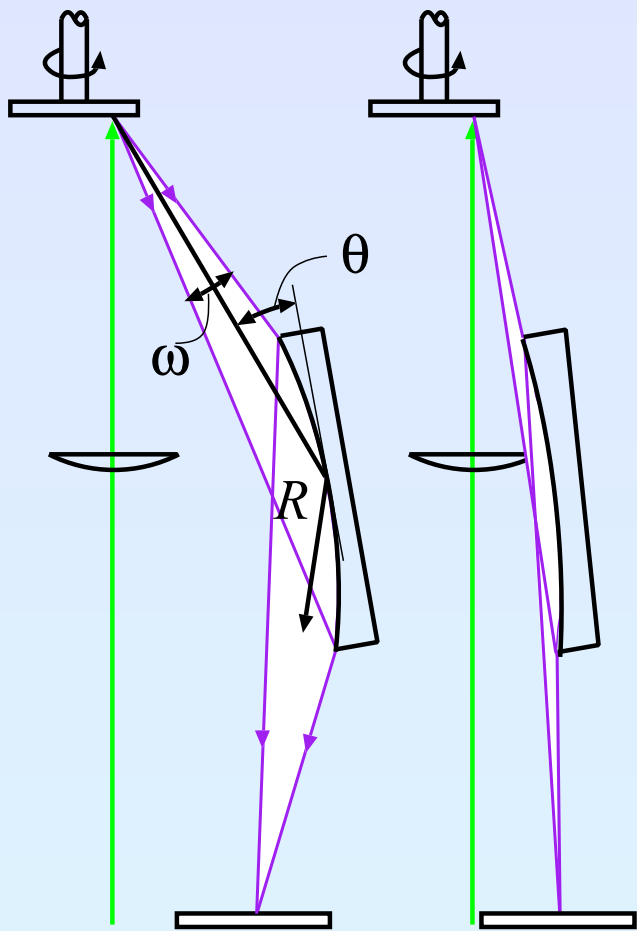


CO₂レーザー(50 ns, 500 mJ/pulse)

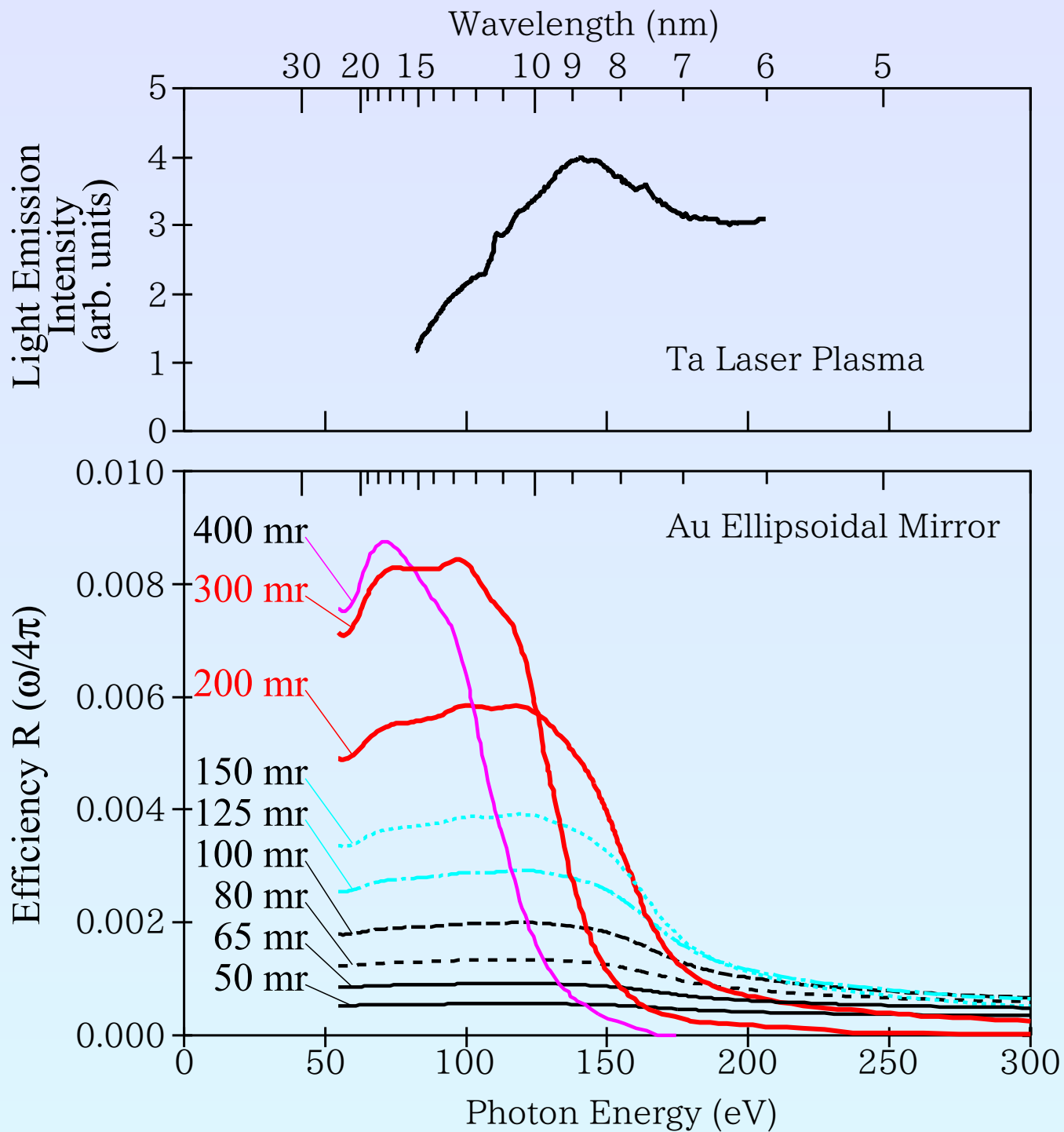


集光光学系の開発

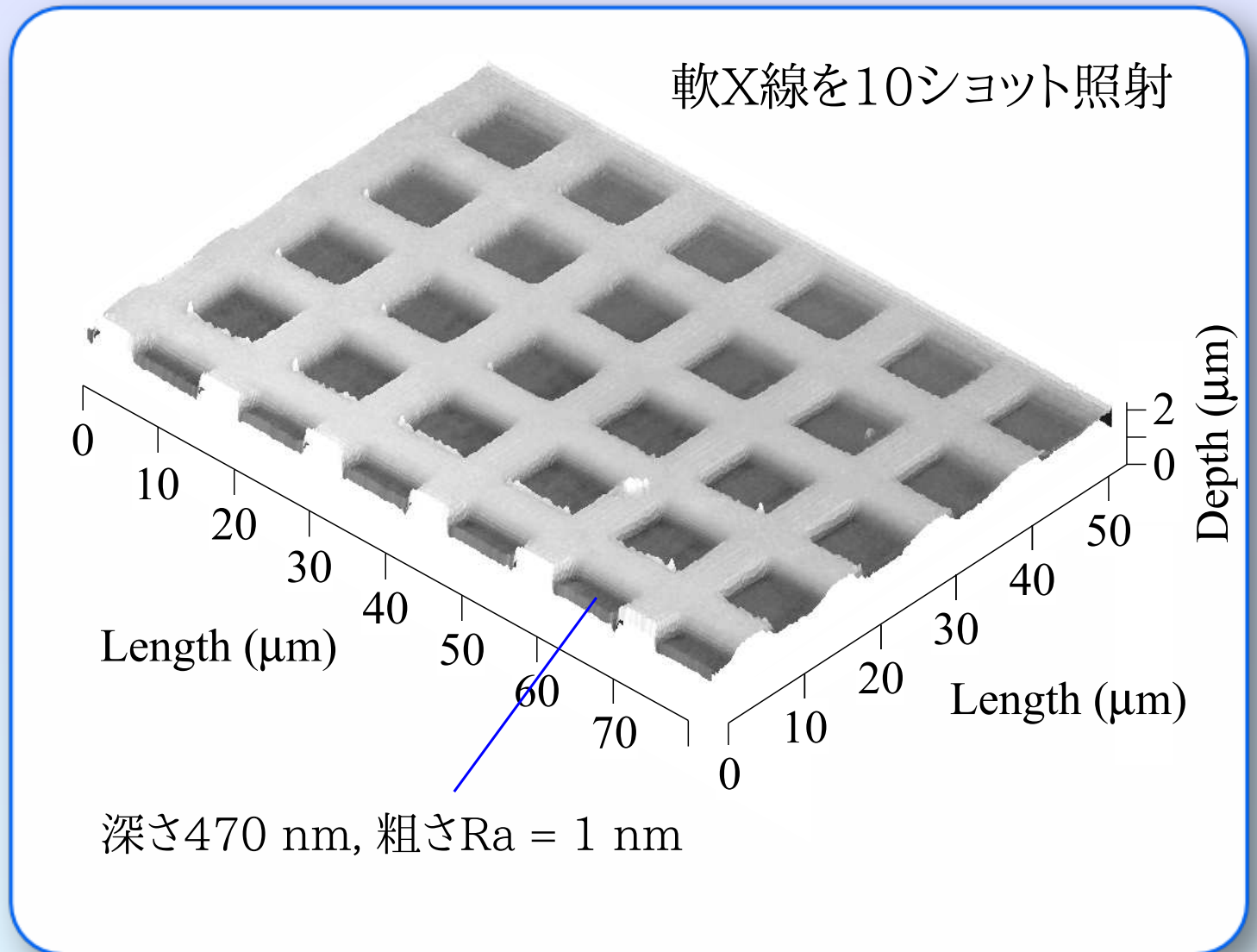
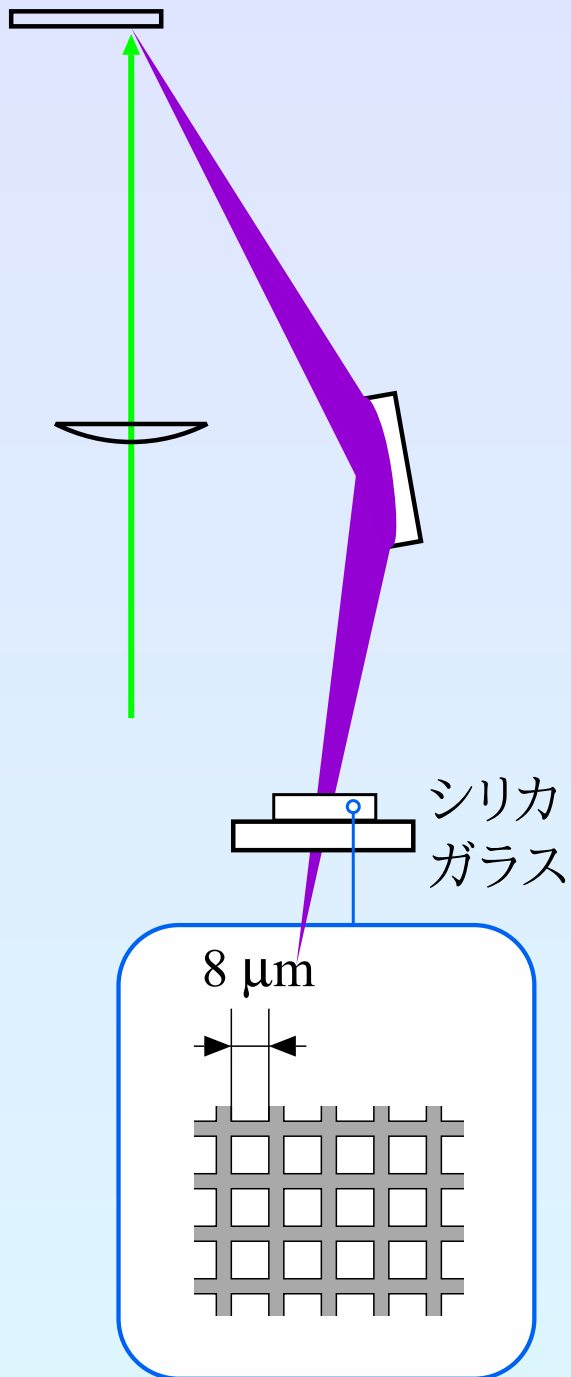
入射角 θ を小さくすると



反射率 R は高くなるが、
立体角 ω が小さくなる。

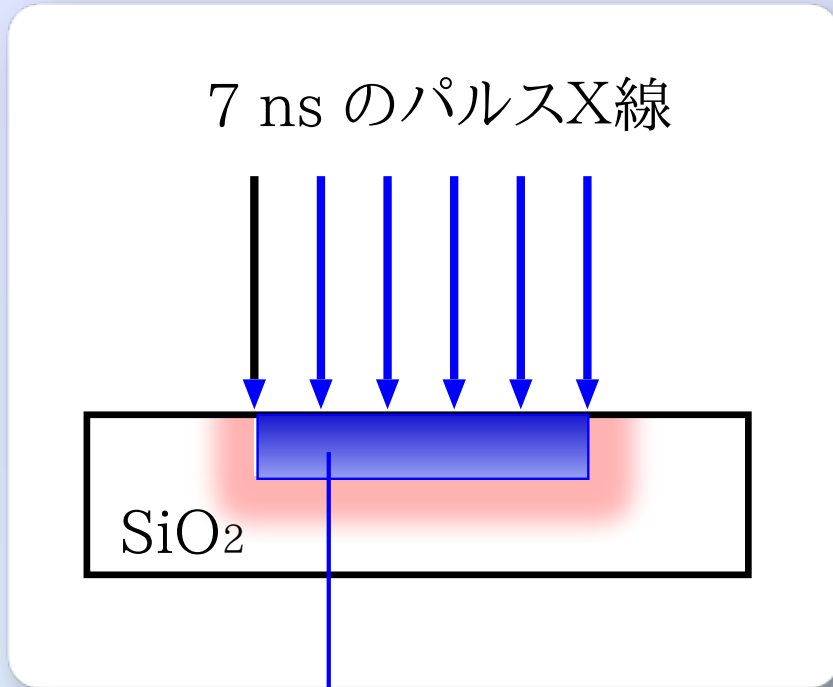


レーザープラズマ軟X線による直接加工



レーザープラズマ軟X線による光直接加工を実現した。

アブレーションプロセス1



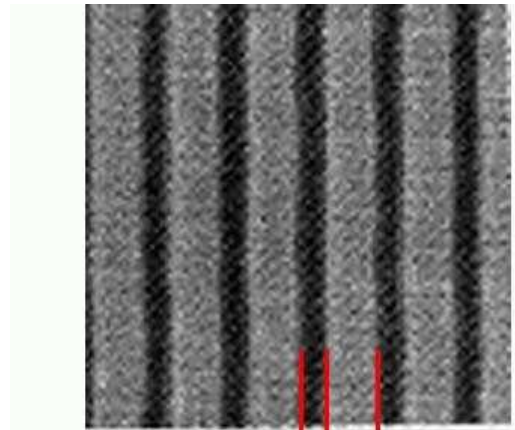
$1/\alpha_{\text{eff}} = 10 \text{ nm} \rightarrow$ エネルギー密度 55 kJ/cm^3



$1/\alpha = 100 \text{ nm}$ と比較し

効率が高いアブレーション過程を見出した。

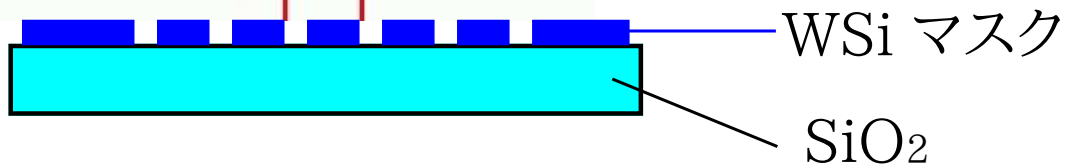
ナノ加工の可能性



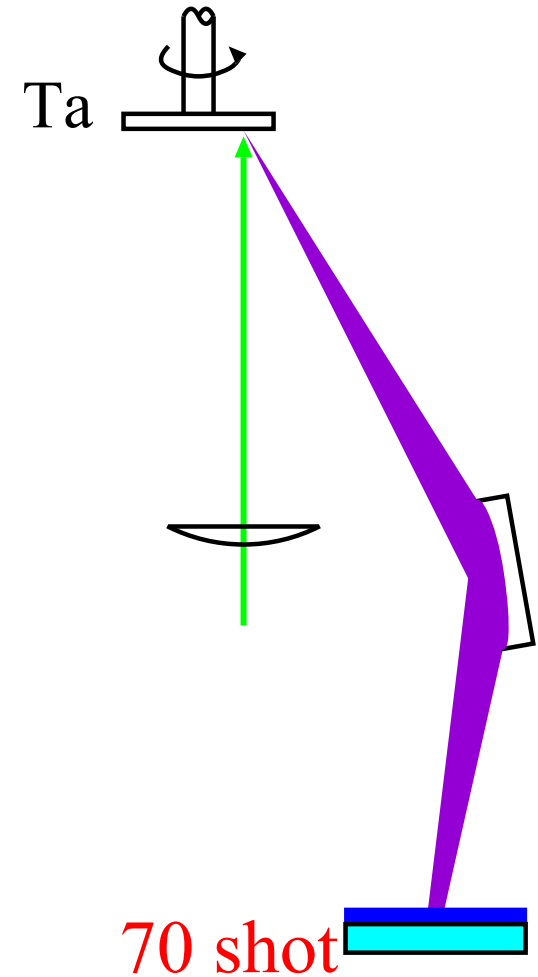
(1) 電子ビーム
リソグラフィーにより
WSi マスクを作製

space: 53 nm

pitch: 175 nm



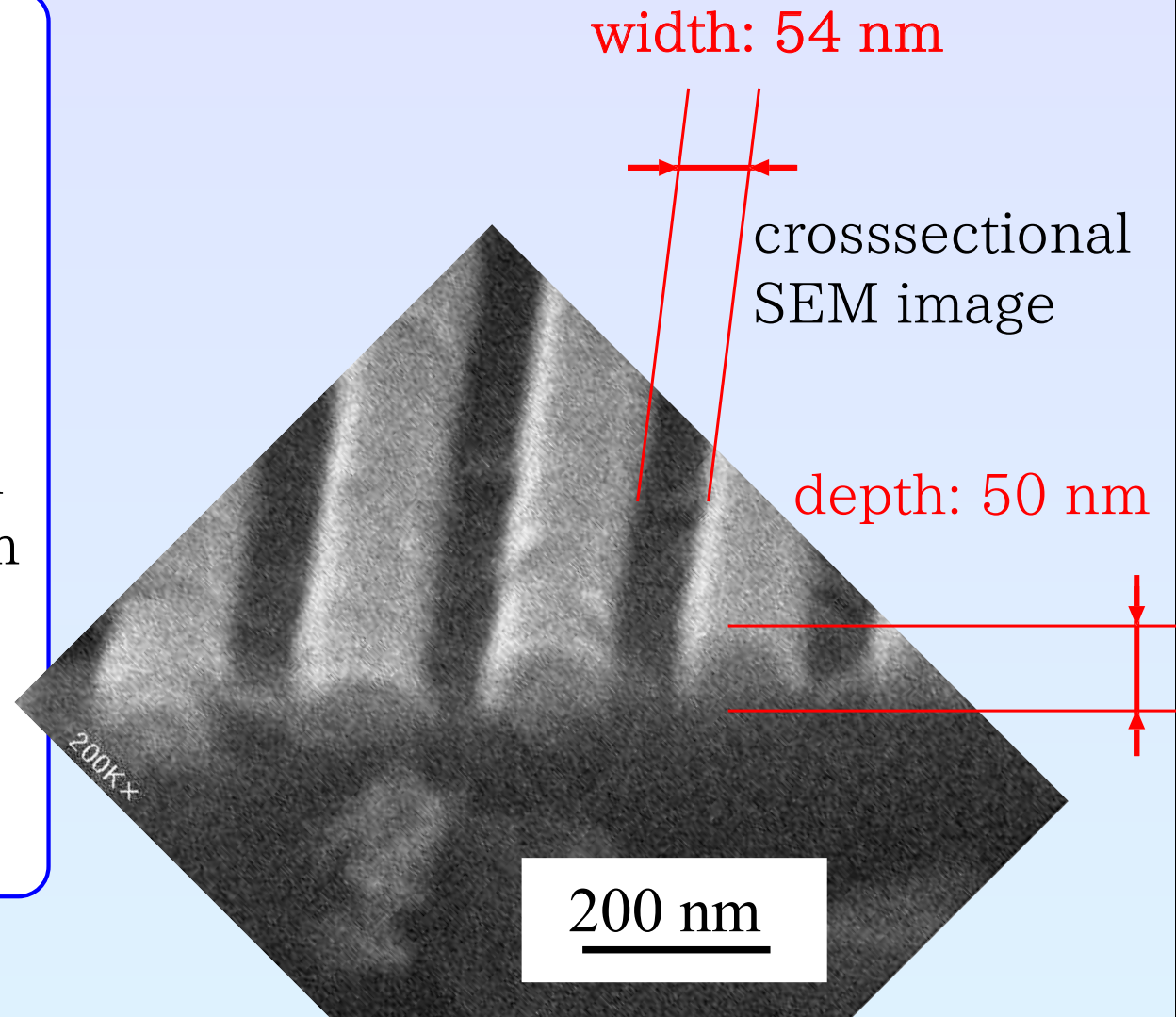
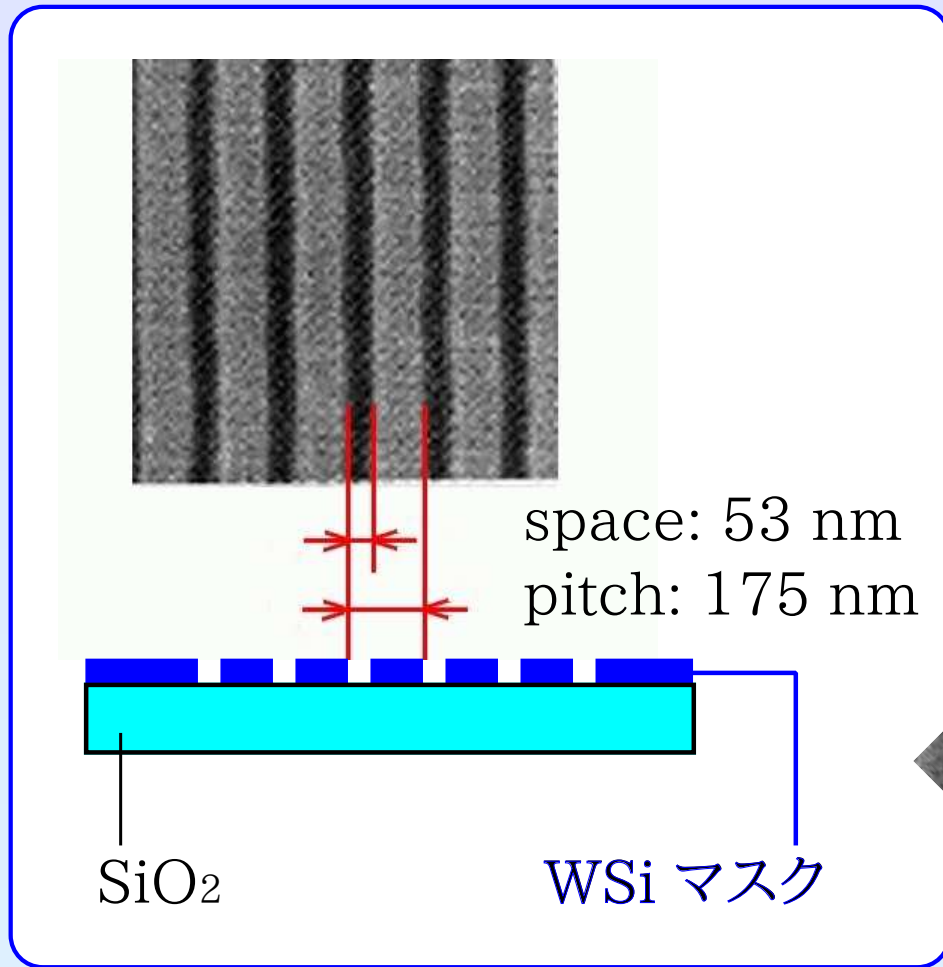
(2) X線を照射



(3) 反応性イオンエッチングにより
WSi マスクを除去



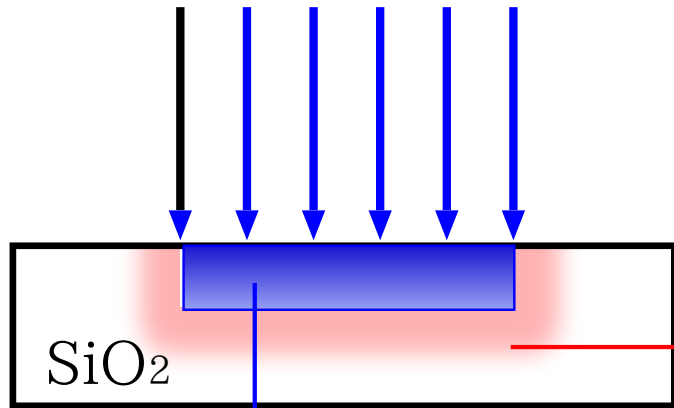
ナノ加工



ナノ加工の可能性を明らかにした.

アブレーションプロセス2

7 ns のパルスX線



$$\text{熱拡散長} = \sqrt{D\tau} = 80 \text{ nm}$$

50 nm のトレンチが作製できる
→ 熱拡散より速くアブレーションする。

$1/\alpha_{\text{eff}} = 10 \text{ nm}$ → エネルギー密度 55 kJ/cm^3

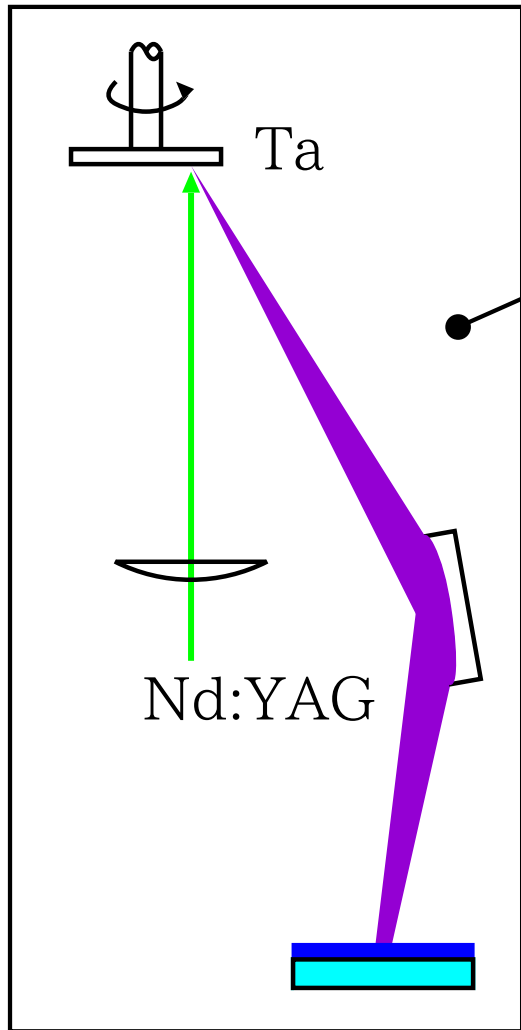


$1/\alpha = 100 \text{ nm}$ と比較し
効率が高いアブレーション過程を見出した。

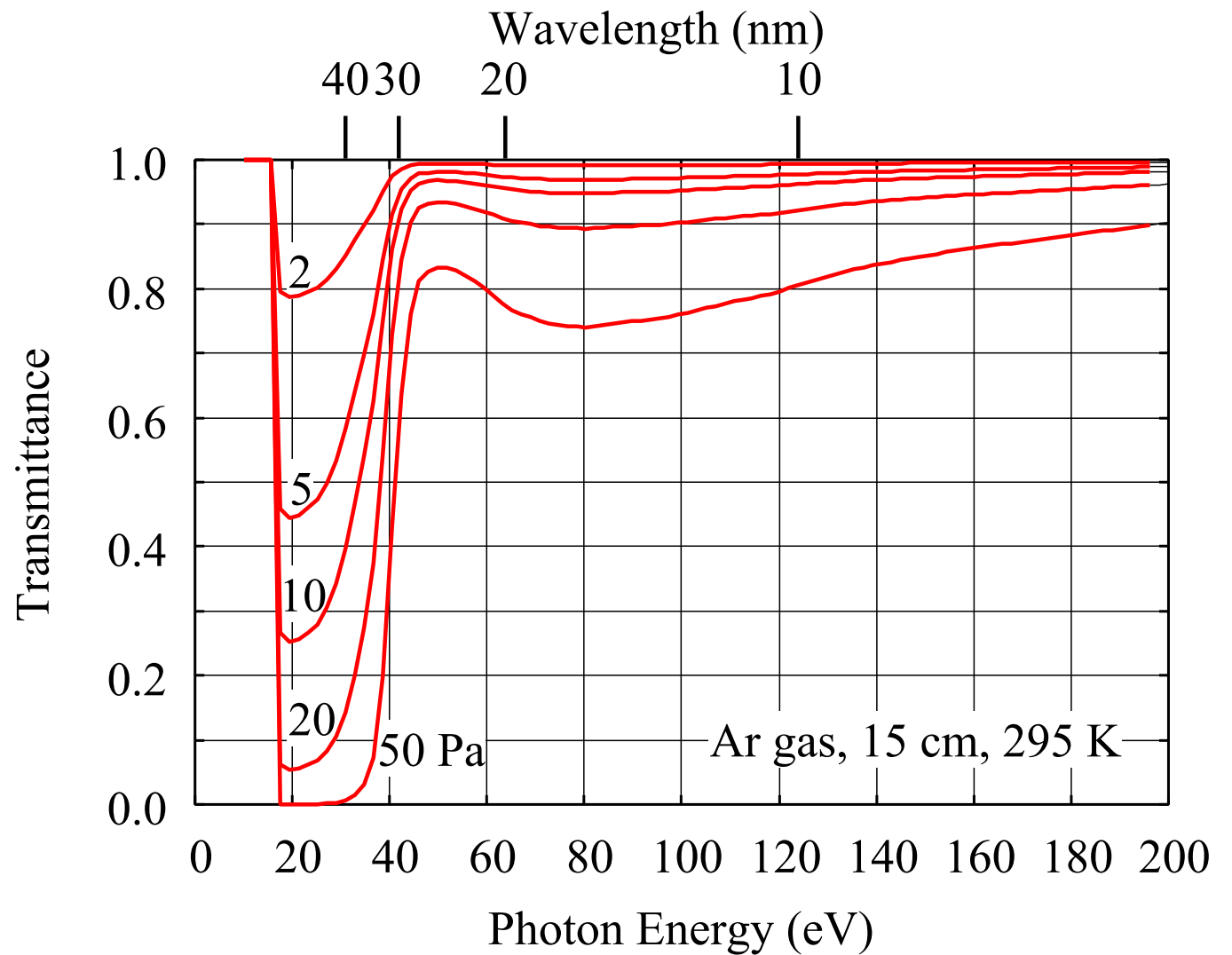
狭帯域レーザープラズマ軟X線の発生とシリカガラス(SiO_2)のマイクロ・ナノ加工

- 軟X線加工装置の開発
(a) 軟X線源, (b) 集光光学系
- Nd:YAG \rightarrow Ta : 約10 eV (150 nm) から 200 eV (6 nm)
(a) マイクロ加工, (b) ナノ加工
- Nd:YAG \rightarrow Ta/Arフィルター: 40 eV (30 nm) から 200 eV (6 nm)
- $\text{CO}_2\rightarrow\text{Sn}$ (92 eV, 13.5 nm), $\text{CO}_2\rightarrow\text{Xe}$ (113 eV, 11 nm)

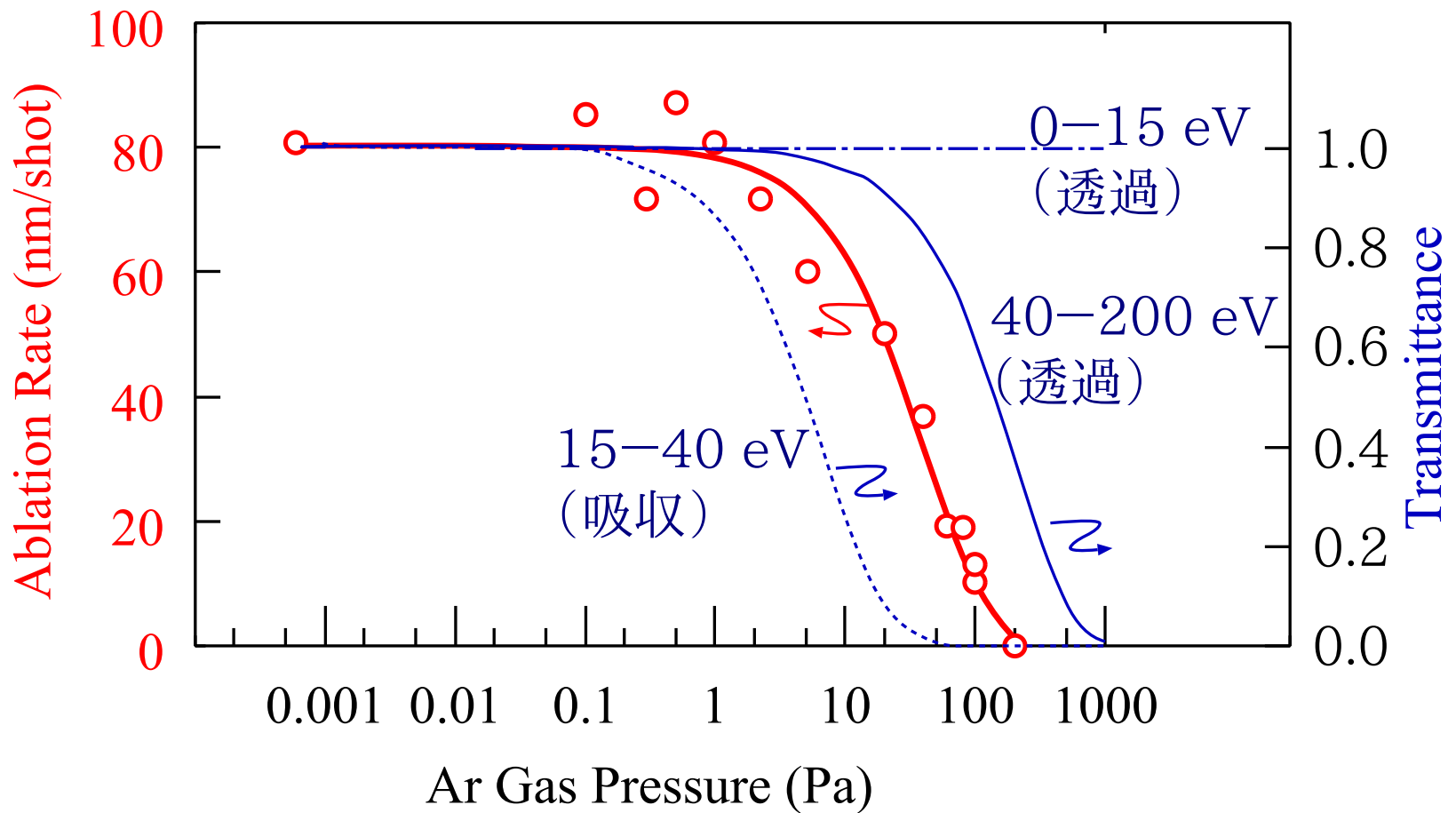
Arガスフィルターによる波長選別



ガス中でX線を照射



Arガス中での軟X線照射



40 eV (30 nm) から 200 eV (6 nm) の軟X線による光直接加工が可能であることを示した。

狭帯域レーザープラズマ軟X線の発生とシリカガラス (SiO₂) のマイクロ・ナノ加工

- 軟X線加工装置の開発
 - (a) 軟X線源, (b) 集光光学系を開発した.
- Nd:YAG→Ta : 約10 eV (150 nm) から 200 eV (6 nm)
 - (a) マイクロ加工
150 nm/shotの高いレート. 500 nm 加工したときRa=1 nm.
 - (b) ナノ加工
50 nm のトレンチを作製できた.
- Nd:YAG→Ta/Arフィルター: 40 eV (30 nm) から 200 eV (6 nm)
アブレーション加工が可能であることを示した.
- CO₂→Sn (92 eV, 13.5 nm), CO₂→Xe (113 eV, 11 nm)
パワー密度が重要なことを示した.
閾値程度のパワー密度であった.

- 加工装置

CO₂レーザーを開発中. パワー密度で5倍.
Ru集光光学系を開発済. 集光効率を4倍.

本手法の特徴: 広い加工対象, 貫通孔を含めた高アスペクト加工

- 微小化学分析器, バイオチップの加工法として

シリカガラス, PDMS(シリコーンゴム), PMMA(アクリル樹脂)の加工.

- マイクロメートルのスケールの金型

PMMAを加工し, Niをメッキすることにより金型を作製.