



東北大学

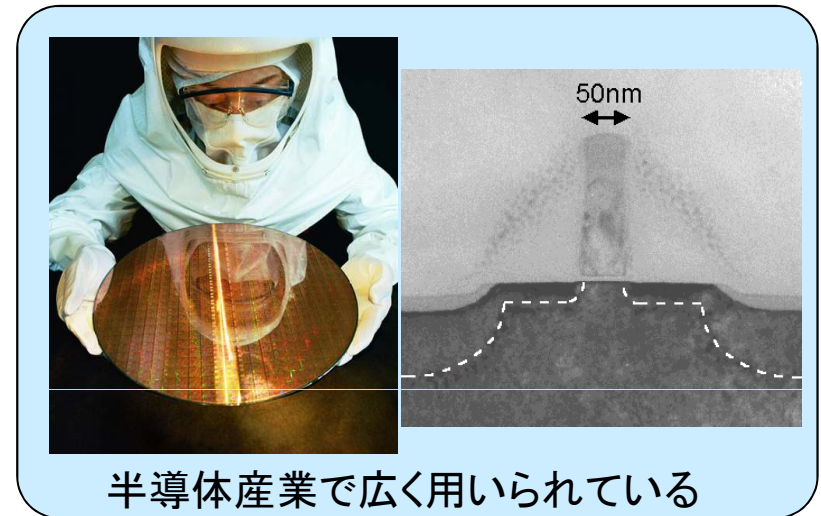
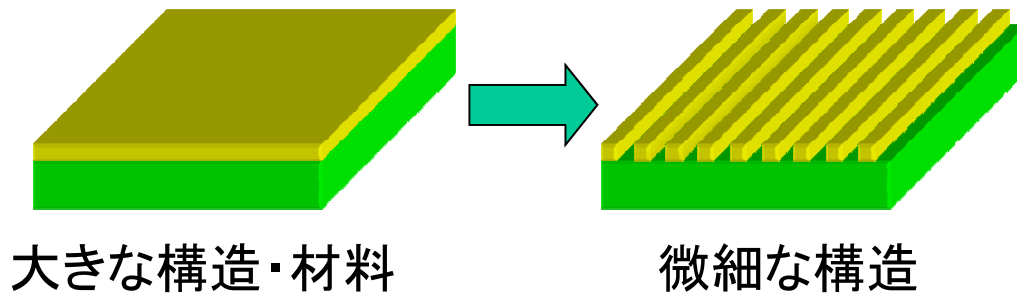
超低損傷・中性粒子ビームエッチング

東北大学・流体科学研究所
寒川誠二



トップダウンプロセス

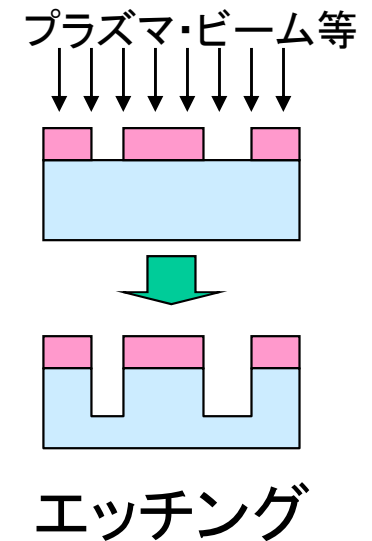
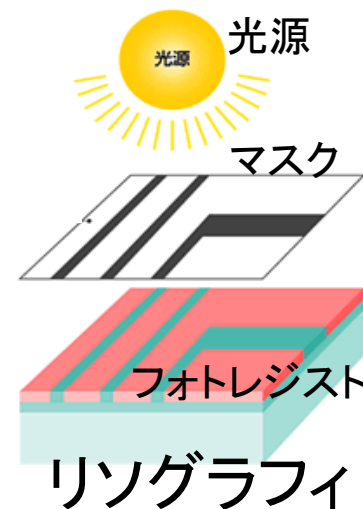
膜や基板などの材料を削ることで微細な構造を作製する手法



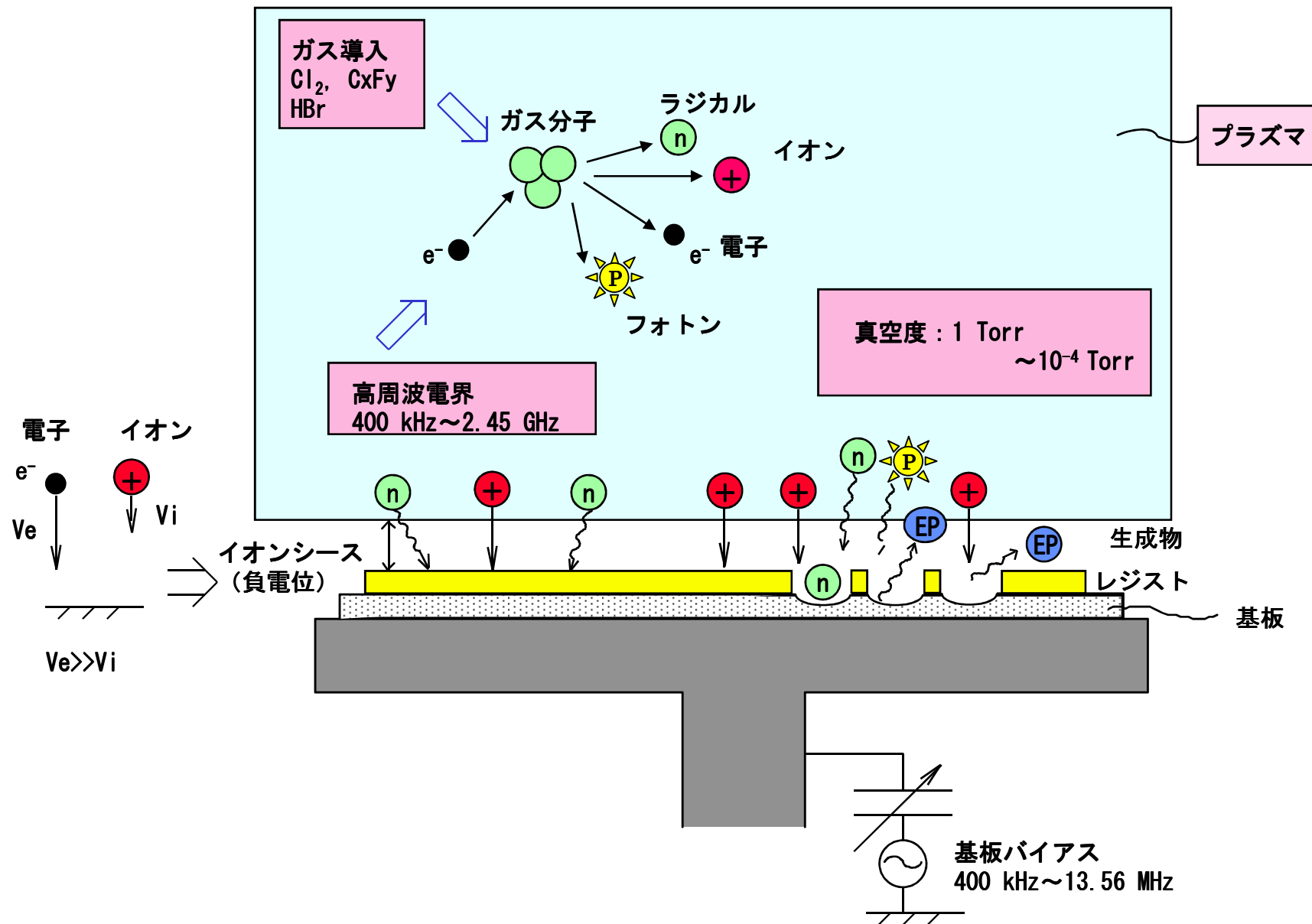
用いられる手法

リソグラフィ: 光や電子により所望の
パターンを描画する

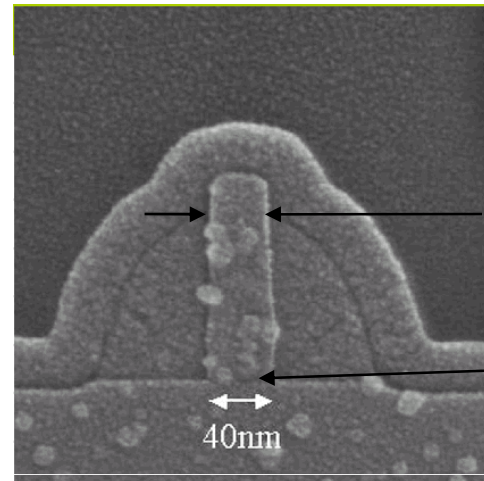
エッチング: リソグラフィが描画した
パターンの通りに材料を削る



プラズマエッチングとは？



現状のプラズマプロセス加工レベル

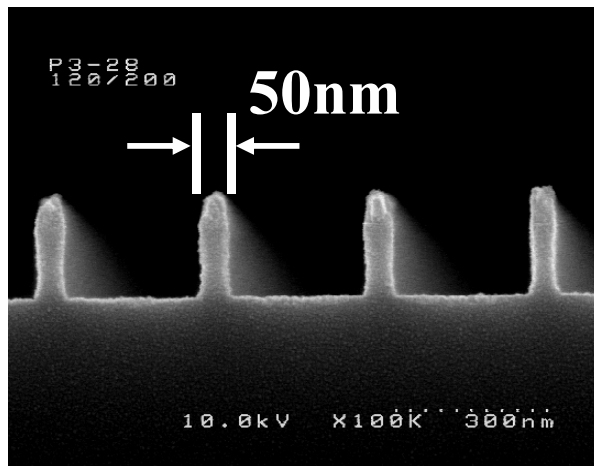


超微細・高アスペクト比ゲート

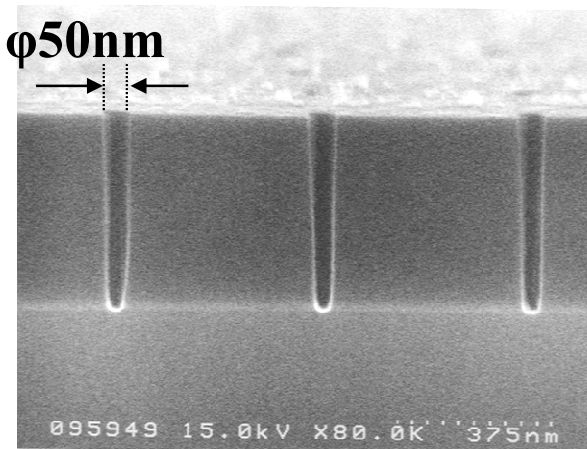
ゲート寸法：32 nm以下

薄いゲート絶縁膜

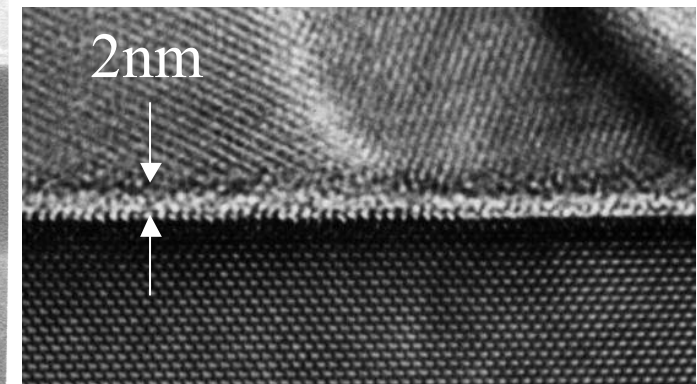
ゲート絶縁膜厚：1.2 nm以下



超高精度ゲート電極加工

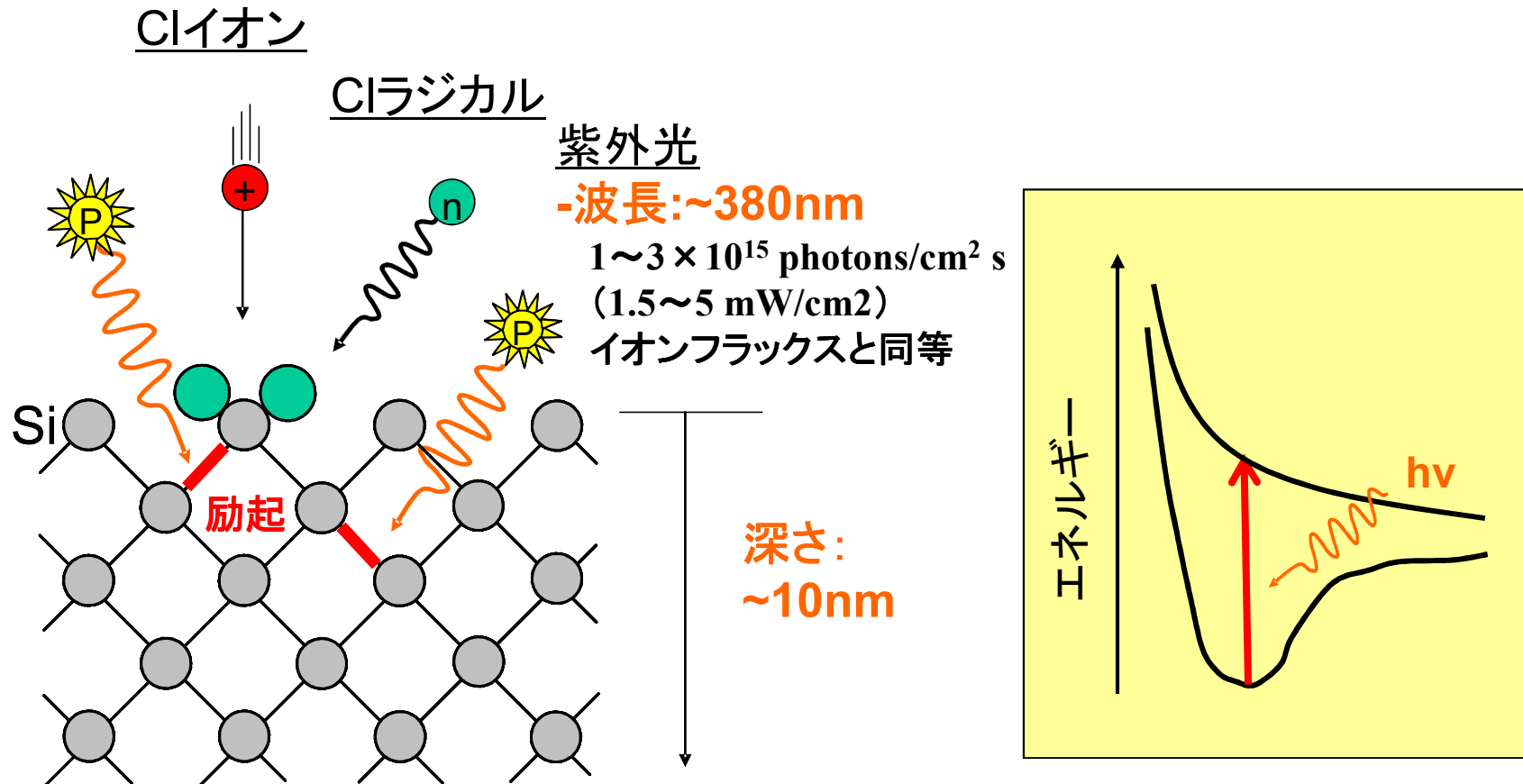


高アスペクトコンタクトホール加工



極薄ゲート酸化膜生成

シリコンエッチング表面反応における 紫外光照射の影響

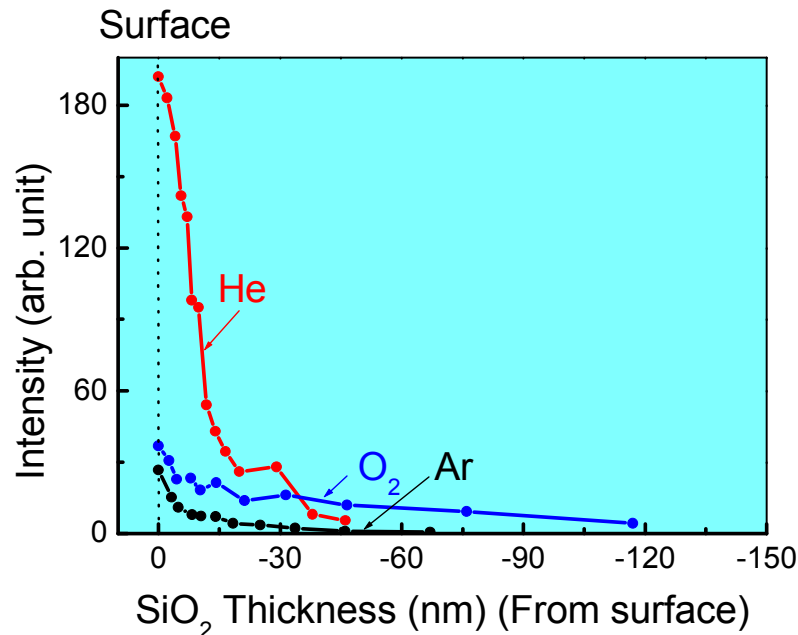


Si中に紫外光が吸収→結合が励起

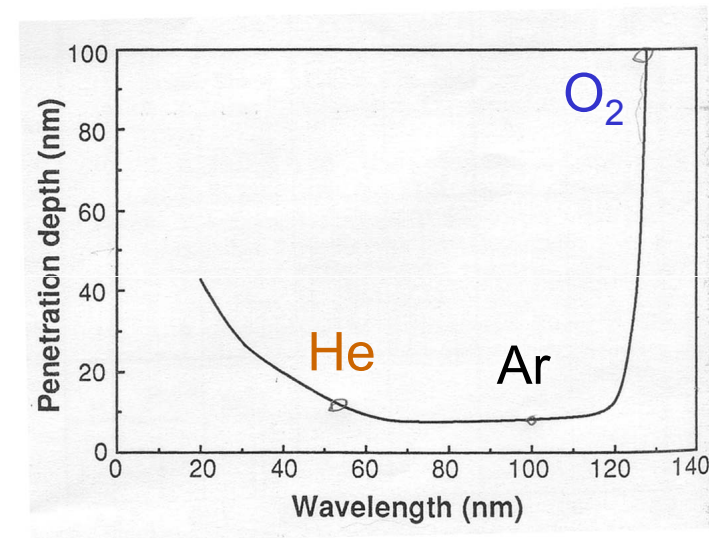
紫外光によりSiエッチング表面反応が促進

プラズマ照射によりシリコン酸化膜中の結晶欠陥

E' center の深さ方向分布
(ESRにより測定)



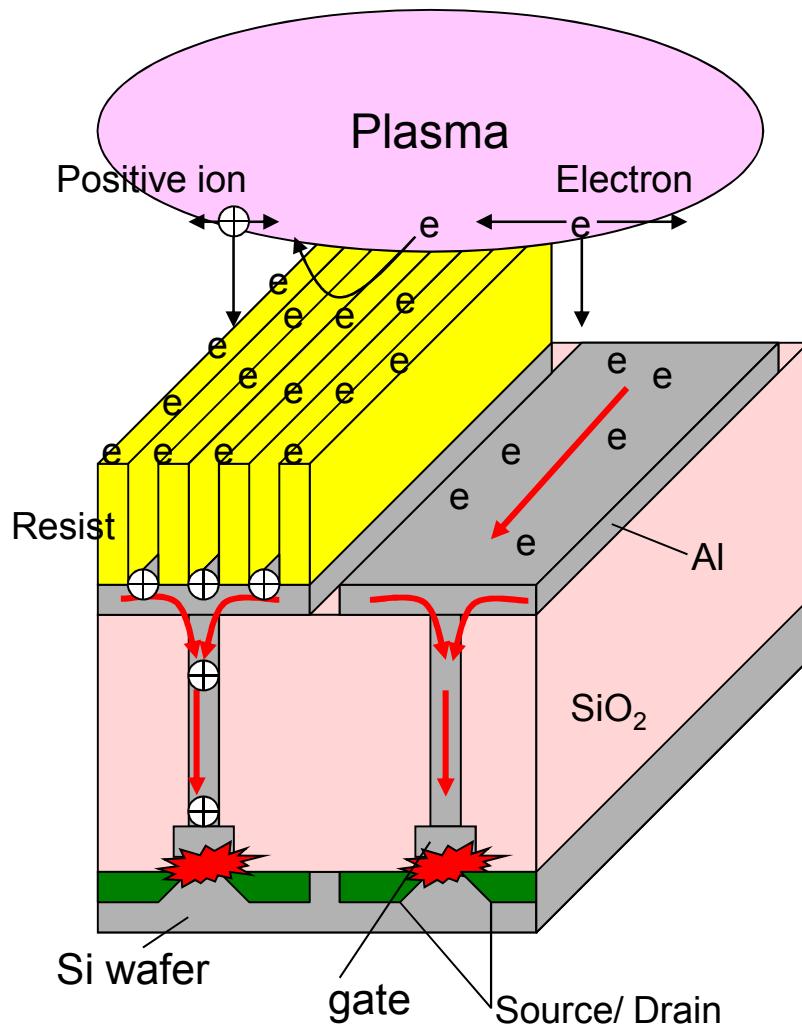
真空紫外光のSiO₂への侵入深さ
(T. Tatsumi et al,
JJAP.33(1994)2175)



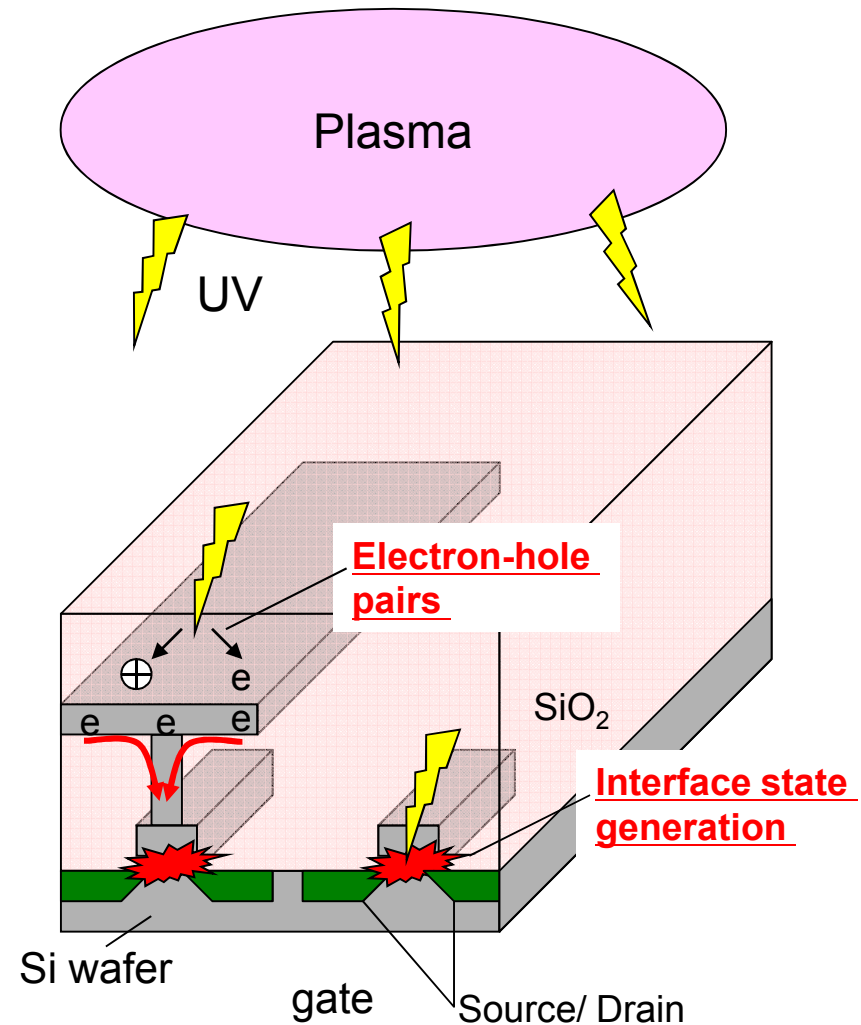
- 欠陥の生成量: UVのエネルギーに依存
- 欠陥深さ分布: UVの侵入深さに対応

LSIにおけるプラズマ照射損傷

電荷蓄積



紫外線照射損傷

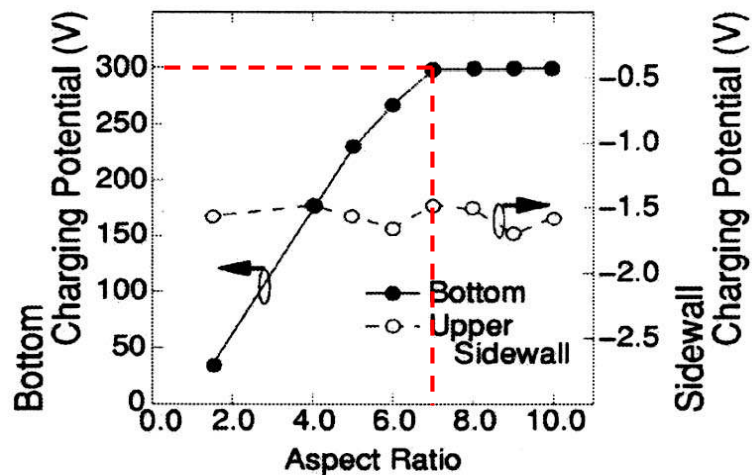


電荷蓄積による問題

エッチング中に電荷が蓄積

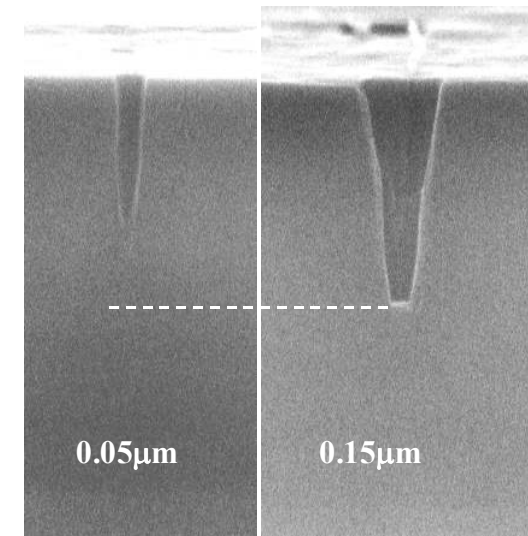
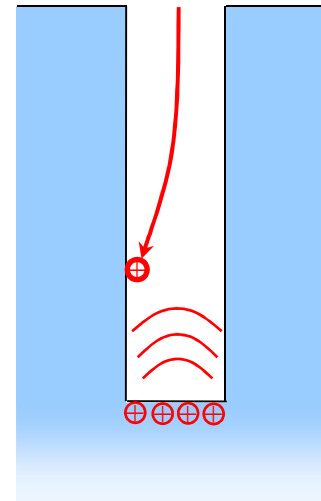
絶縁膜エッチングにおける問題点

ダメージ, エッチングストップ, 寸法依存性...

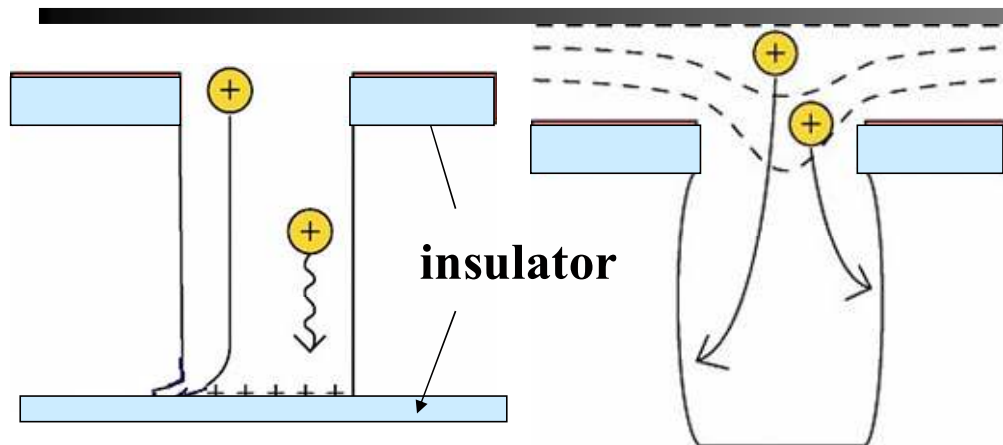


simulation result by Matsui et al.*

* Appl. Phys. Lett., 78, 883 (2001)

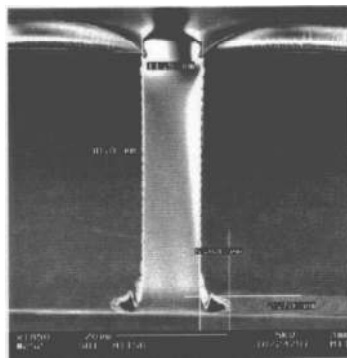


電荷蓄積による形状異常

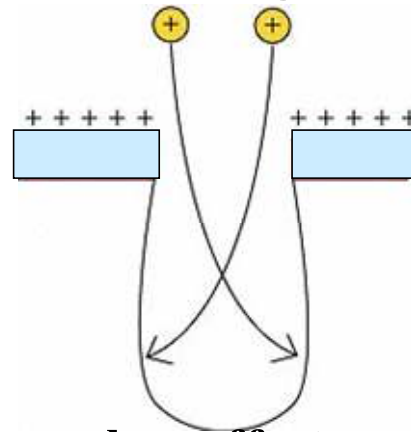


Notching

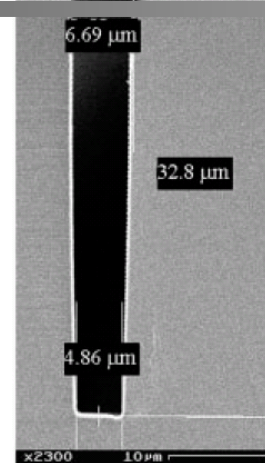
Bowing



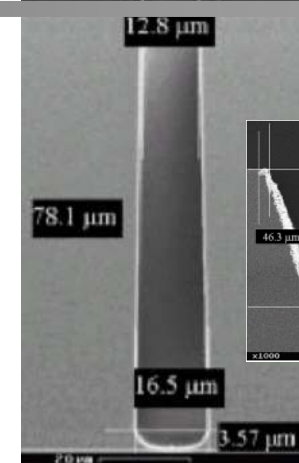
Notching



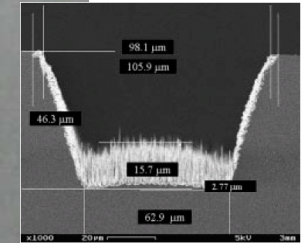
lens effect



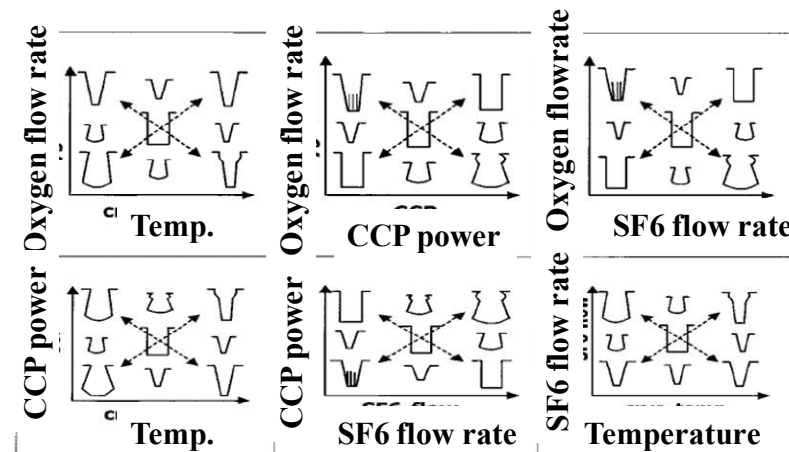
Positive taper



Negative taper



Positive taper & Rough bottom surface



Influence due to built-in charges during RIE

Example of Cryogenic CCP-RIE using SF6 and O2 gases

Etching profile is very sensitive to the etching condition.

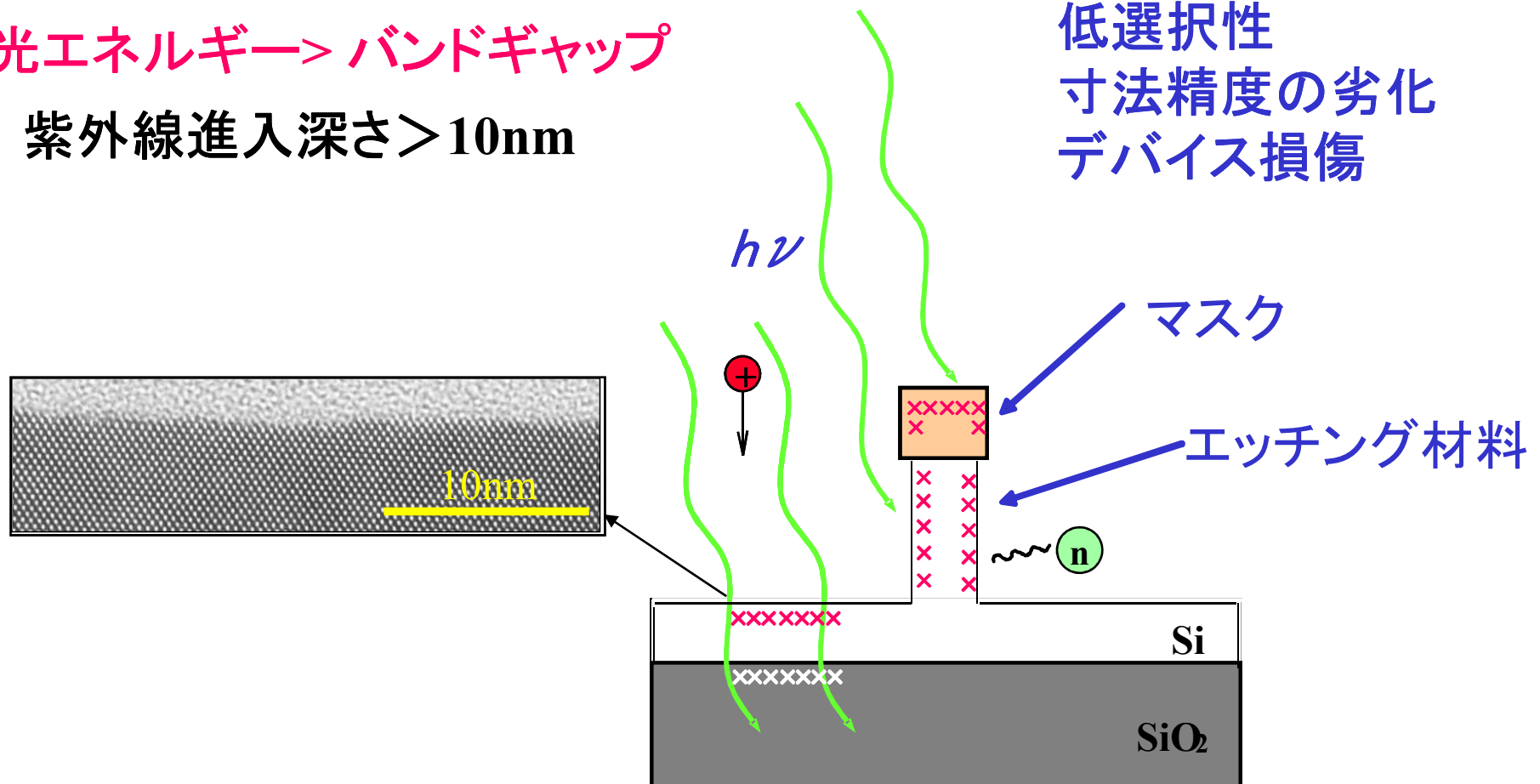
Temp. & O2 flow rate → anisotropy
CCP power & O2 flow rate → selectivity

紫外線照射による加工精度の限界

光エネルギー > バンドギャップ

紫外線進入深さ > 10nm

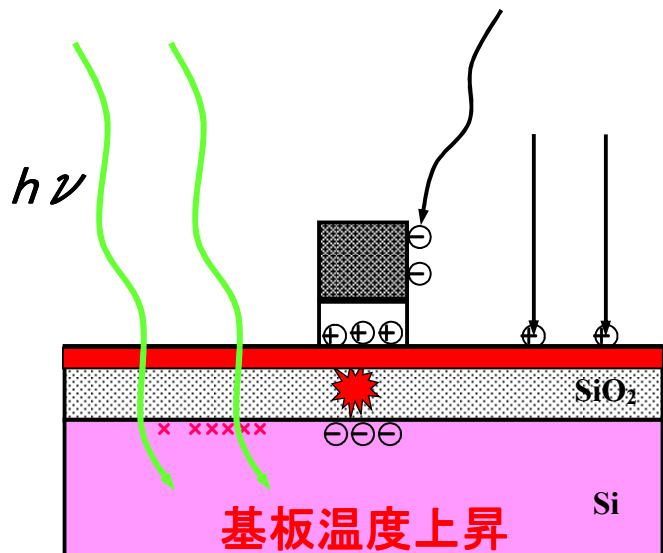
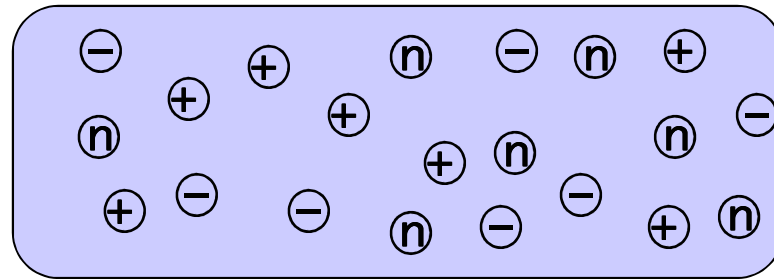
低選択性
寸法精度の劣化
デバイス損傷



- ・プラズマでは10nm以下の高精度な微細加工は難しい

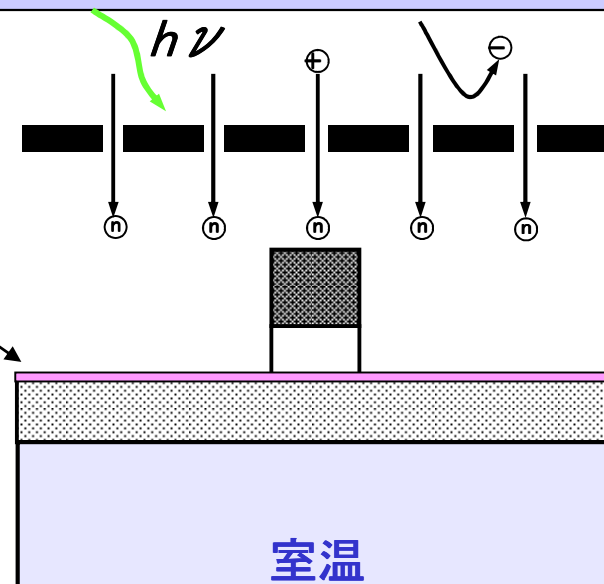
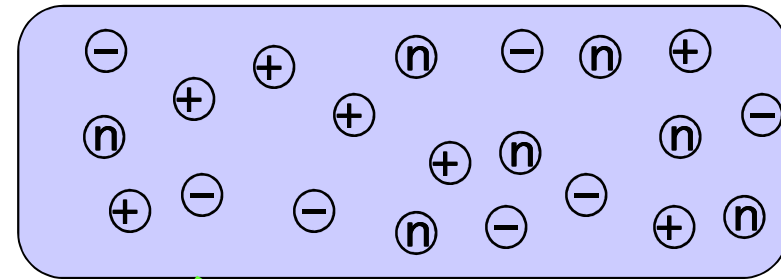
中性粒子ビーム生成装置の必要性

従来プラズマプロセス



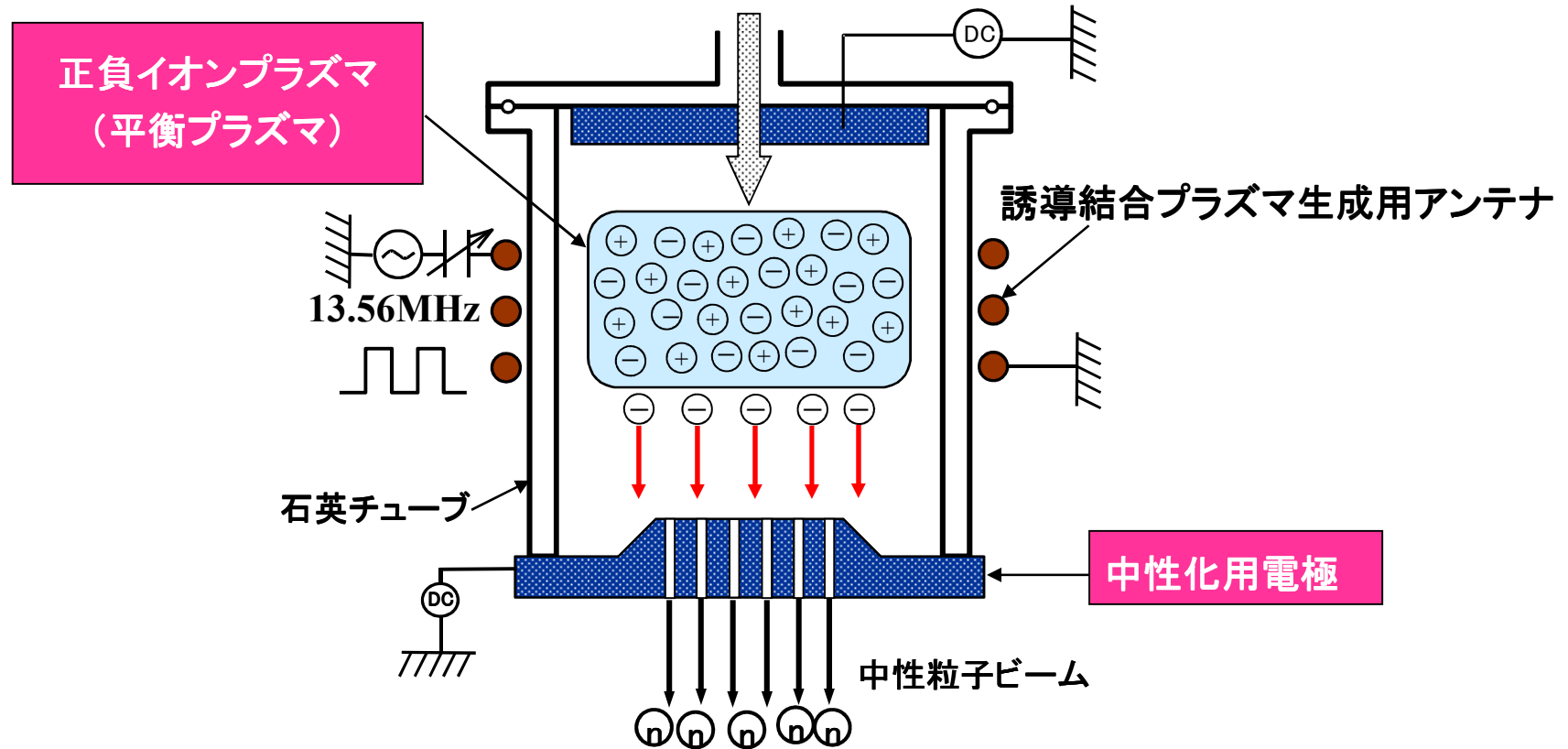
電荷蓄積ダメージ、放射光損傷
放射光による基板・表面温度上昇

中性粒子ビームプロセス



電荷蓄積・放射光ダメージフ
リー、室温プロセス

新型・中性粒子ビーム生成装置の特性

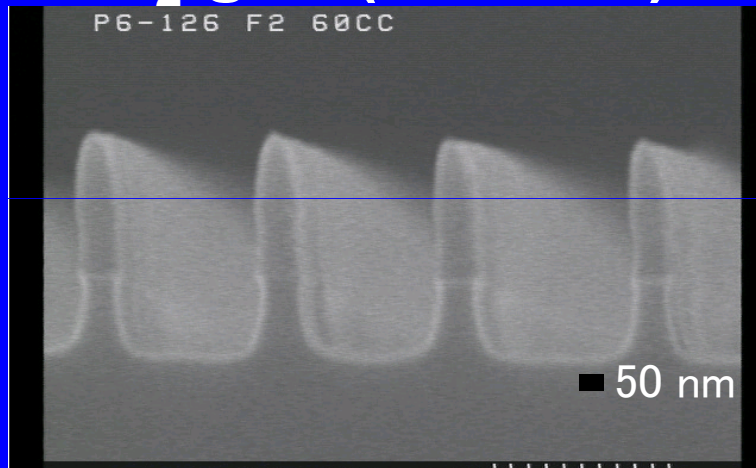


負イオンによる高効率低エネルギー
中性粒子ビームの生成

- ・高密度中性粒子ビーム生成 ($1\text{mA}/\text{cm}^2\sim$)
- ・エネルギー可変 ($10\text{eV}\sim 1\text{keV}$)
- ・高中性化率 ($\sim 100\%$)

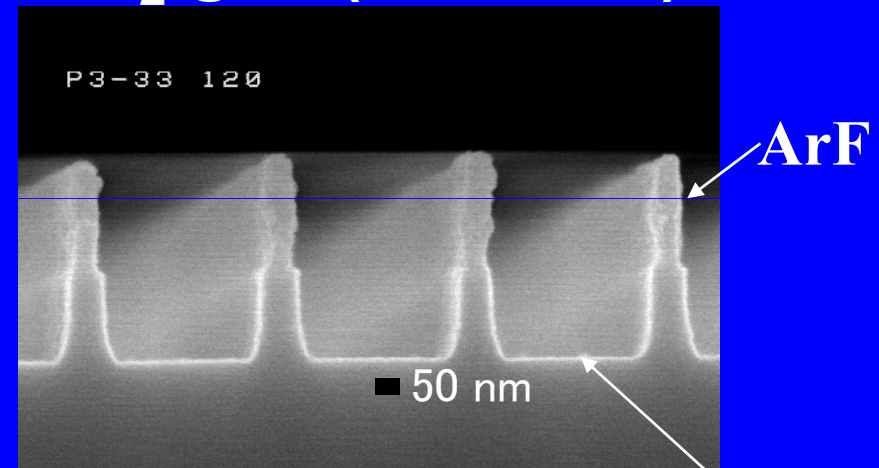
Comparison of 50nm poly-Si pattern profiles in F and Cl neutral beams

F₂ gas (F Beam)



300 nm/min

Cl₂ gas (Cl Beam)



50 nm/min

Beam Energy: 10eV

Surface Defects Induced by NB and Plasma Irradiations

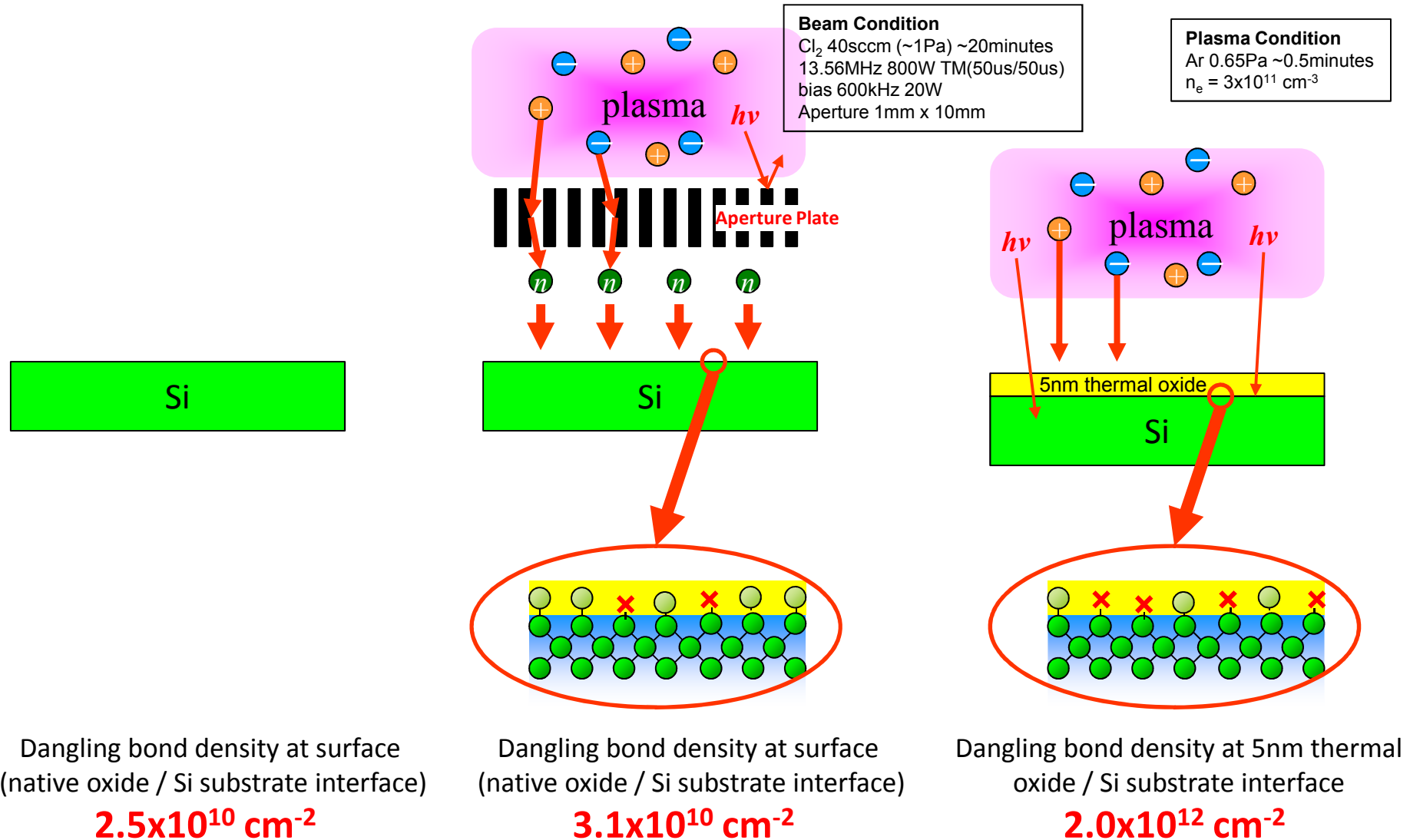
Reference

Neutral Beam Irradiation

Plasma Irradiation

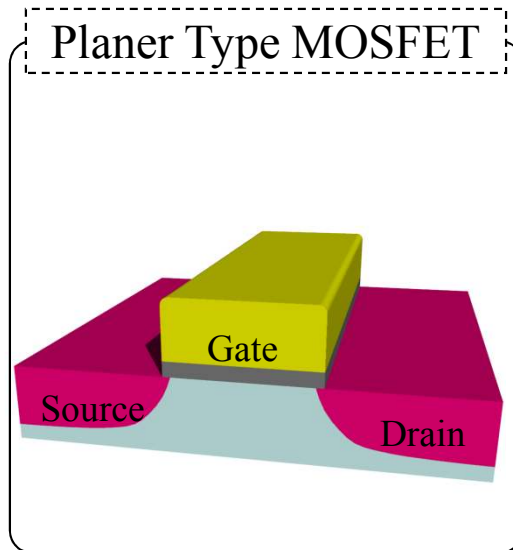
S. Samukawa et al., J. Vac. Sci. Technol. B 25, 760 (2007).

S. Samukawa et al., J. Appl. Phys. 104, 063308 (2008).

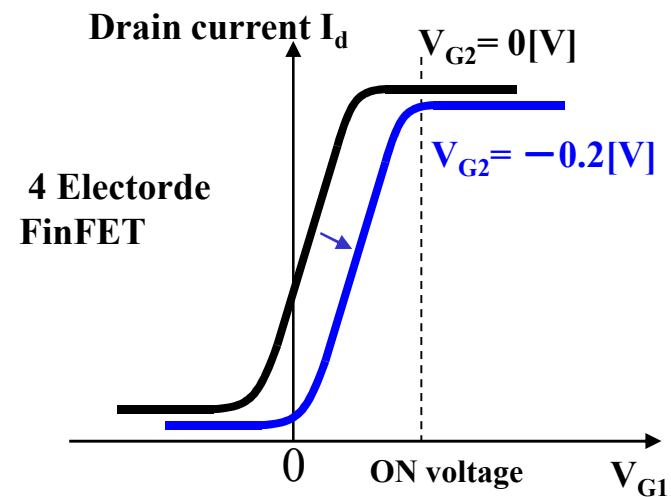
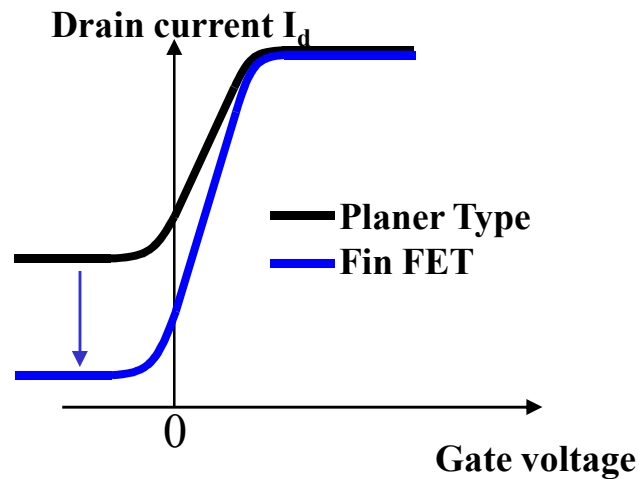
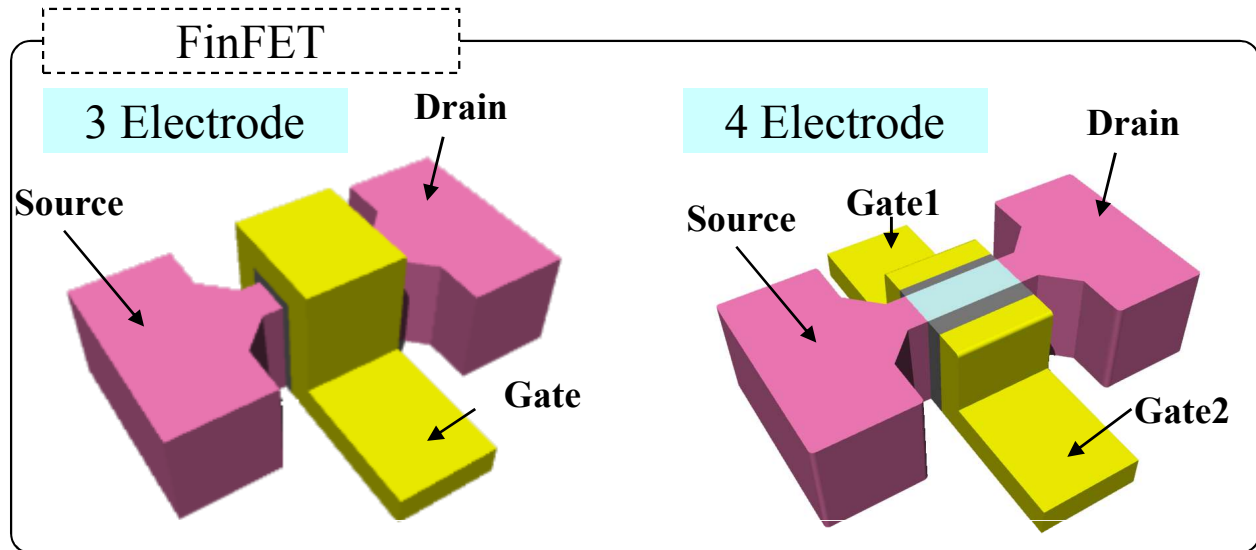


New Device Structure for Sub-32nm ULSI

Present ($\sim 45\text{nm}$)

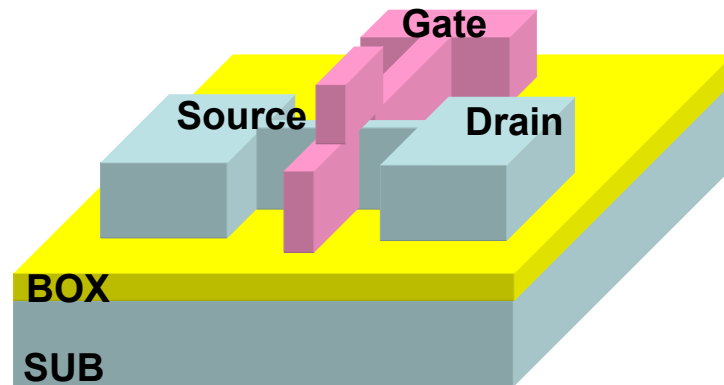


Next Generation ($32\text{nm}\sim$)



Fin MOS-FET could precisely control the electrical characteristics.

Plasma Radiation Damages for Fabrication of 3D MOSFET



Etching surface damages (defects) degrade the electron mobility significantly in 3D MOSFET.

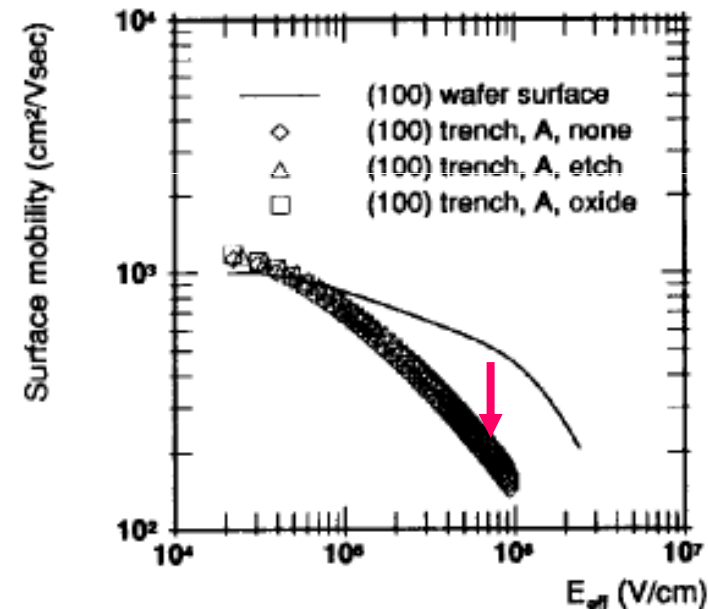
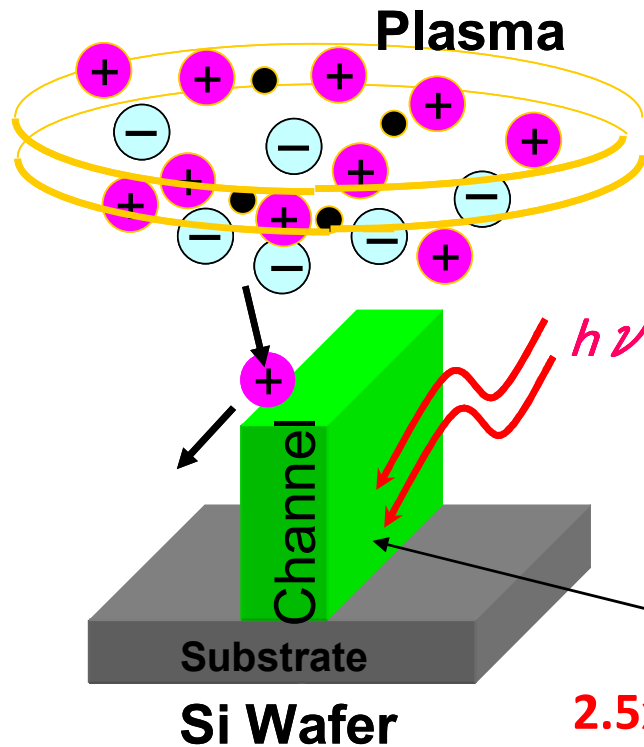
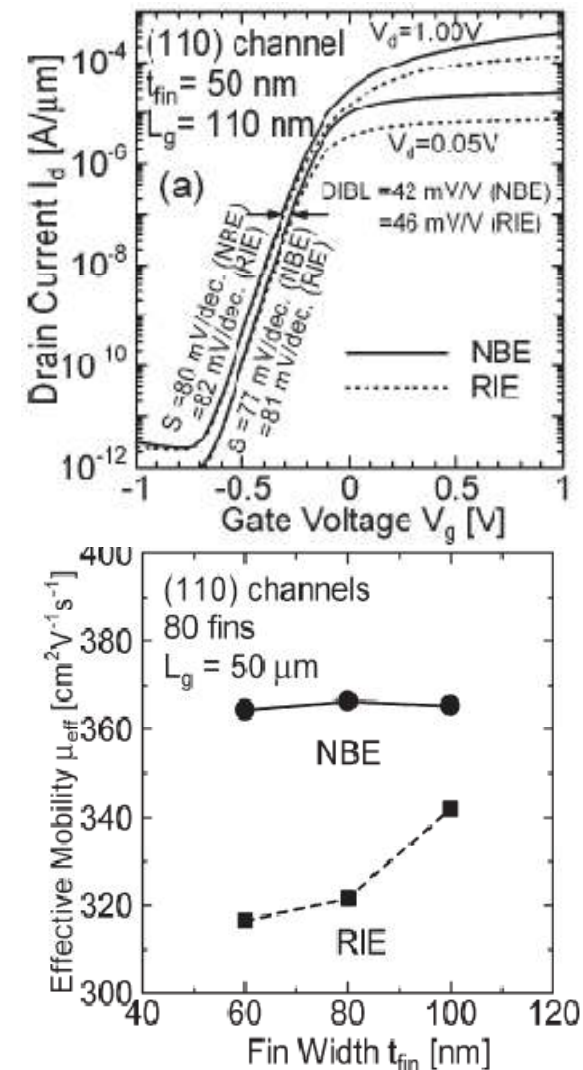
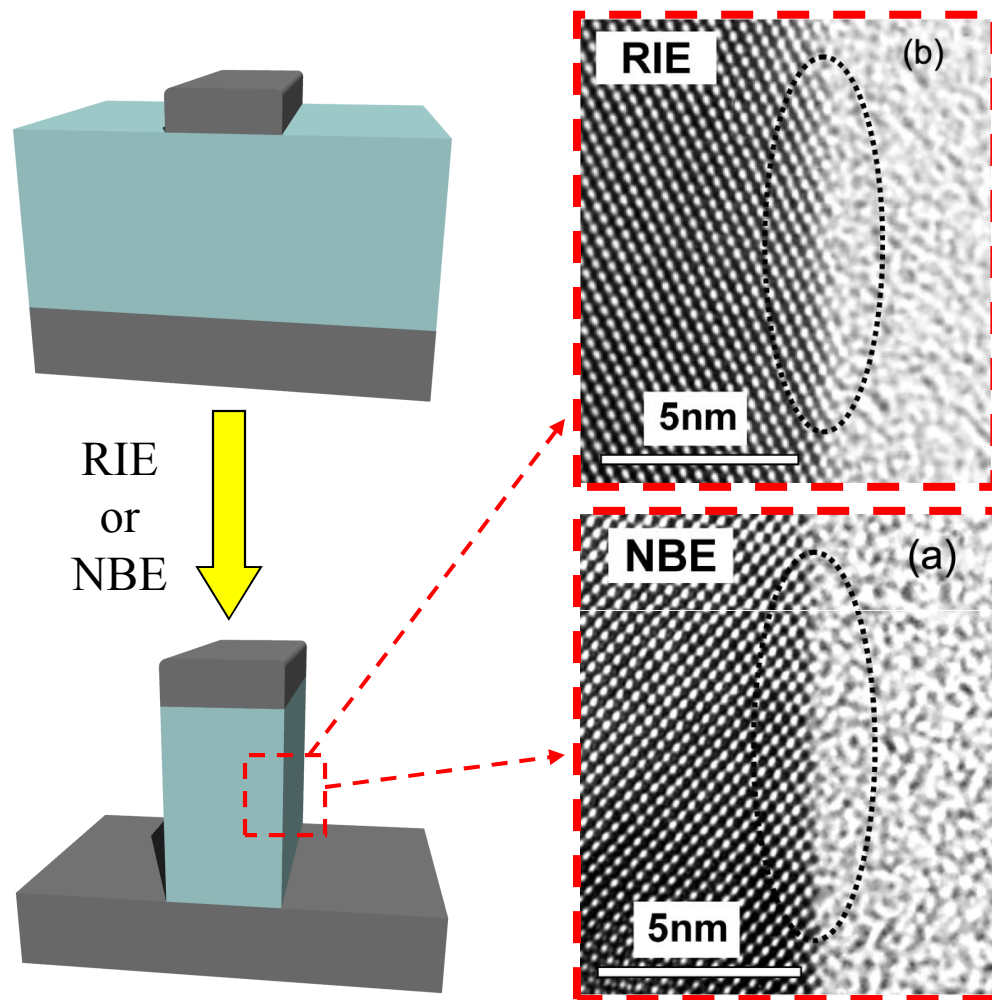


Figure 4: Electron surface mobility vs. effective normal field for different post-etch treatments.

Dangling bond density at Si substrate surface

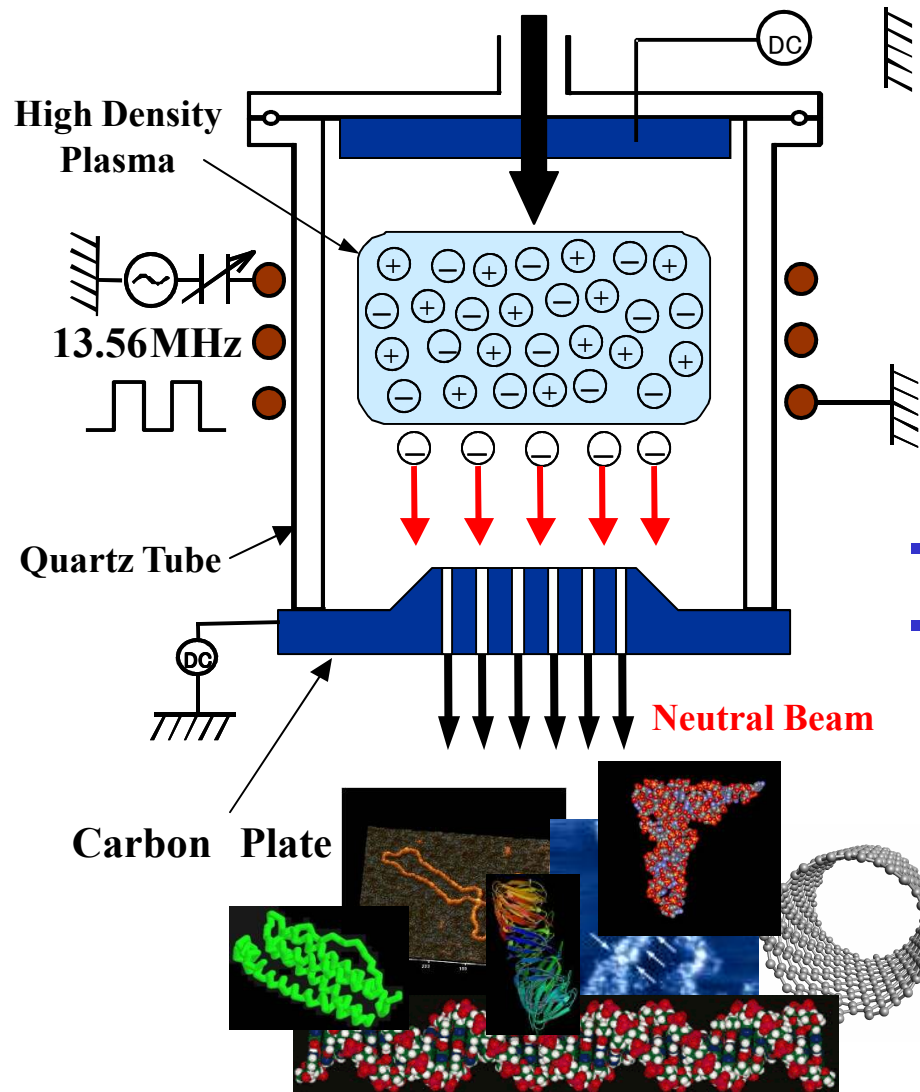
$2.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ (before) $\Rightarrow 2.0 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ (after etching)

NBエッチング(NBE)を用いたFinFET特性の改善



NBE(最適化条件)でFin構造をエッチングし、チャネル表面のラフネスや欠陥を抑制することで移動度が改善される。

Fusion of Bottom-up and Top-down Processes



**Top-down Processes
for Soft Material Devices.
(Bio-molecular, SAM, Carbon
Nano-tube)**

- Damage-free Patterning
- Damage-free Surface Modification

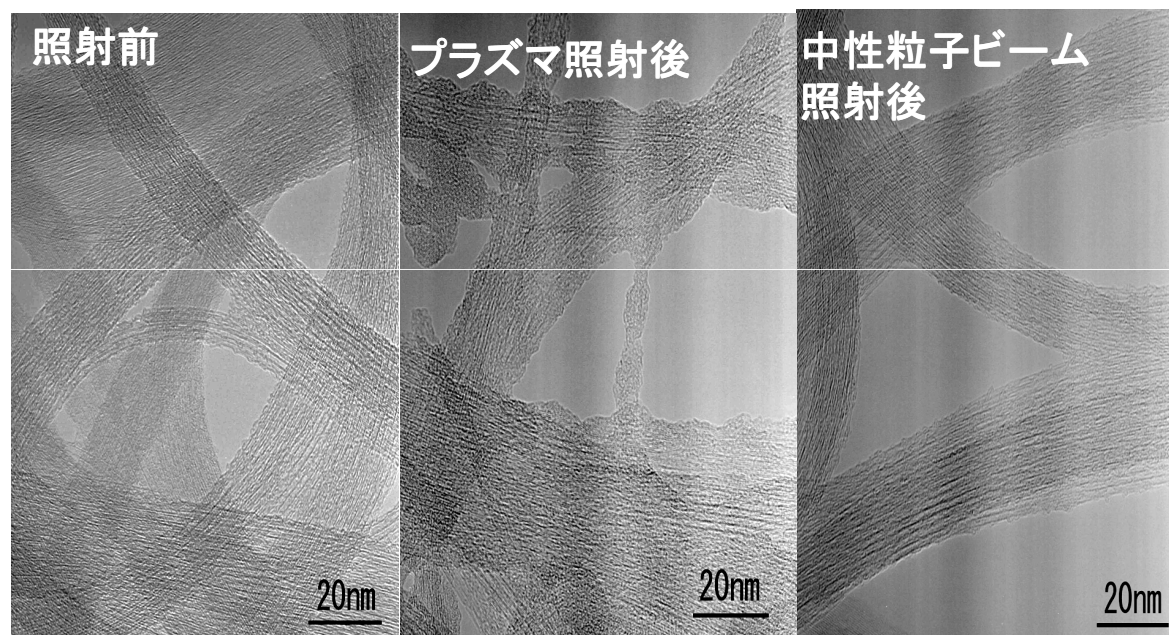
Neutral Beam Processes

プラズマおよび中性粒子ビーム照射によるCNTs欠陥生成

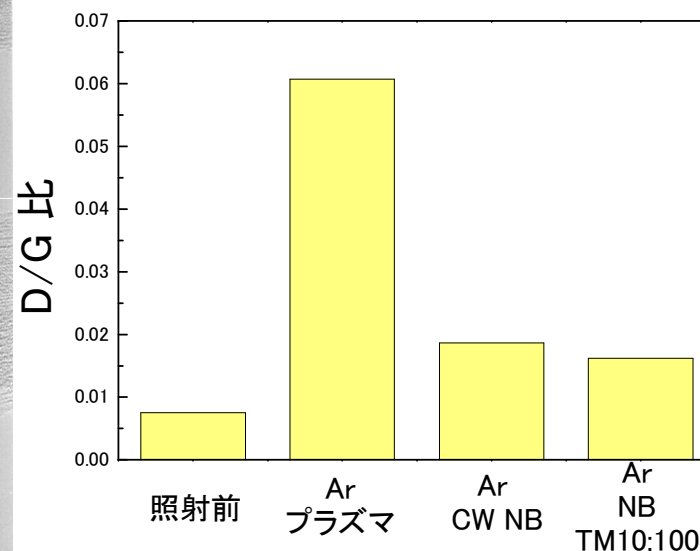
CNTsへのArプラズマおよび
中性粒子ビーム照射

ビームエネルギー : 10eV
照射時間: 300sec

・TEM (CNTs構造)



・ラマン分光 (欠陥)



プラズマ照射に比べ、中性粒子ビーム照射によって欠陥が大幅に減少

→プラズマでは紫外線や電子の照射によって多量の欠陥が生成

まとめ

中性粒子ビームは、プラズマからの電荷蓄積、放射光を抑制でき、50nm以下のダメージフリーの超高精度トッパダウン加工を実現できる。

この技術は超LSIデバイス、量子効果デバイス、カーボンナノチューブ素子、有機分子素子、バイオデバイス、MEMSなどの革新的ナノデバイス製造において威力を大いに発揮する。