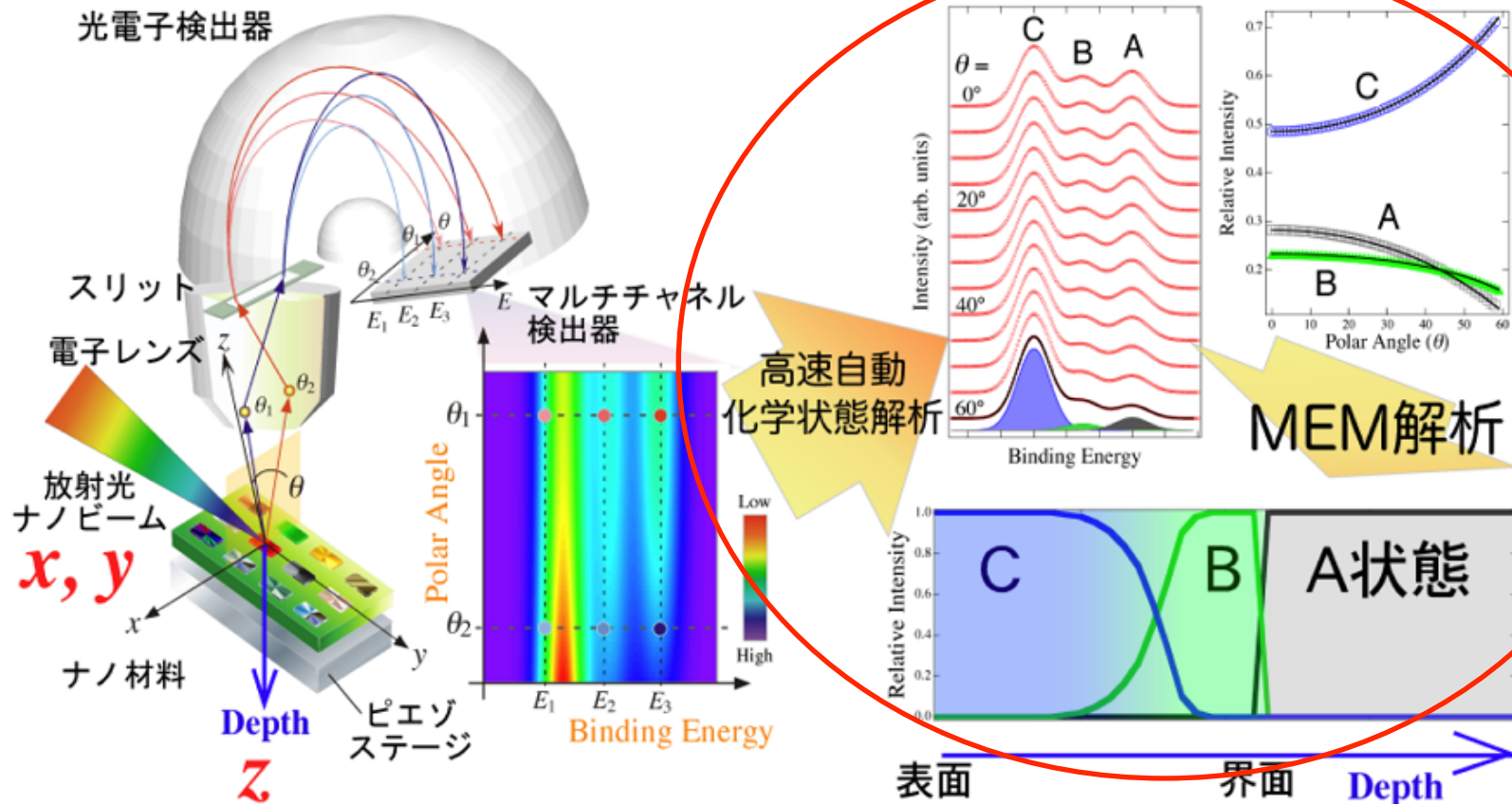


3D-NanoESCAによるMOSデバイス構造の深さ方向解析

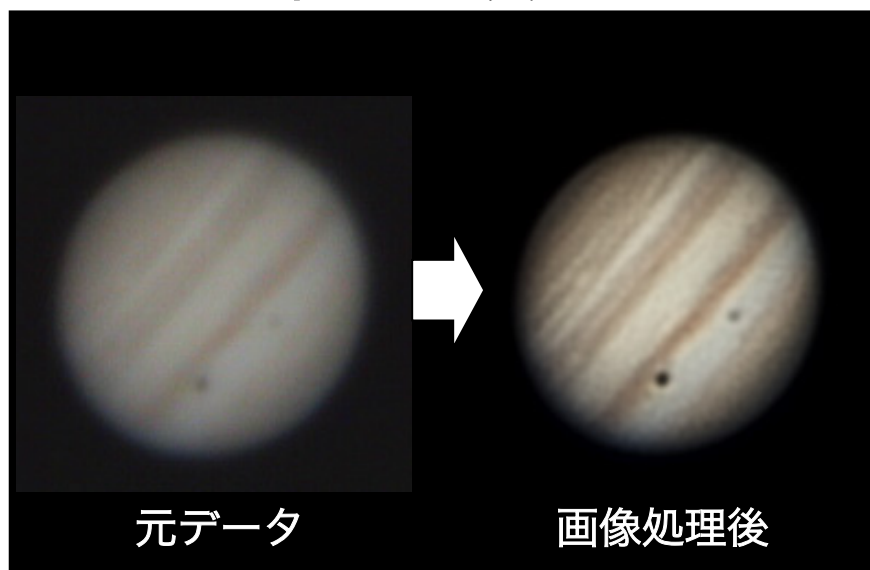
東大放射光連携機構 豊田智史



最大エントロピー法(MEM)とは？

与えられた不完全なデータからある情報を元にして元々の形状を再構成する手法の一つ

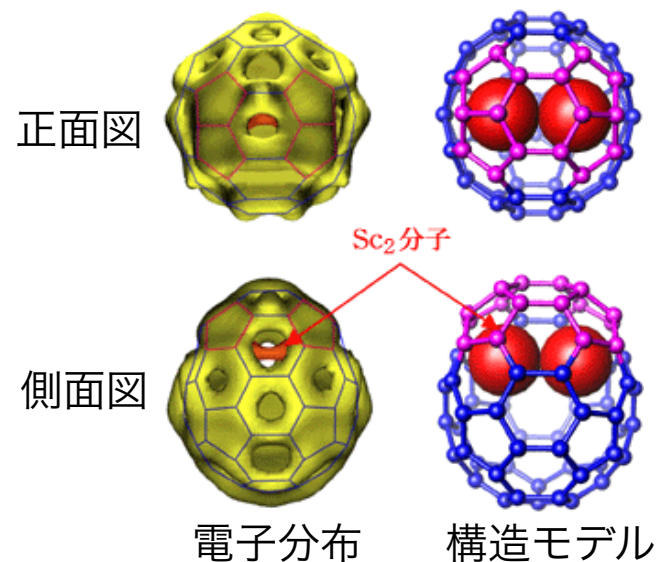
木星の写真



<http://www.astroarts.co.jp/special/2004saturn-jupiter/si4-j.html>

画像解析

Sc₂@C₆₆



C.-R. Wang *et al.*, Nature **408**, 426 (2000).

X線構造解析

角度分解光電子分光に適用する場合

ラプラス変換:

$$F(s) \propto \int_0^{\infty} f(t) \exp(-st) dt$$

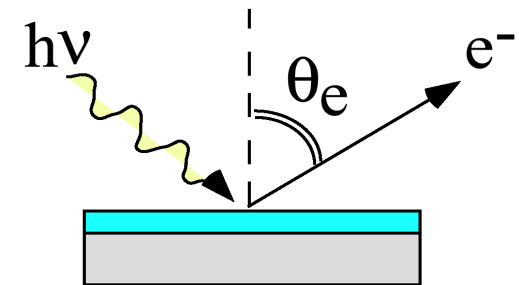
光電子分光データの場合

t : 深さ

$f(t)$: 原子濃度

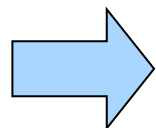
s : 検出角度 ($\frac{1}{\lambda \cos \theta_k}$) $F(s)$: 光電子強度

検出角度 (θ_e) 大 \rightarrow 表面敏感

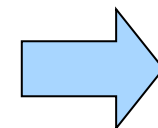


しかし、

1. $F(s)$ は**誤差**を伴っており**有限個**しか得られないため、直接逆変換することができない。
2. $t \rightarrow \infty$ 条件で $\exp(-st)$ は0に近づくため、 **t が極端に大きい場合 (バルク領域)で意味のある情報が失われてしまう。**



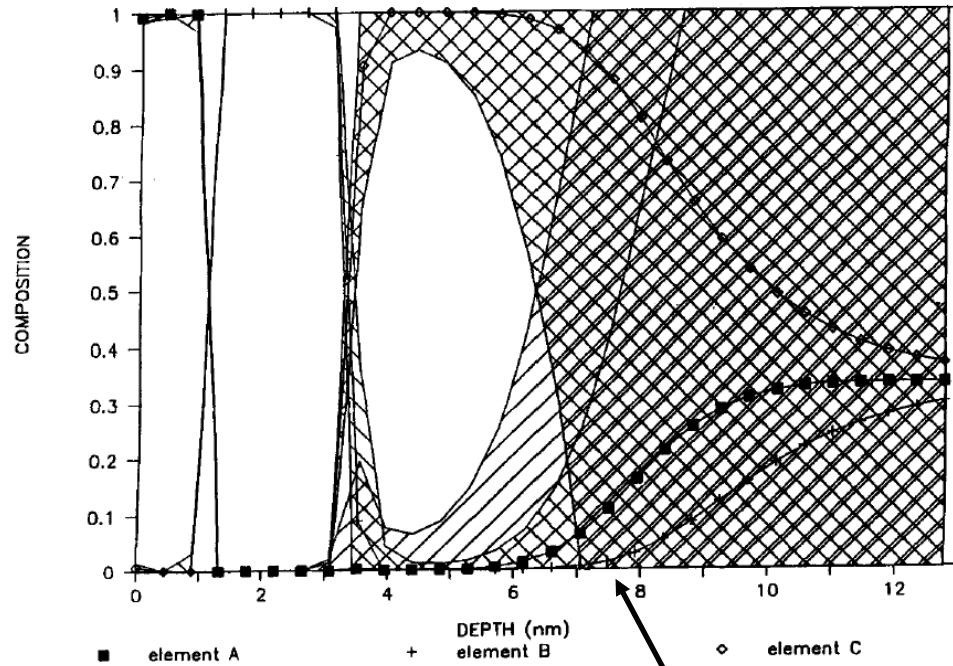
$F(s)$ を再現する $f(t)$ として無数の候補が上がってしまい、“本当の $f(t)$ ”が探しにくくなる。



MEM解析

過去の研究報告例

2層構造モデルのシミュレーション

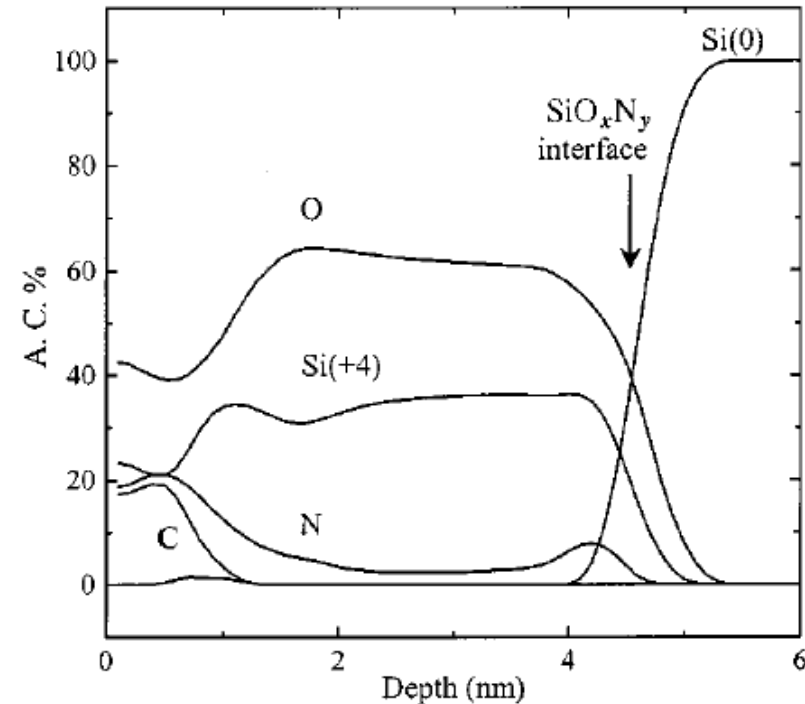
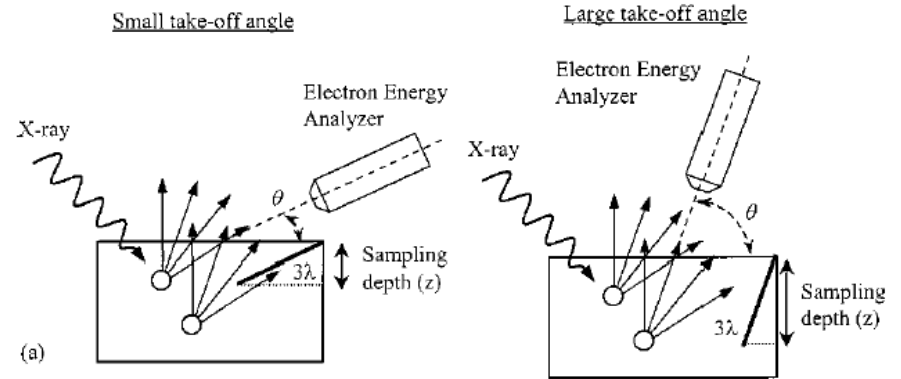


不確かさを示した部分

A. K. Livesey and G. C. Smith, J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom. **67**, 439 (1994).

シミュレーションだけでなく、角度分解光電子分光のデータからMEM解析を行った例も幾つか報告されている。

Si基板上に形成したSiON膜への応用例



J. P. Chang *et al.*, J. Appl. Phys. **87**, 4449 (2000).

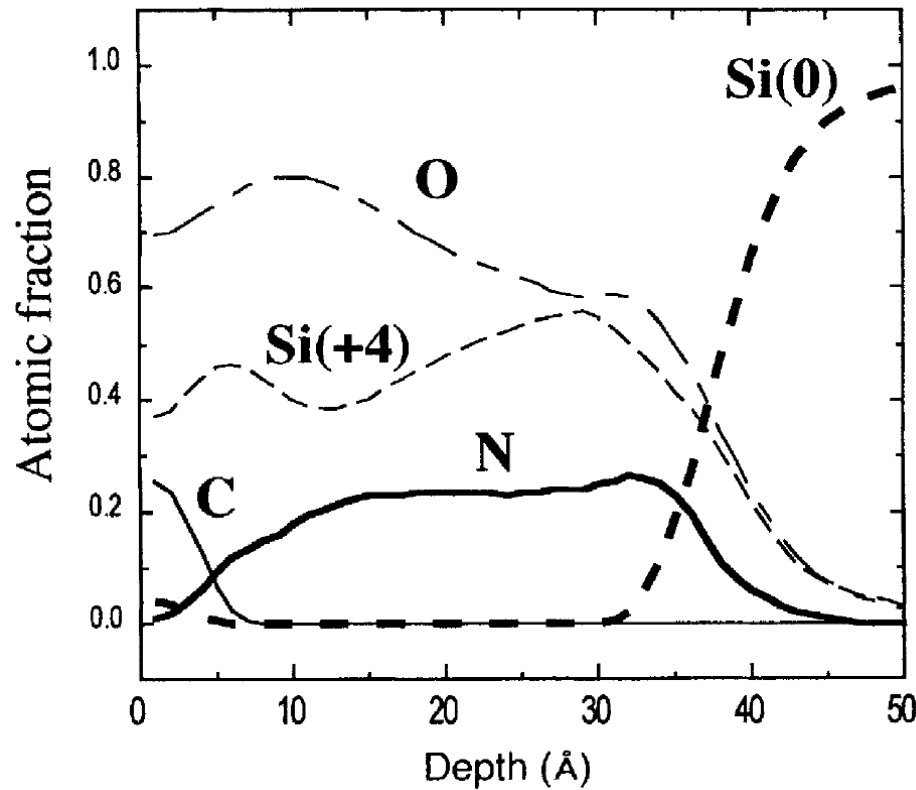
問題点

最小化関数: $Q = 0.5\chi^2 - \alpha S$

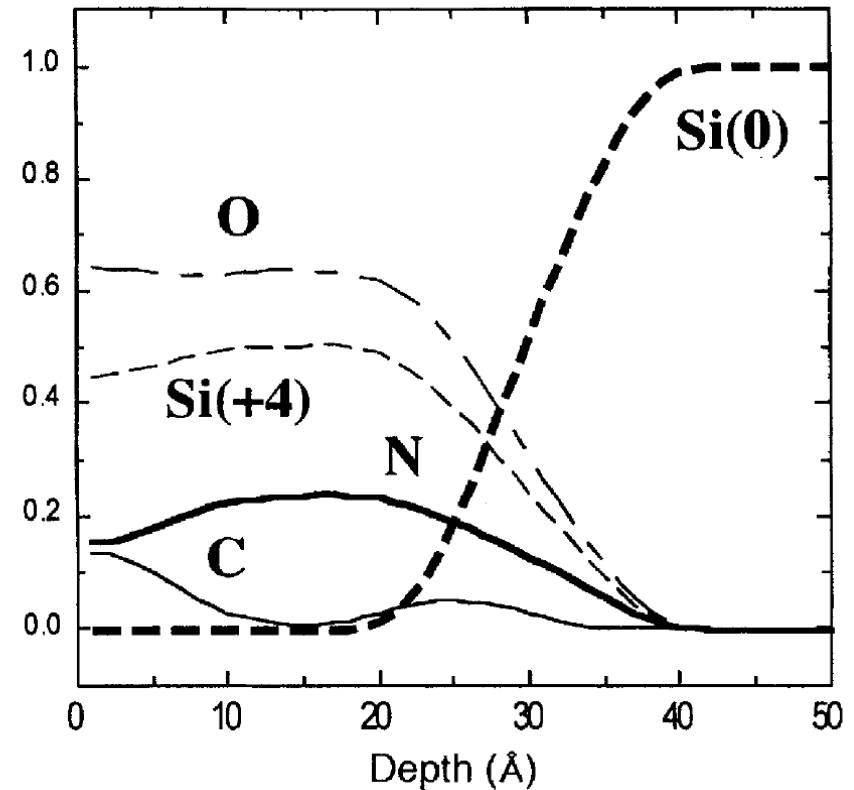
$0.5\chi^2$ (最小自乗項) S (モデル項) $S = \sum_j \sum_i n_{j,i} - m_{j,i} - n_{j,i} \log\left(\frac{n_{j,i}}{m_{j,i}}\right)$

元素濃度: n_{ij} , 構造モデル: m_{ij}

$\alpha = 0.1$



$\alpha = 15.0$



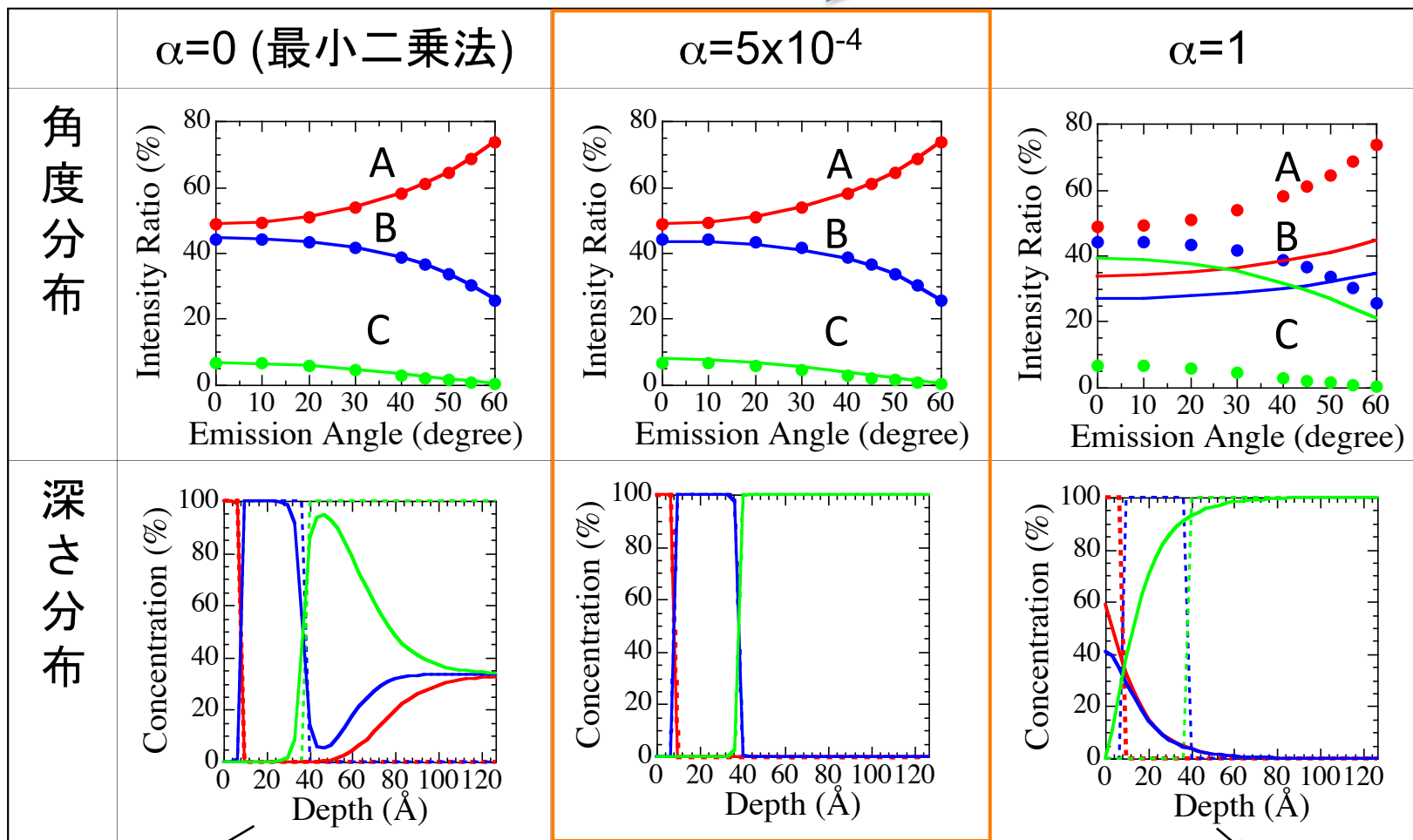
R. L. Opila *et al.*, Prog. Surf. Sci, **69**, 125 (2002).

解析パラメータ次第で膜厚や組成分布も変わってしまう!

A	10 Å
B	30 Å
C (sub.)	

最適化関数: $Q = 0.5\chi^2 - \alpha S$

モデルと実験データの
効かせ具合を α で調整

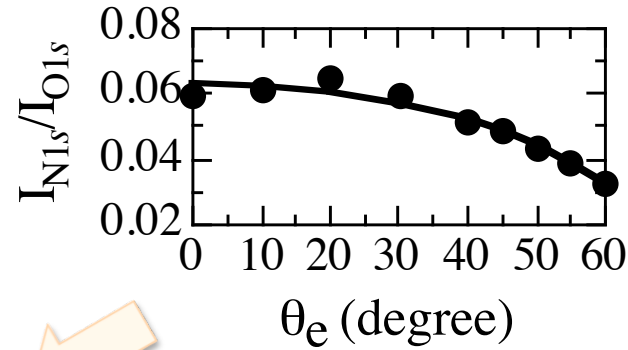
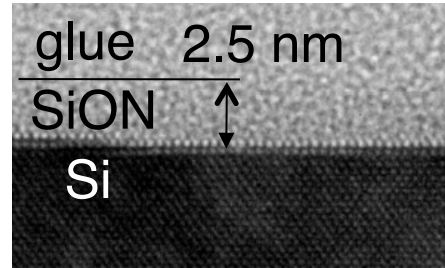
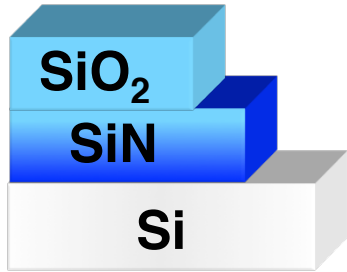


バルク領域が再現できない。

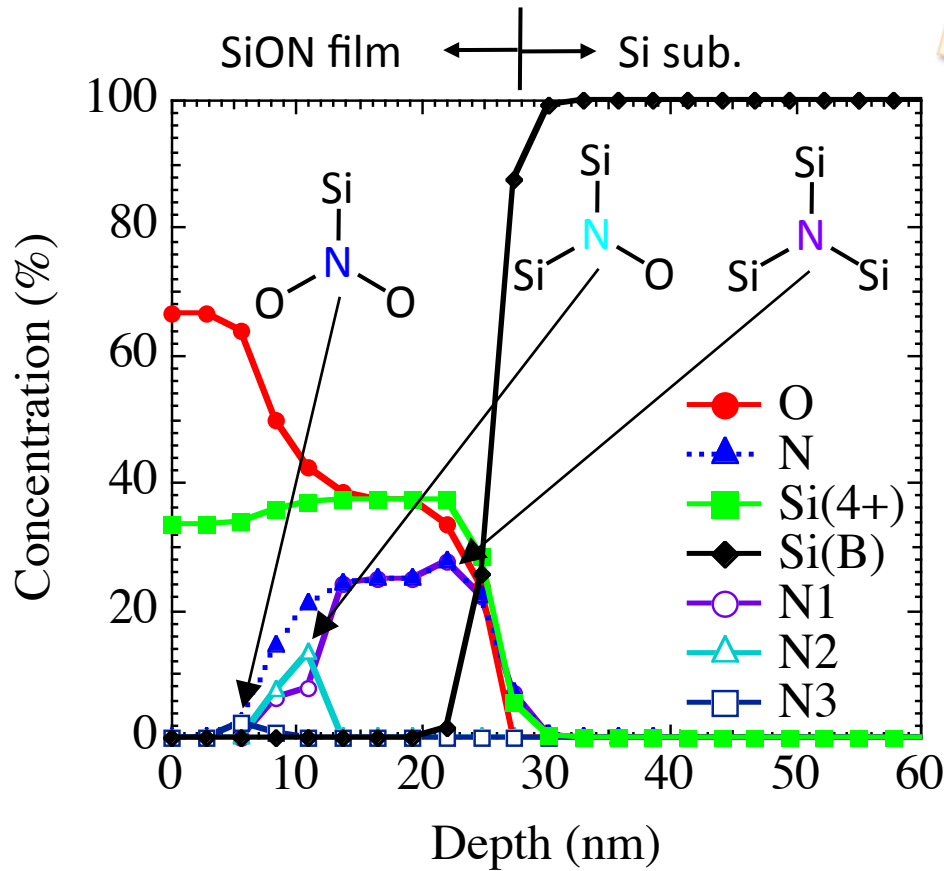
Good results

基板領域が再現できない。

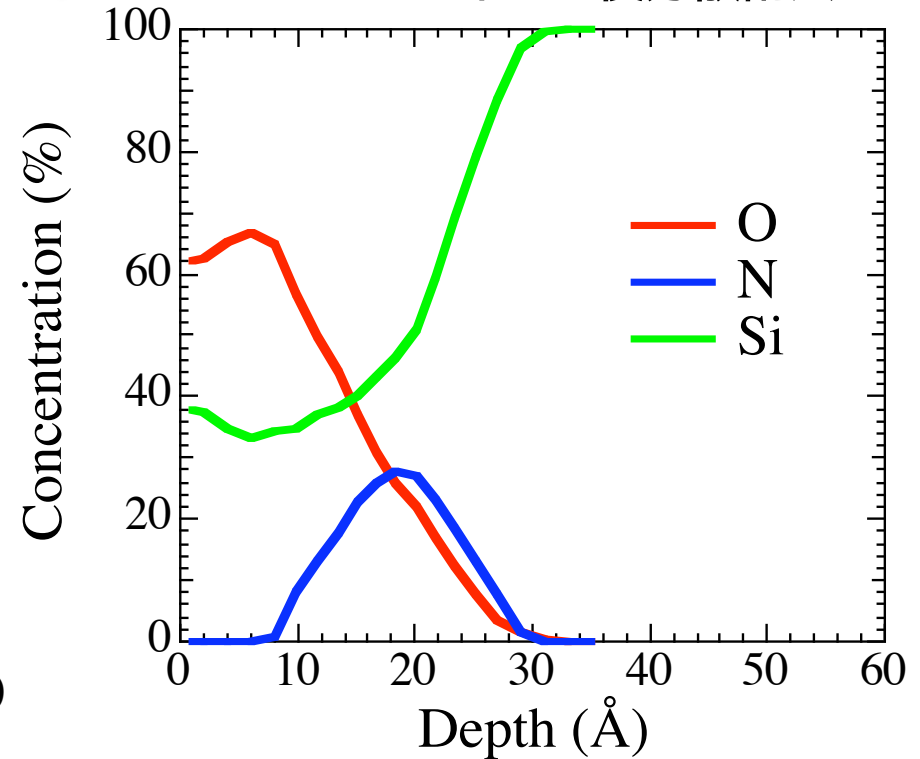
SiO₂/SiN/Si構造



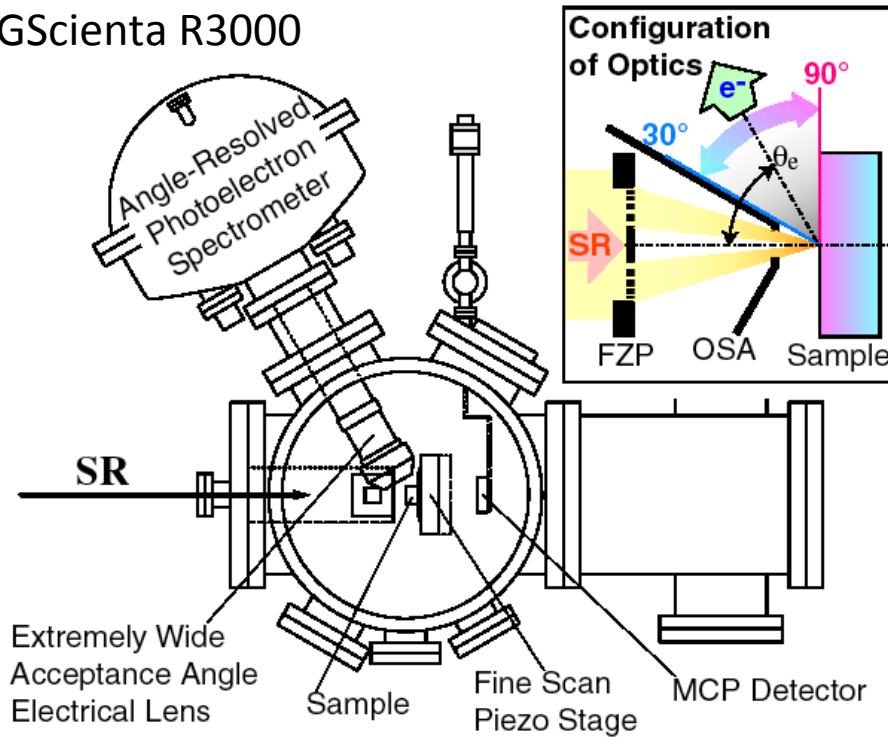
S. Toyoda *et al.*,
Surf. Interface
Anal. **40**, 1619
(2008).



ラザフォード後方散乱法



VGScienta R3000



測定条件

光エネルギー: $h\nu = 870 \text{ eV}$

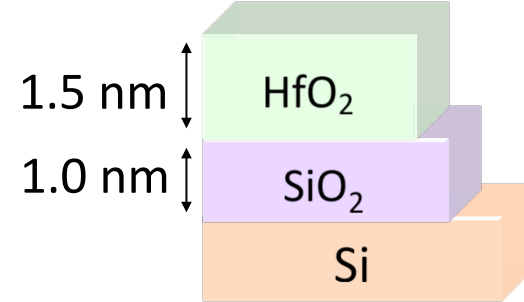
パスエネルギー: 200 eV

アナライザーズリット: 0.8 mm

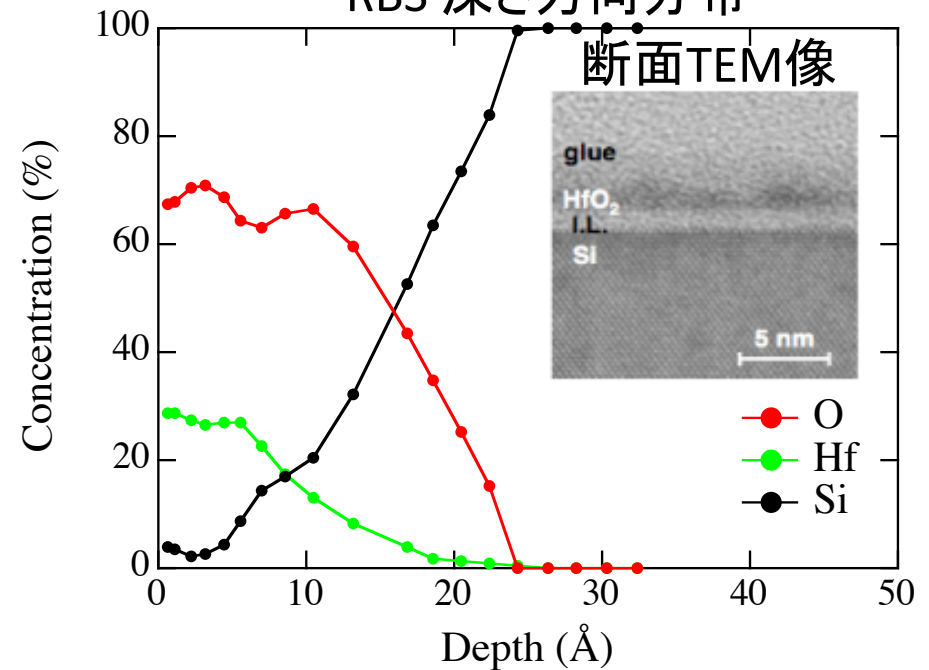
光電子検出角度: $60^\circ \pm 30^\circ$ (一括取り込み)

試料構造

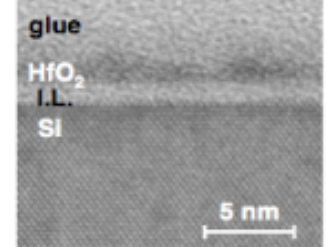
MOCVD HfO_2



RBS 深さ方向分布



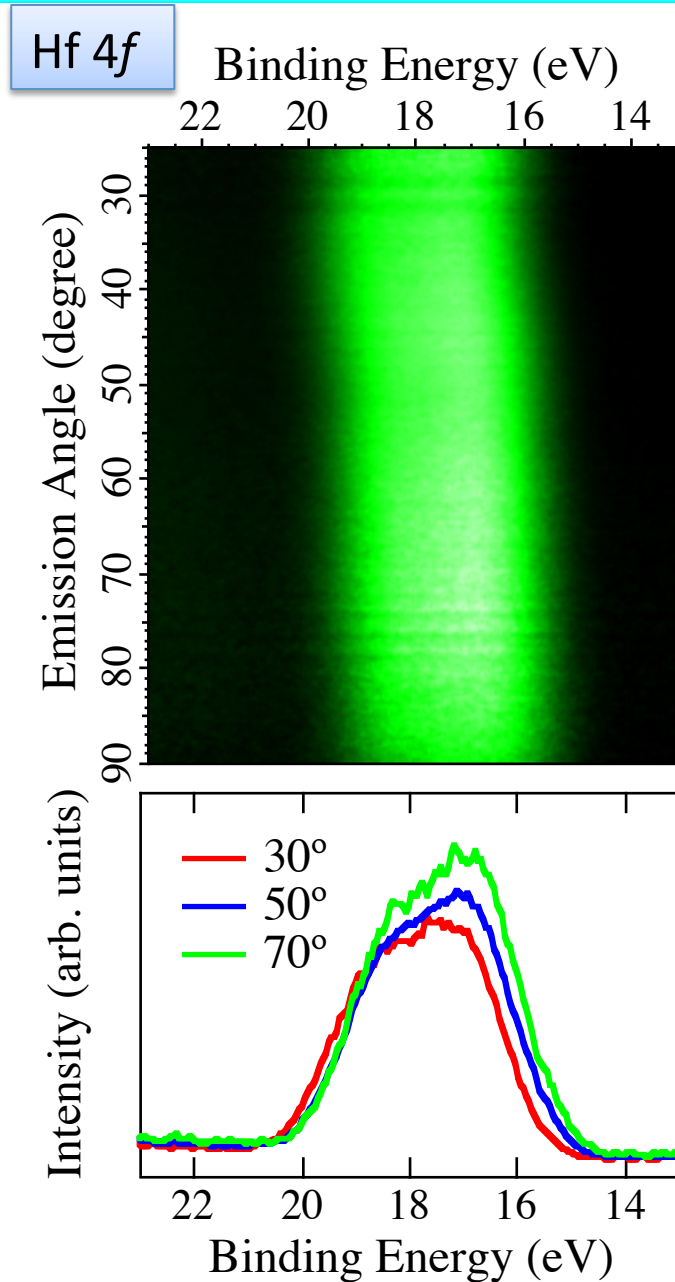
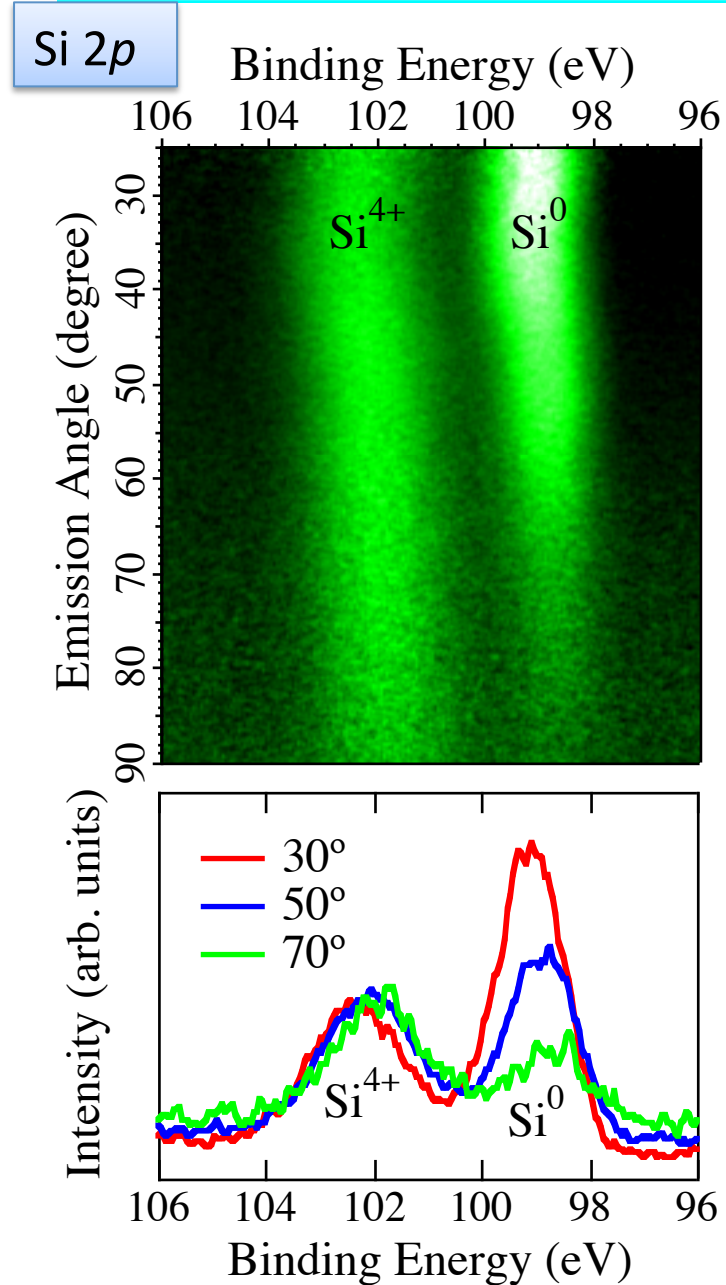
断面TEM像



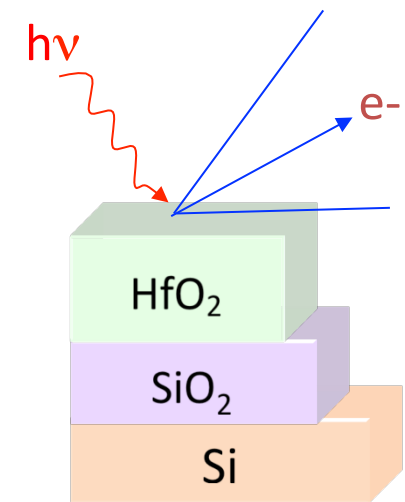
- O
- Hf
- Si

試料構造が既知である $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$ ゲートスタック構造を測定し、得られた角度分解スペクトルから深さ方向解析が可能かどうかを検証した。

角度分解内殻準位スペクトル(Si2p, Hf4f)

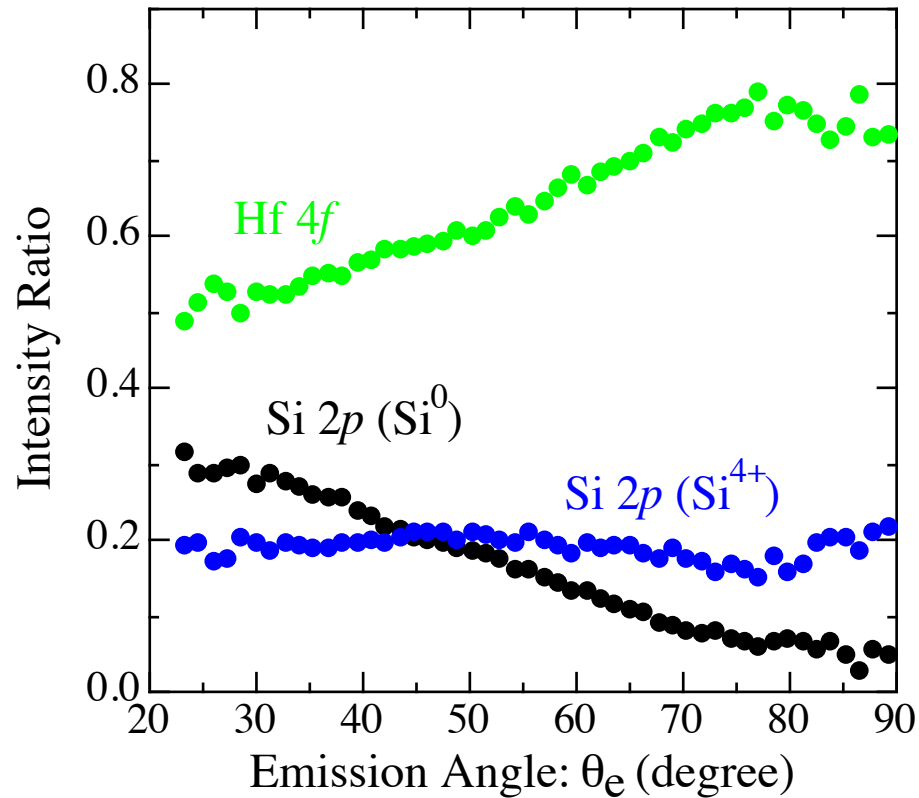


検出角度: $60^\circ \pm 30^\circ$
角度分解能: $\sim 0.2^\circ$
分割数: 494
積算時間: ~ 5 hours



HfO₂/SiO₂/Si積層構造を反映した角度分解スペクトルが得られた。

Hf 4f, Si 2p (Si⁰), Si 2p (Si⁴⁺)光電子強度の
角度プロファイル(感度補正などの規格化後)



$$X_i(\theta_k) = \frac{I_i(\theta_k)/R_i}{\sum_i I_i(\theta_k)/R_i}$$

I_i : 光電子強度
 R_i : 感度補正
 X_i : 強度比

深さ方向解析に用いた理論式

$$I_i^{theory}(\theta_k) \propto \int C_i(z) \exp\left(-\frac{z}{\lambda_i \cos \theta_k}\right) dz$$

$C_i(z)$: 元素濃度分布
 λ_i : 脱出深さ

$$Q = 0.5 \chi^2 - \alpha S$$

$$= \sum_i \sum_k \left(\frac{X_i^{exp}(\theta_k) - X_i^{theory}(\theta_k)}{\sigma_k} \right)^2 - \alpha S$$

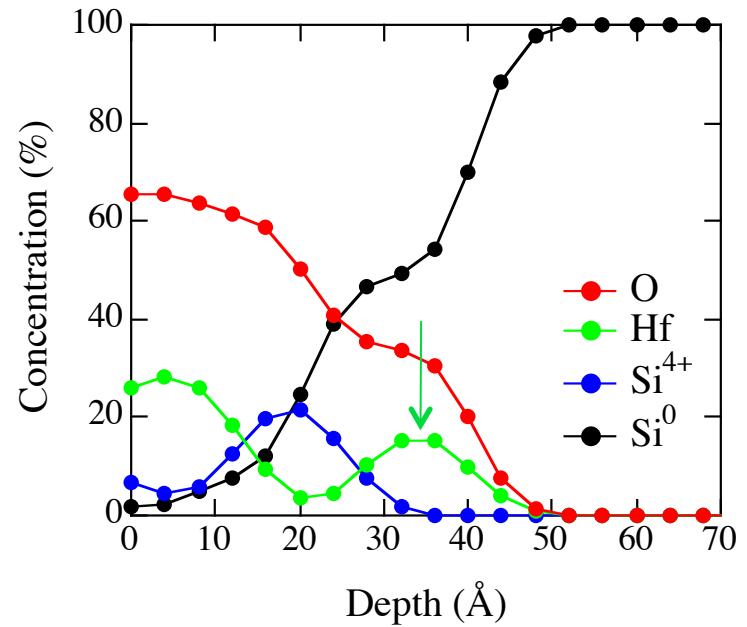
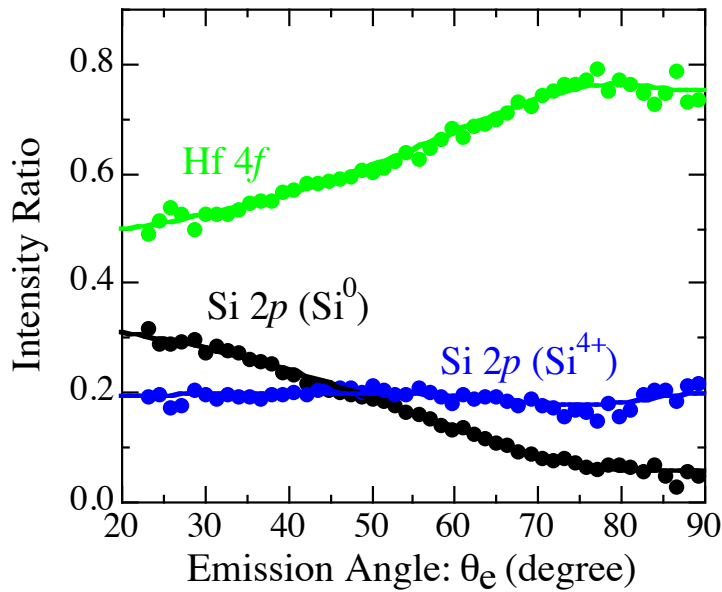
($\alpha = 0$ の場合、LLS法)

Hf/Si-O/Si-B強度をピーク分離により求め、イオン化断面積などを用いて感度補正して規格化

線形最小自乗法(LLS)および最大エントロピー法(MEM)により元素濃度を最適化し、手法の違いを比較した。

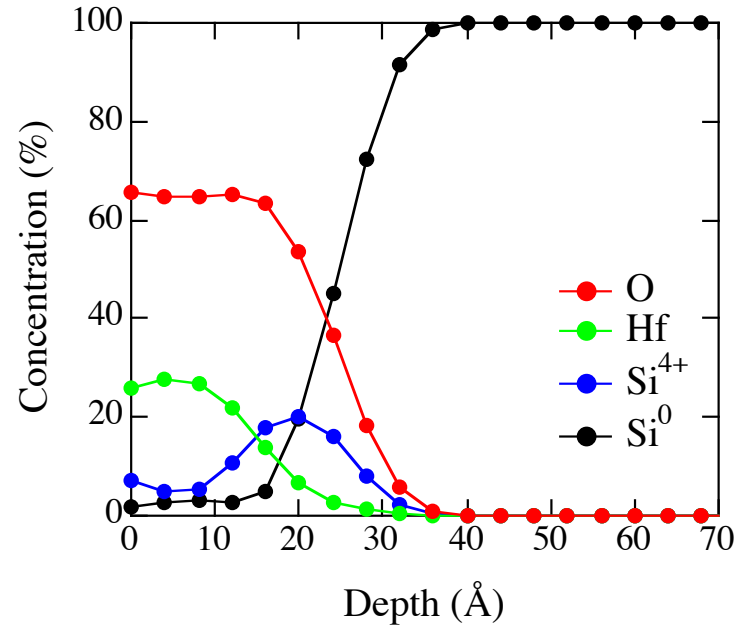
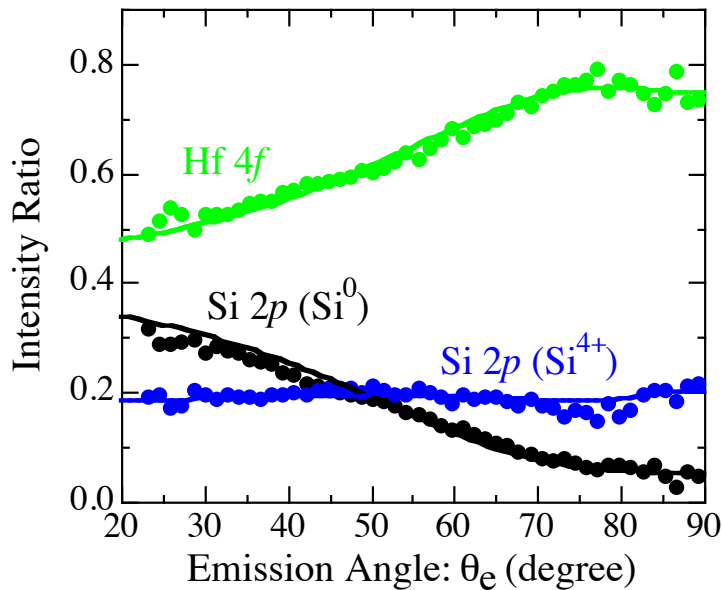
LLS法

問題点:
データの
過剰フィッ
ティング

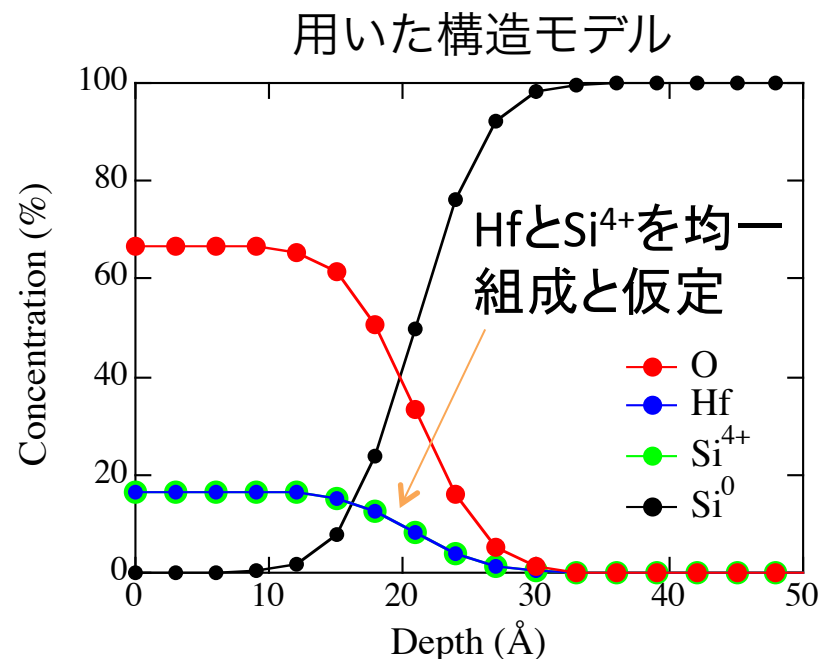
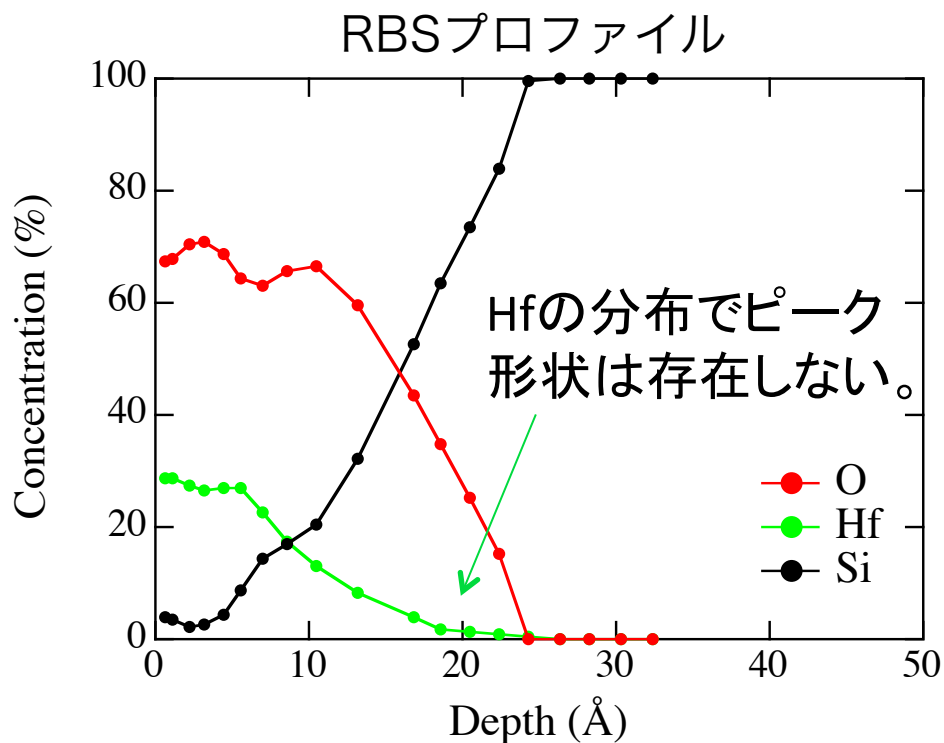


MEM法

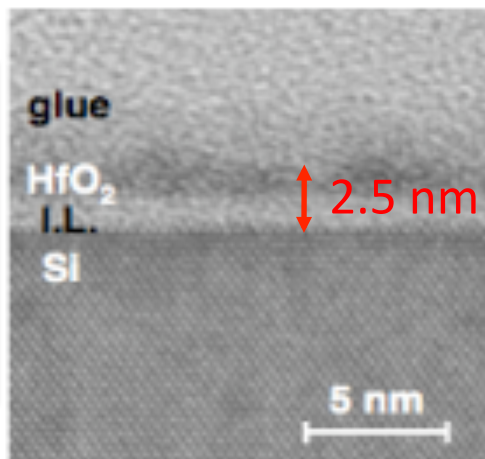
問題点:
モデルの
選び方に
任意性



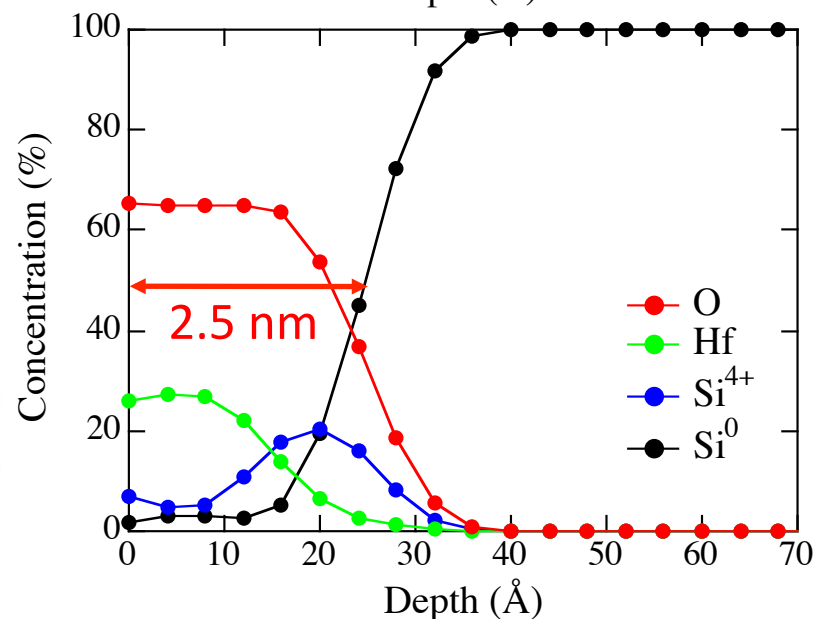
MEM解析に用いた構造モデル



断面TEM像

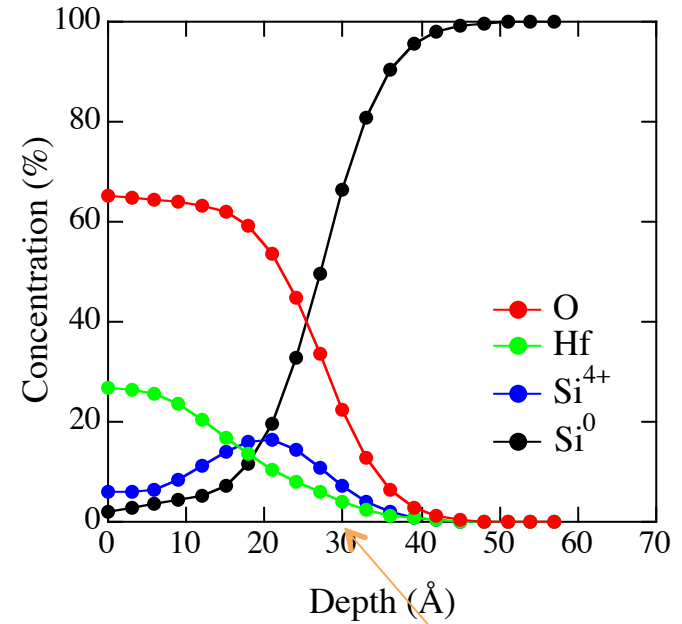
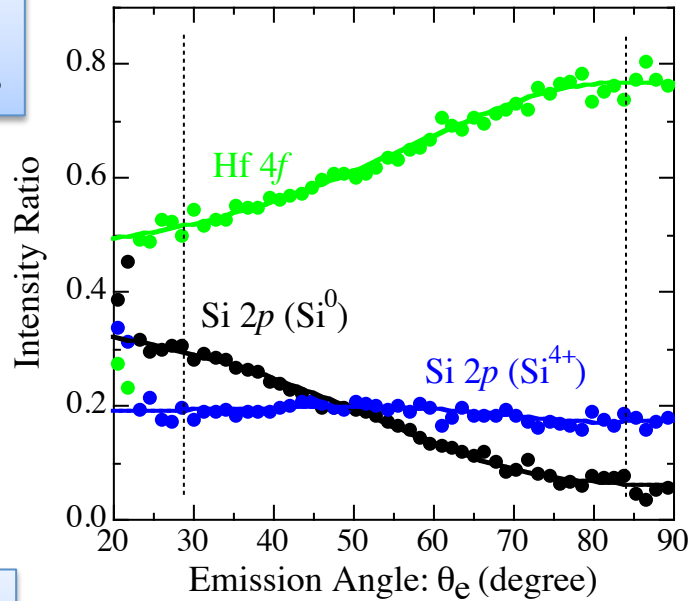


RBSの深さ方向プロファイルや断面TEM膜厚にほぼ一致する結果を得ることができた。

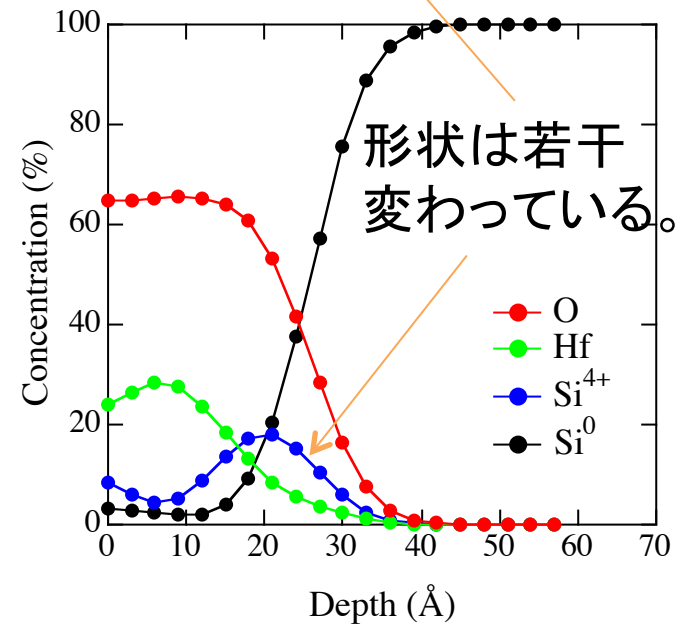
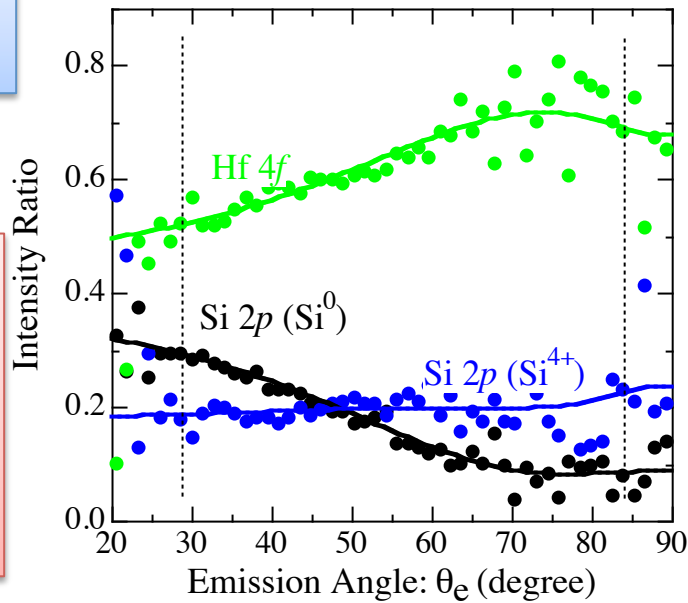


スループットの評価

積算時間
~2 hours

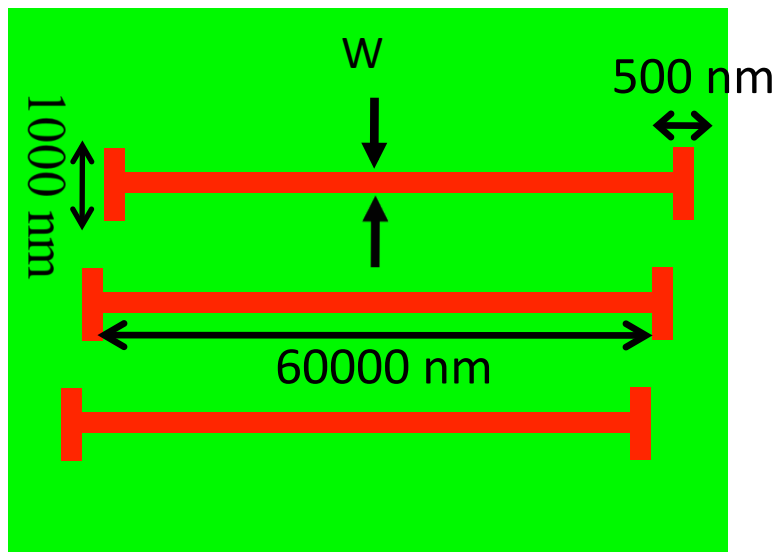


積算時間
~30 min

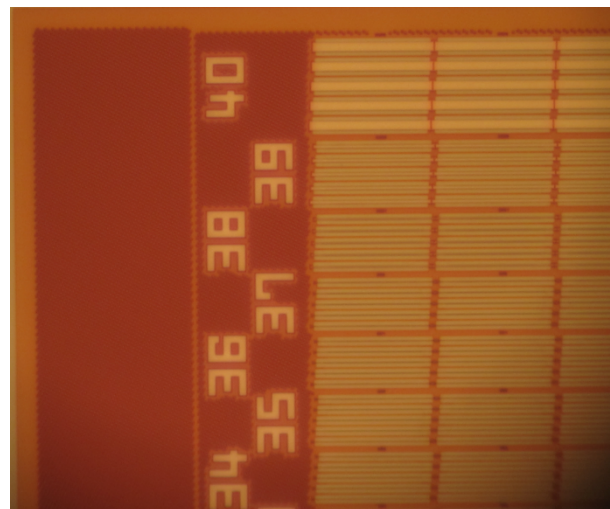


“通常の”ロン
グスキャンの
感覚で深さ方
向解析が可能
か？

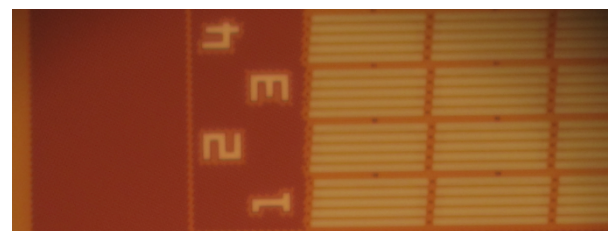
Poly-Siゲートパターン試料



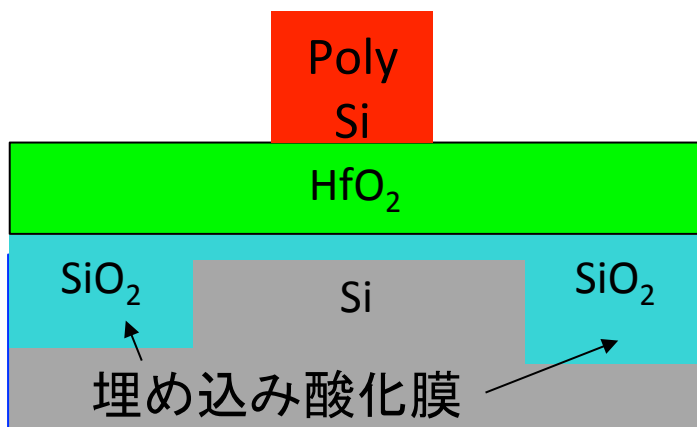
試料上面図



...



光学顕微鏡像

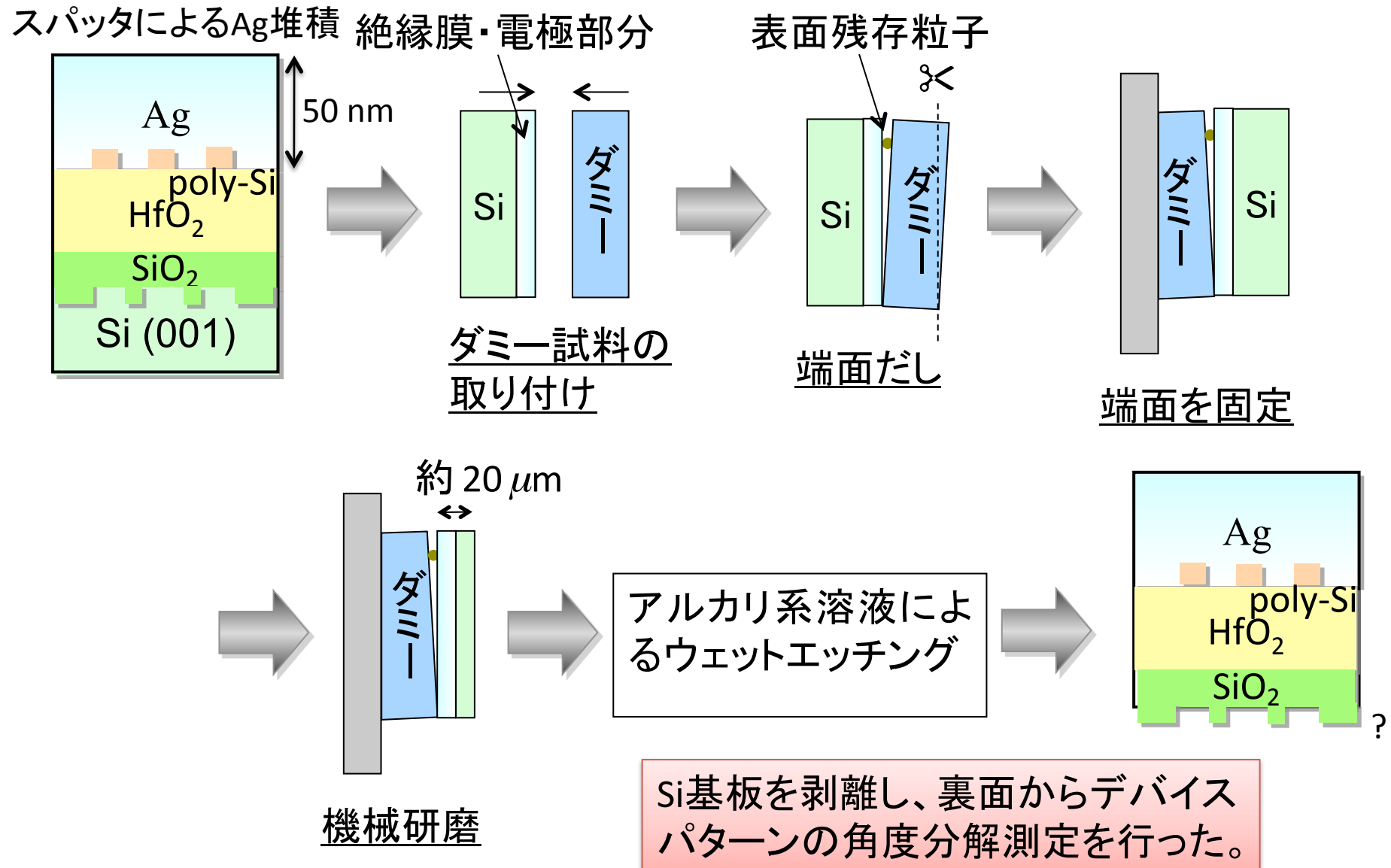


試料断面図

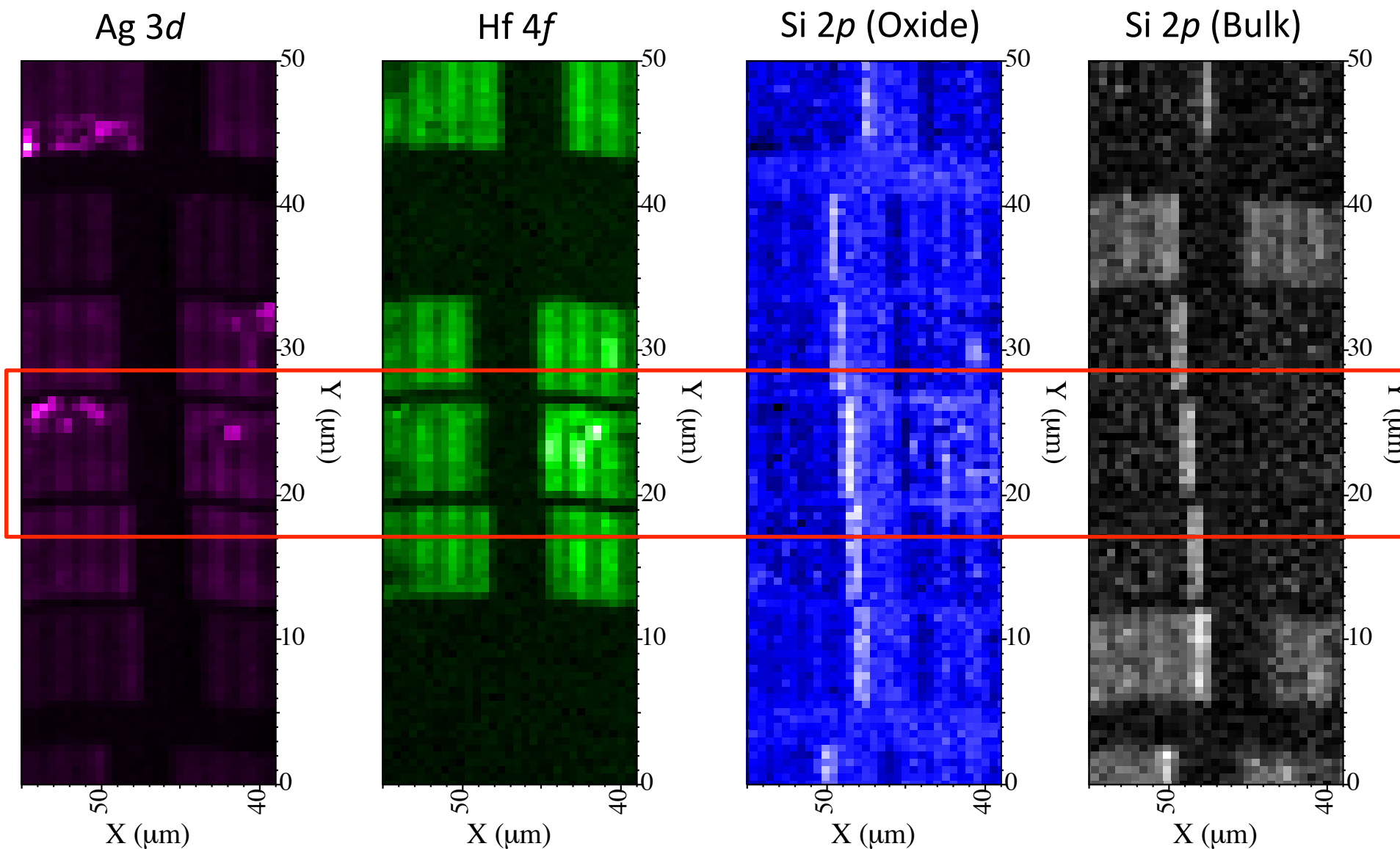
Poly-Siゲートパターン試料を用いて微小領域における深さ方向分布解析を行う。

試料 No.	ゲート幅 W (nm)
40	5000
39	2000
38	1000
37	500
36	400
35	380
•	•
•	•
•	•
5	50
4	45
3	40
2	35
1	30

裏面研磨加工



化学状態マッピング(Wide)



場所によってエッチングに差異がある→中心のゲートを選択し、深さ方向解析

化学状態マッピング(Narrow)

17/19

測定領域: 8 μm x 8 μm

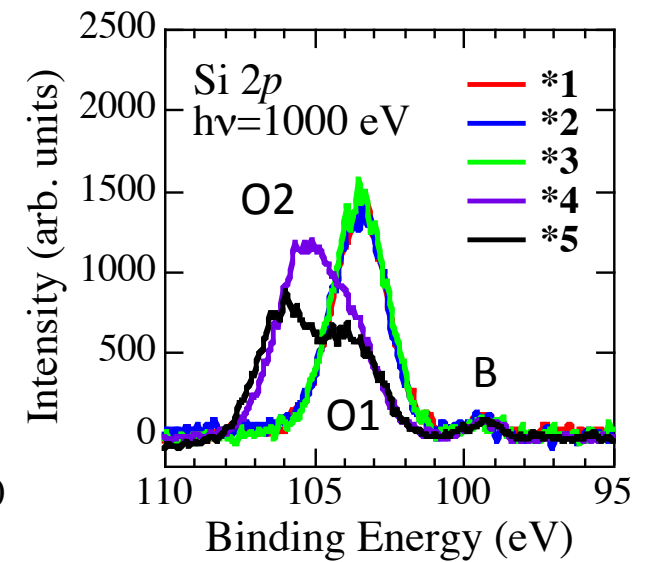
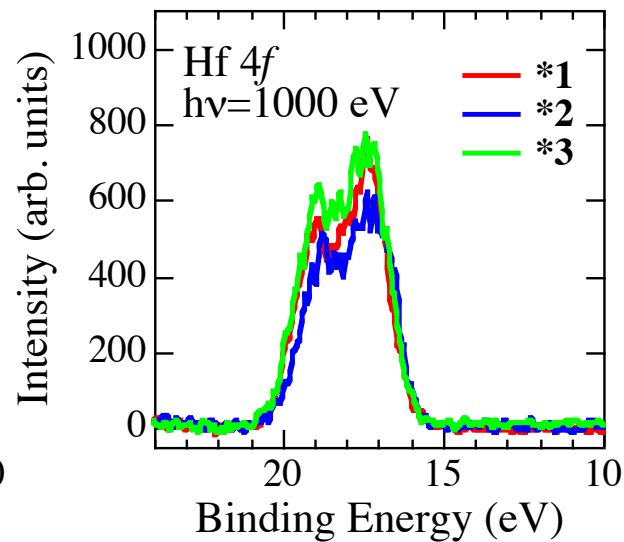
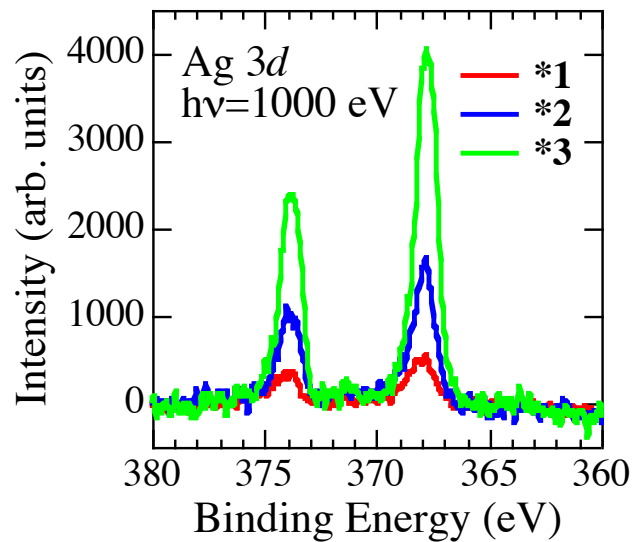
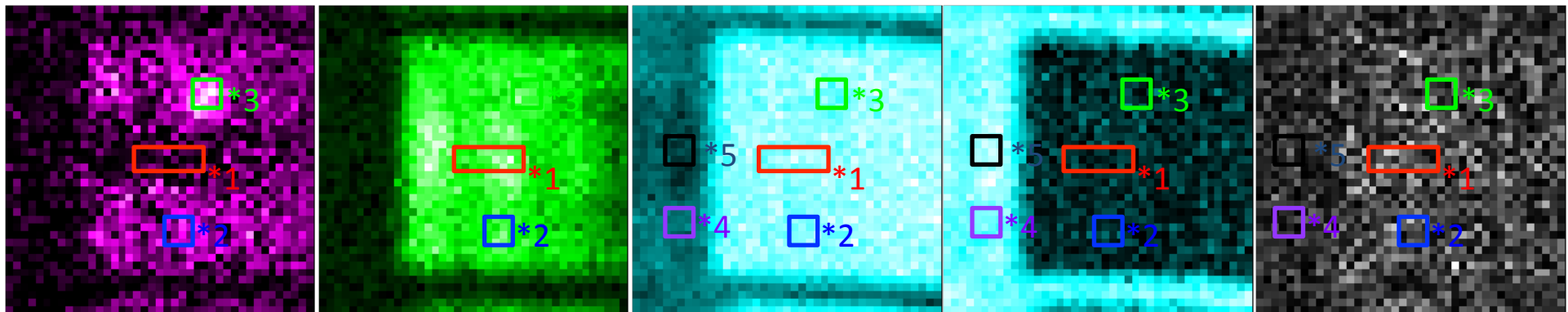
Ag 3d

Hf 4f

Si 2p (Oxide1)

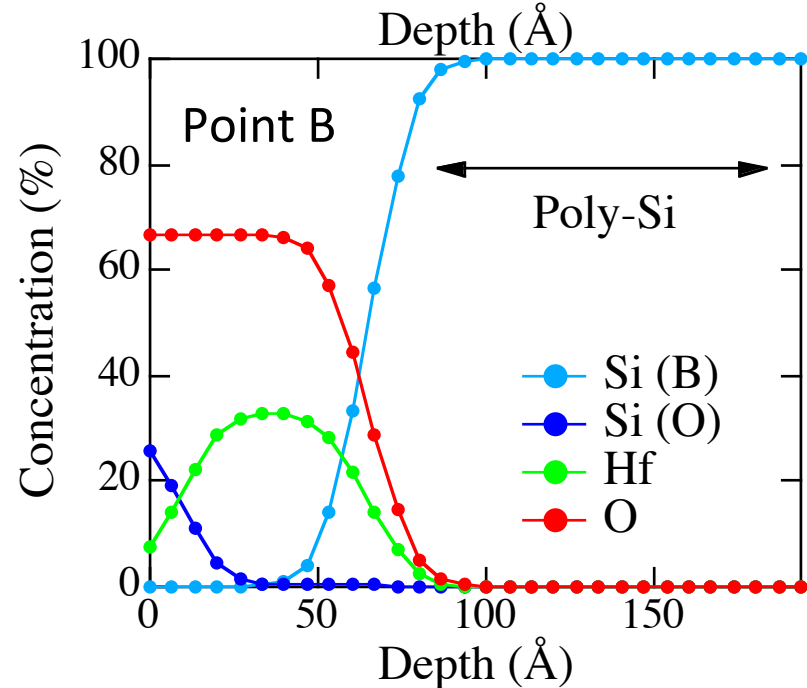
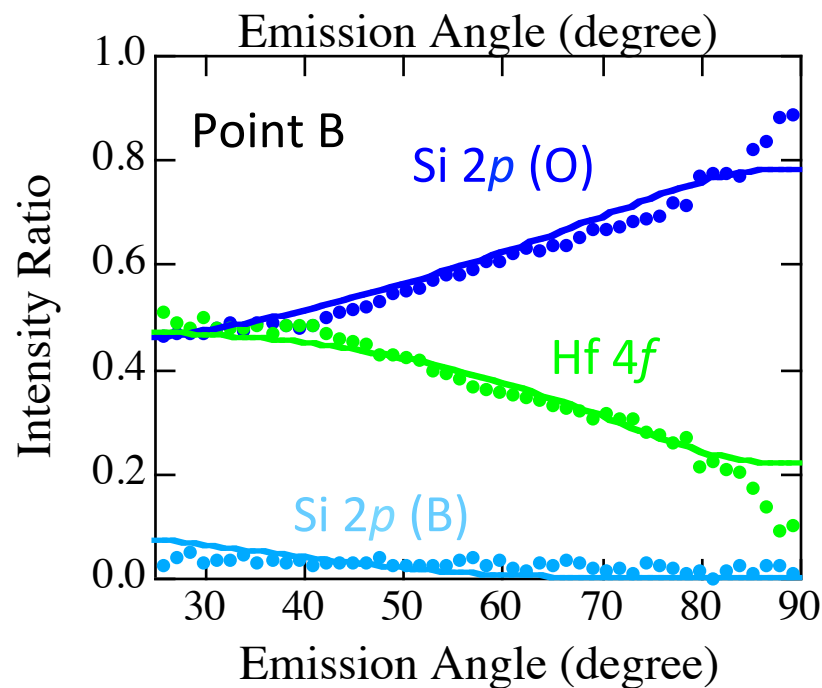
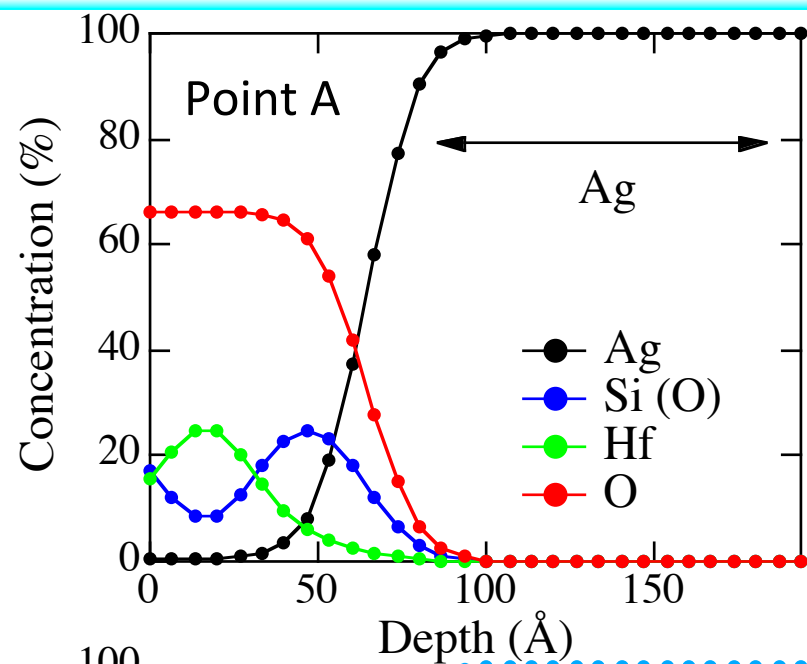
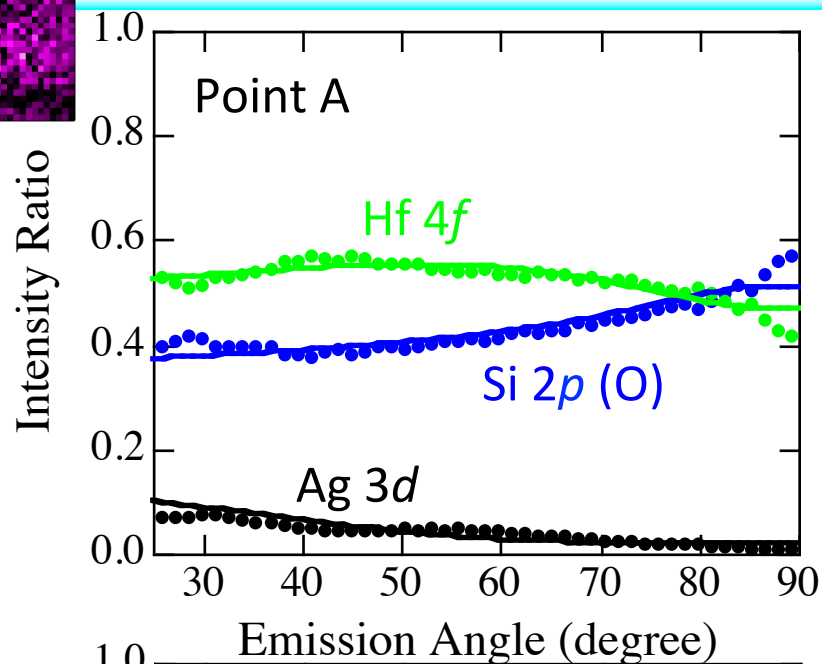
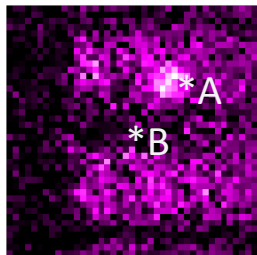
Si 2p (Oxide2)

Si 2p (Bulk)



Ag 3dの強度に場所依存性はあるものの、ゲート部の強度低下を検出できている。
チャンネル層の内部と外部でSi 2p (oxide)にケミカルシフト \rightarrow チャージングの影響？

ピンポイント深さ方向解析



3D Nano ESCAにて最大エントロピー法によるMOSデバイス構造の深さ方向解析を行った。

- $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$ ゲートスタックにおいて積層順を反映した光電子検出角度プロファイルが得られ、MEMによる深さ方向解析結果が可能となった。
- Poly-Siゲートパターンデバイス構造試料において、ピンポイント深さ方向解析も可能であることを示した。