

MOSFET用ゲート絶縁膜の光電子分光

東京大学大学院工学系研究科 豊田智史

共同研究者

東大院工

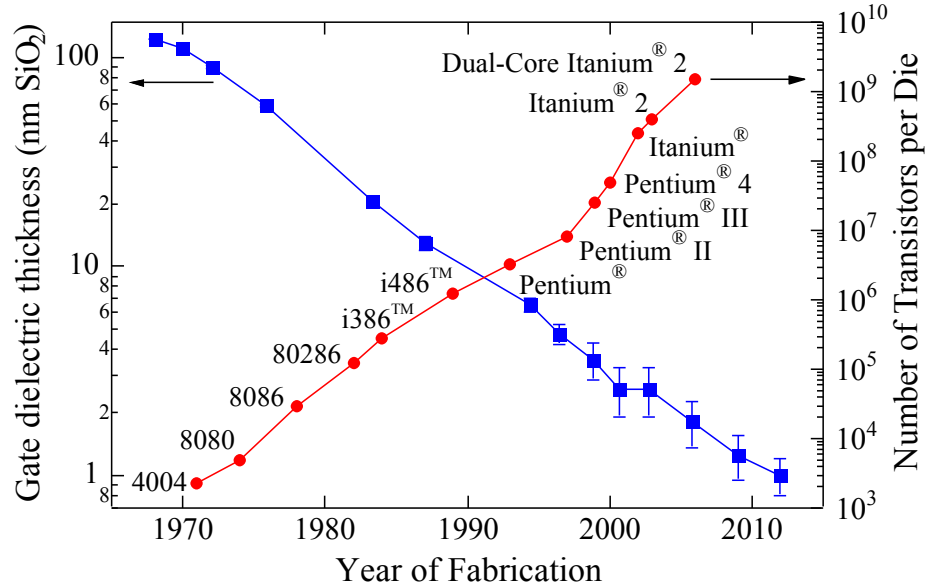
尾嶋正治、組頭広志、岡林潤(現東工大)、高橋晴彦(現富士通)、安原隆太郎、谷村龍彦、鎌田洋之

半導体理工学センター(STARC)

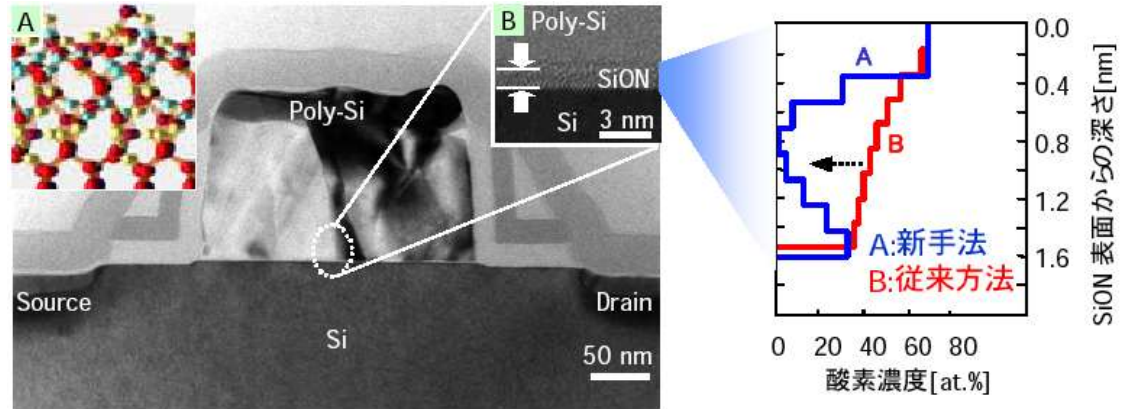
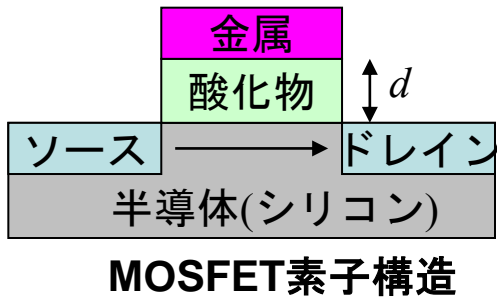
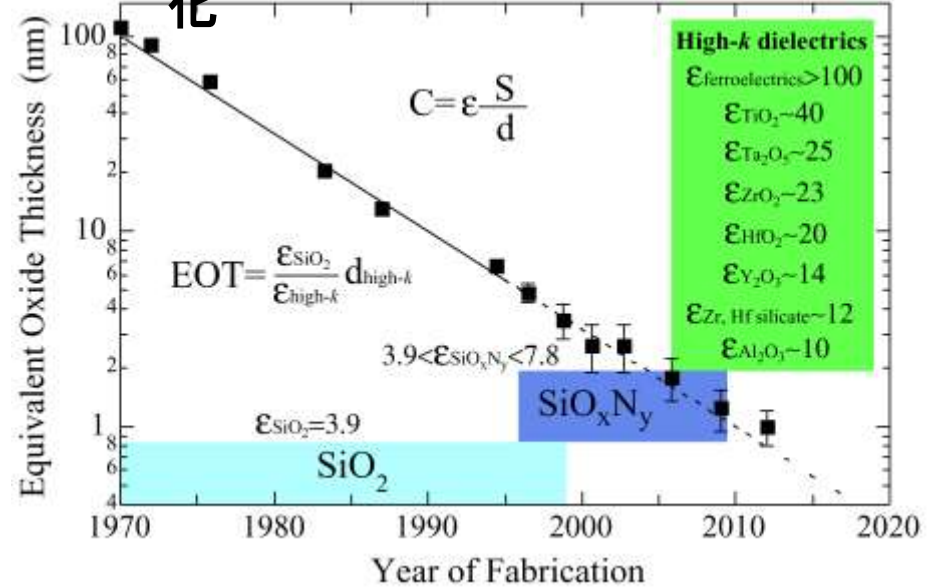
劉紫園(NECEL)、劉国林(沖電気)、池田和人(富士通)、臼田宏治(東芝)

研究の背景

ムーアの法則とゲート絶縁膜厚



ゲート絶縁膜の高誘電率化



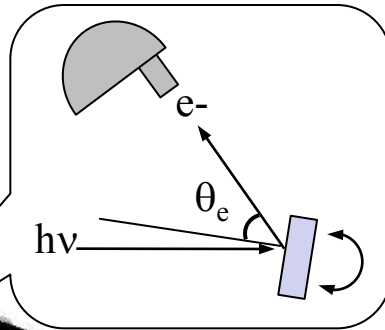
D. Matsushita *et al.*, IEDM, pp. 847 (2005).

デバイス特性と電子状態の相関関係を明らかにすることが重要

実験方法

Photoelectron analyzer
SCIENZA SES100

SR



Load lock

Preparation chamber

Main chamber

放射光光電子分光装置
@KEK-PF BL-2C

測定試料

- SiO₂膜(標準試料)
- SiO_xN_y膜
- High-*k*膜

測定条件

- 光エネルギー($h\nu$): 350-1150 eV
- 全エネルギー分解能: 150-600 meV
- 光電子検出角度(θ_e): 0° - 85°
- 取り込み角: ±4° 程度

解析法

- モンテカルロ法
NIST Database for the Simulation of
Electron Spectra for Surface Analysis:
(<http://www.nist.gov/srd/nist100.htm>)
- 最大エントロピー法
S. Toyoda et al., SIA 2008

バンド不連続の解析

(1) 価電子帯不連続

価電子帯光電子分光スペクトル

- 基板シグナルの除去
- 帯電効果の補正

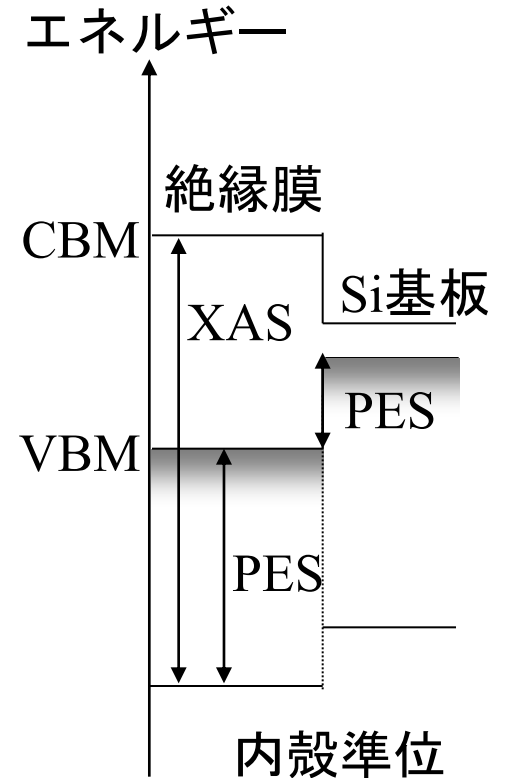
(2) 伝導帯不連続

エネルギー損失分光スペクトル

- バックグラウンドの立ち上がりを外挿

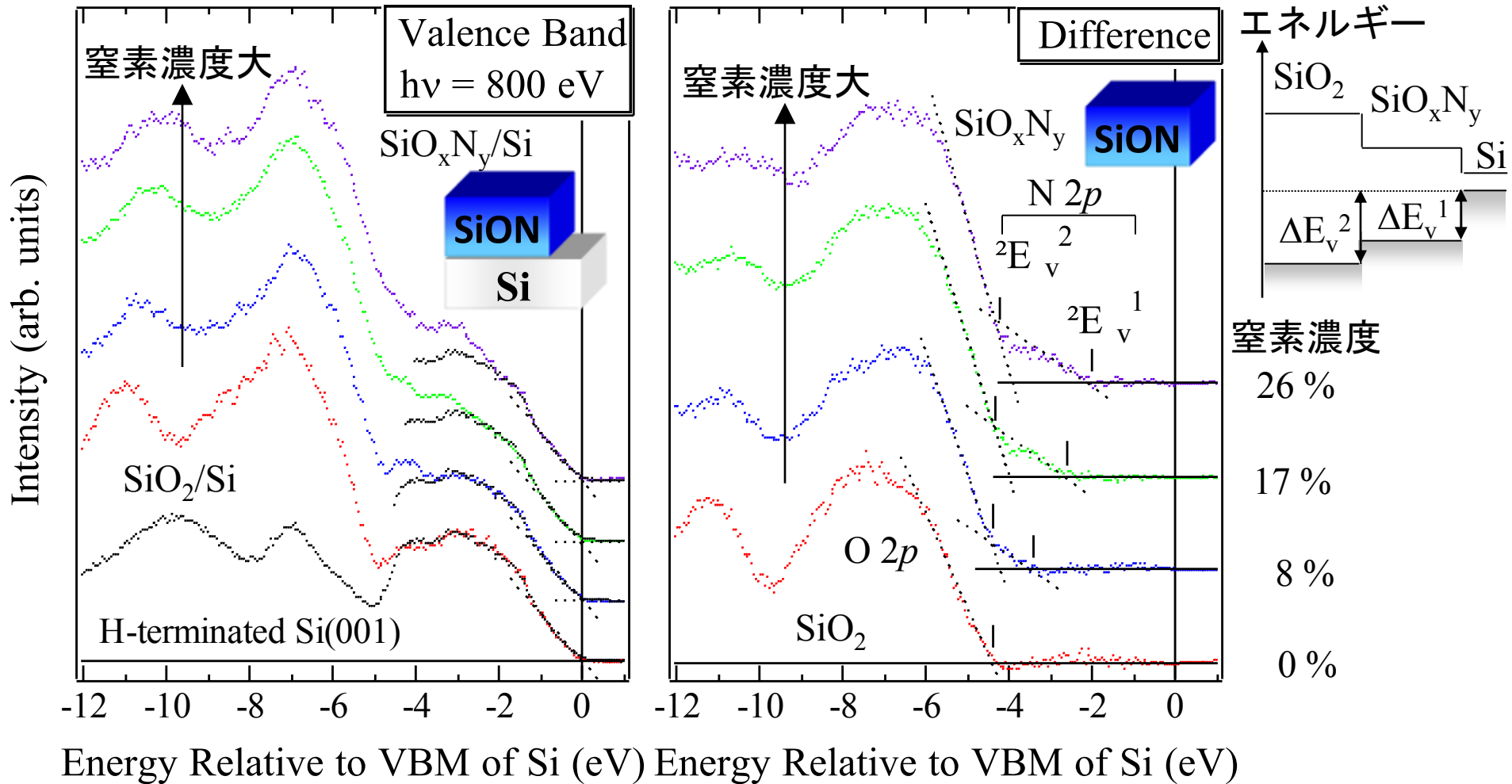
X線吸収分光法

- 一階微分のピークトップより決定



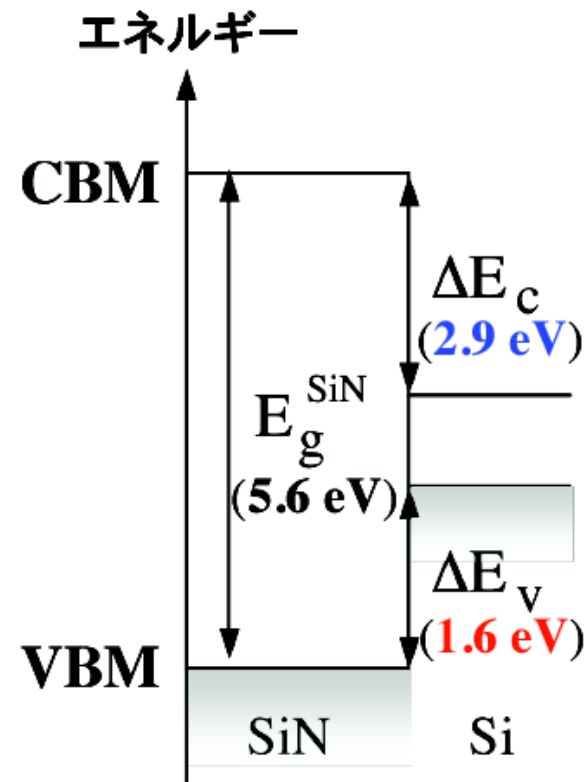
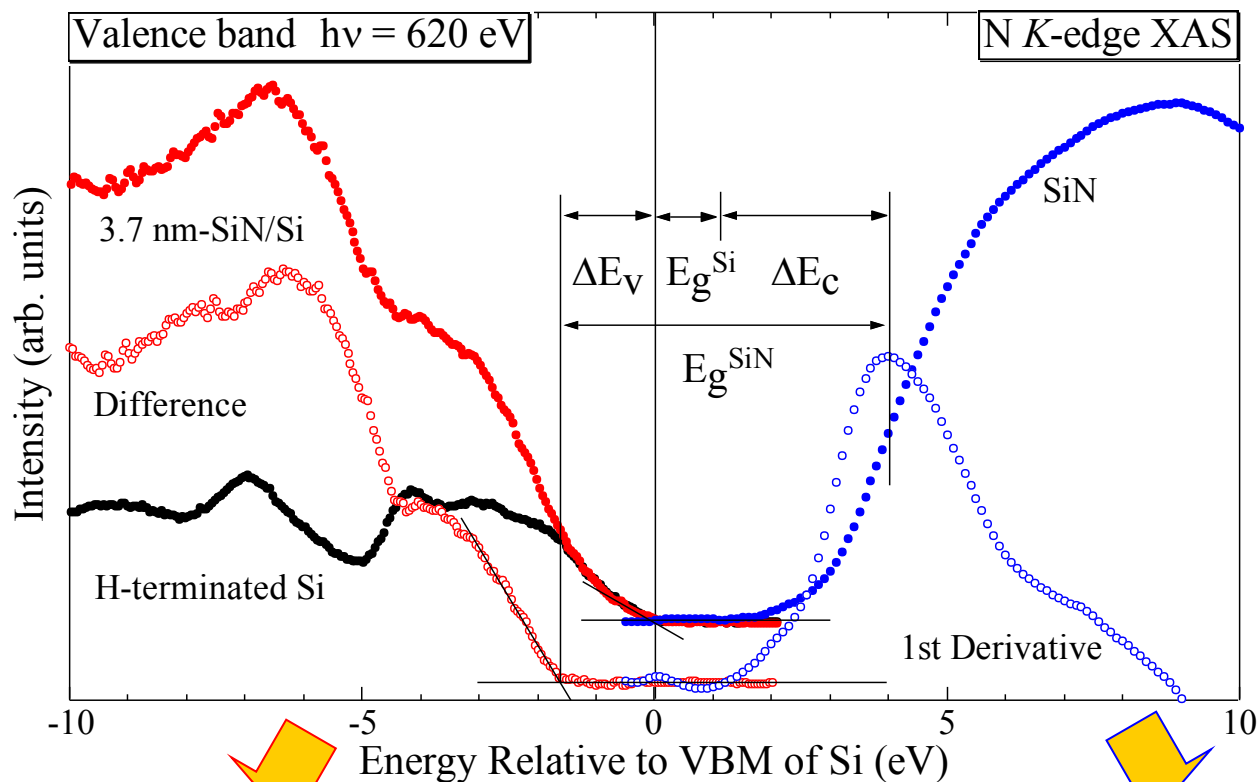
SiO₂膜およびSiO_xN_y膜において解析手法を確立し、high-*k*膜へと応用を展開した。

窒素導入による価電子帯構造の変化



Si基板からのシグナルを差し引くことにより、N 2pに由来する価電子帯上端のシフトを明瞭に観測した。

価電子帯およびX線吸収分光スペクトルの解析

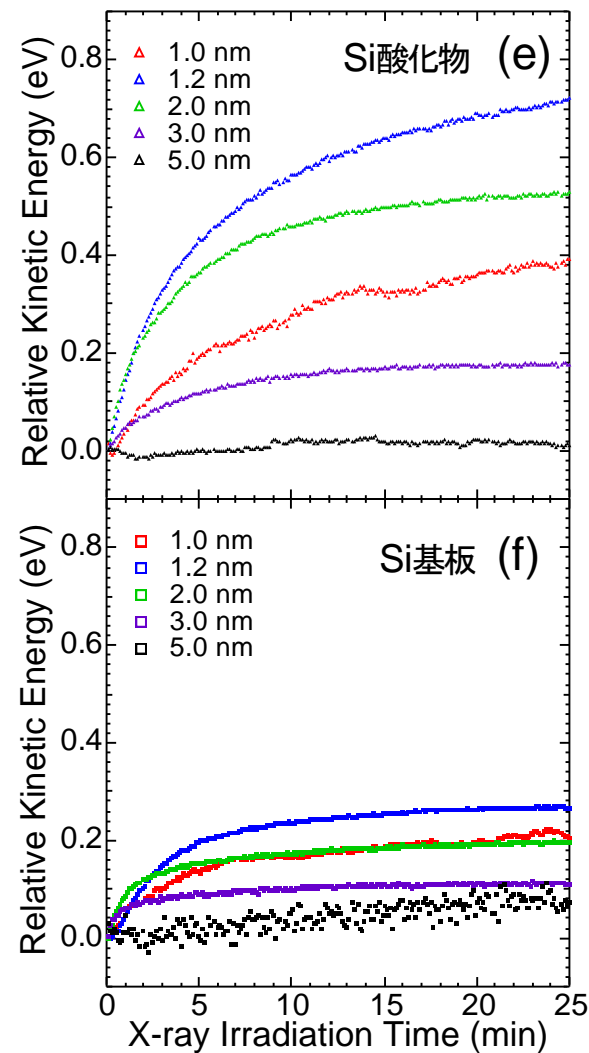
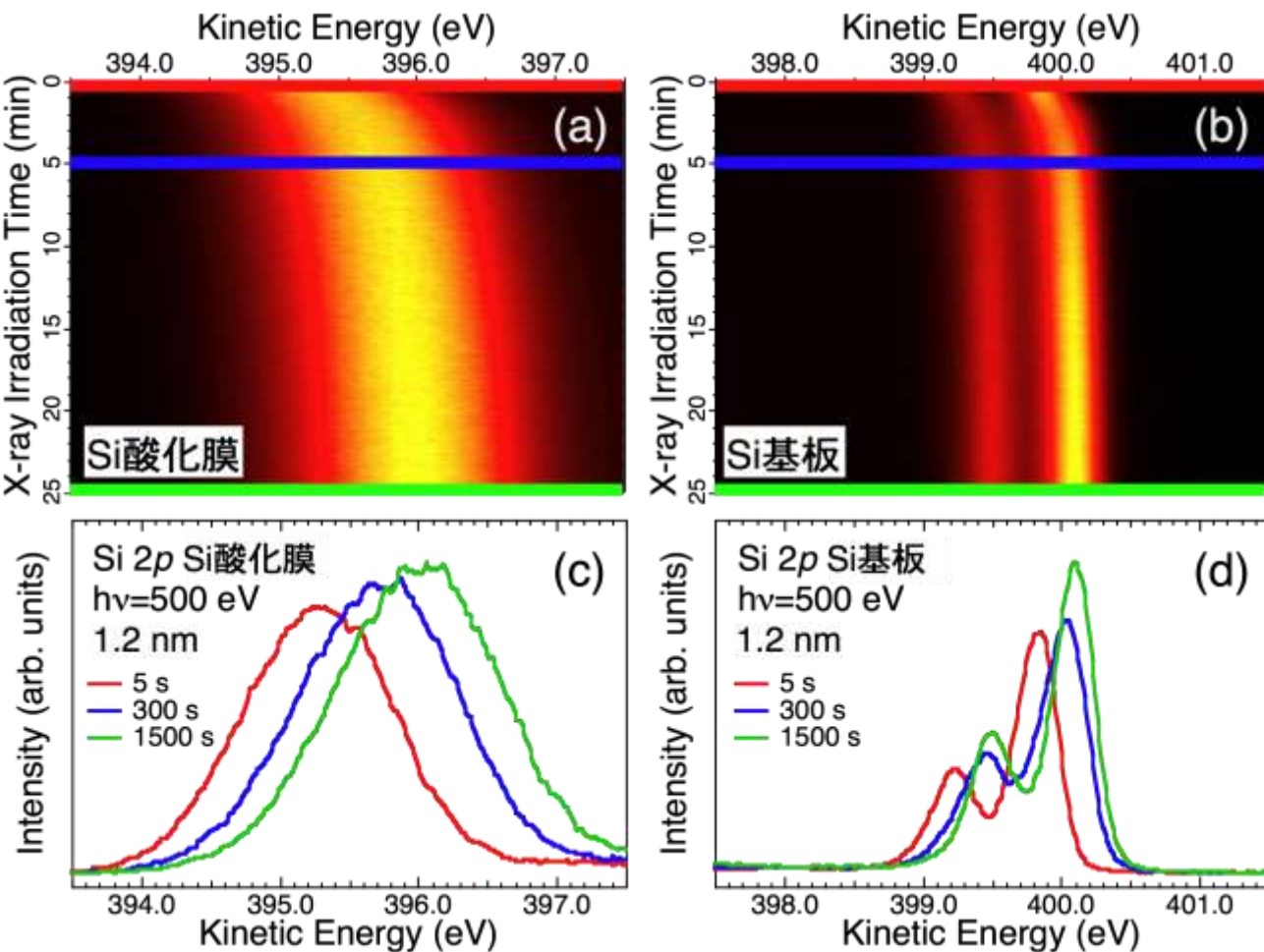


$$E_g = h\nu - (E_{N1s} - \text{VBM})$$

基板スペクトルを差分により
価電子帯上端(VBM)を決定

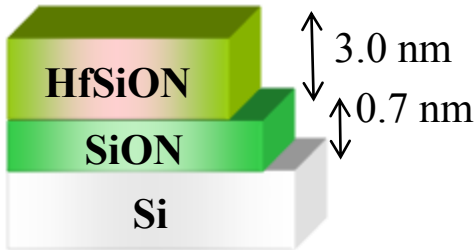
一階微分のピーク位置から
伝導帯下端(CBM)を決定

放射光照射時間依存性を用いた電荷トラップの解析

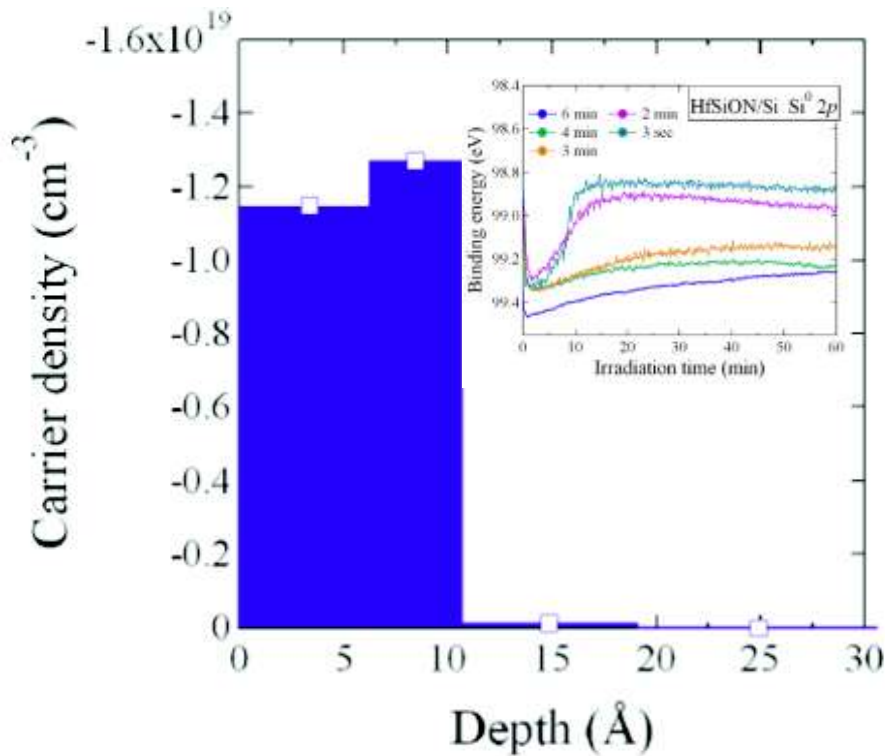


1. 高運動エネルギー側に変動
2. Si酸化物とSi基板でシフト量が大きく異なる。

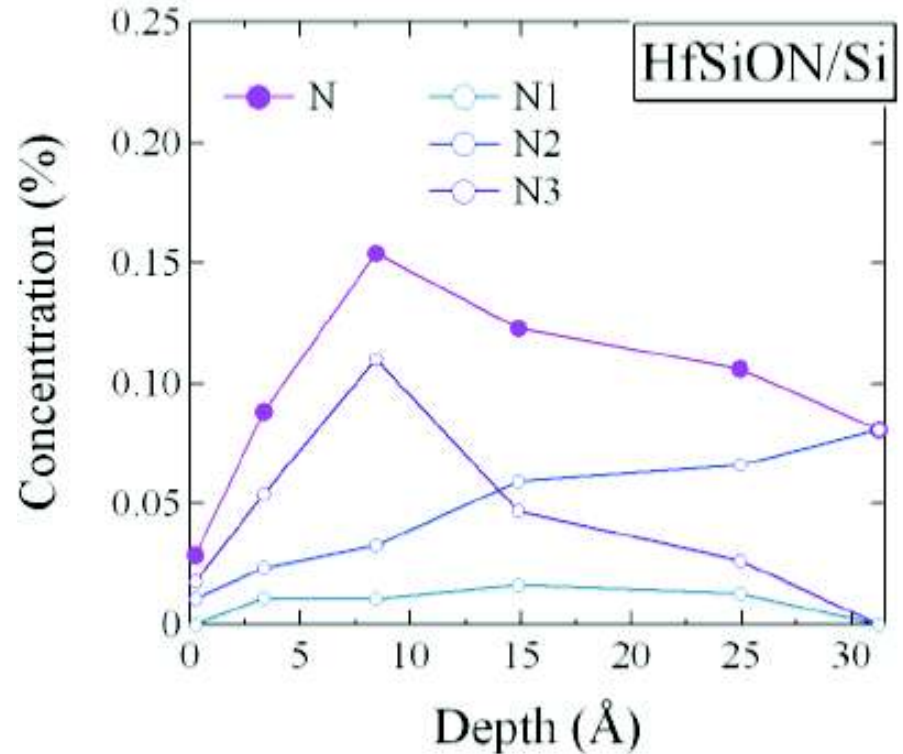
深さ方向トラップ電荷密度の解析



電荷トラップ分布



化学結合状態分布



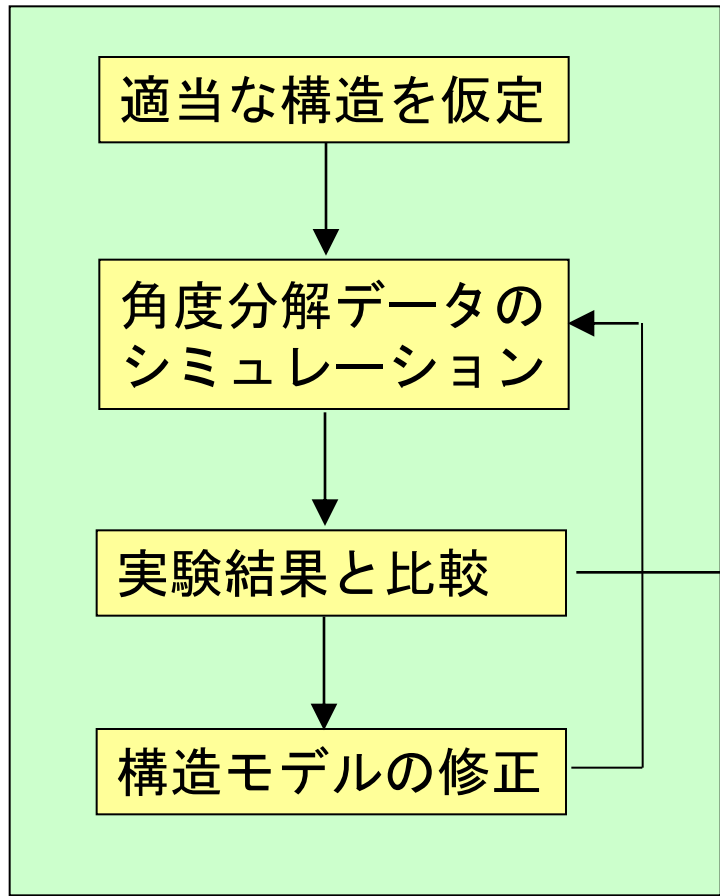
N1: $\text{Si-N}=\text{Hf}_2$

N2: $\text{N} \equiv \text{Si}_3$

N3: $\text{O-N}=\text{M}_2$ (M=Si or Hf)

T. Tanimura *et al.*, Appl. Phys. Lett. (2008),
ibid., (2009) submitted.

角度分解光電子分光を用いた深さ方向解析



The diagram shows two views of a layered material being analyzed. On the left, a normal incidence setup is shown with incident electrons (e^-) and a detector. On the right, an angle-resolved setup is shown with incident electrons (e^-) at an angle and a detector. The thickness of the material is denoted as t .

$$\chi^2 = \sum_k \frac{(I_k^{calc} - I_k^{obs})^2}{\sigma_k^2}$$
$$S = \sum_j \sum_i n_{j,i} - m_{j,i} - n_{j,i} \log \left(\frac{n_{j,i}}{m_{j,i}} \right)$$

最小化関数: $Q = 0.5\chi^2 - \alpha S$

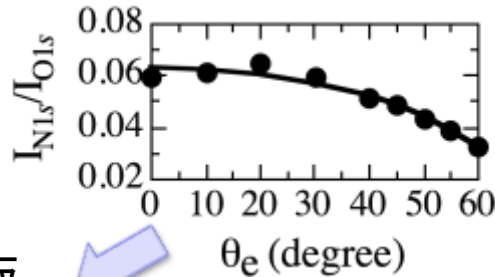
G. C. Smith and A. K. Livesey, Surf. and Interface Anal. **19**, 175 (1992).

問題点

1. 光電子強度解析における物理パラメータの信頼性
2. 構造モデルの取り方や α の効かせる度合い

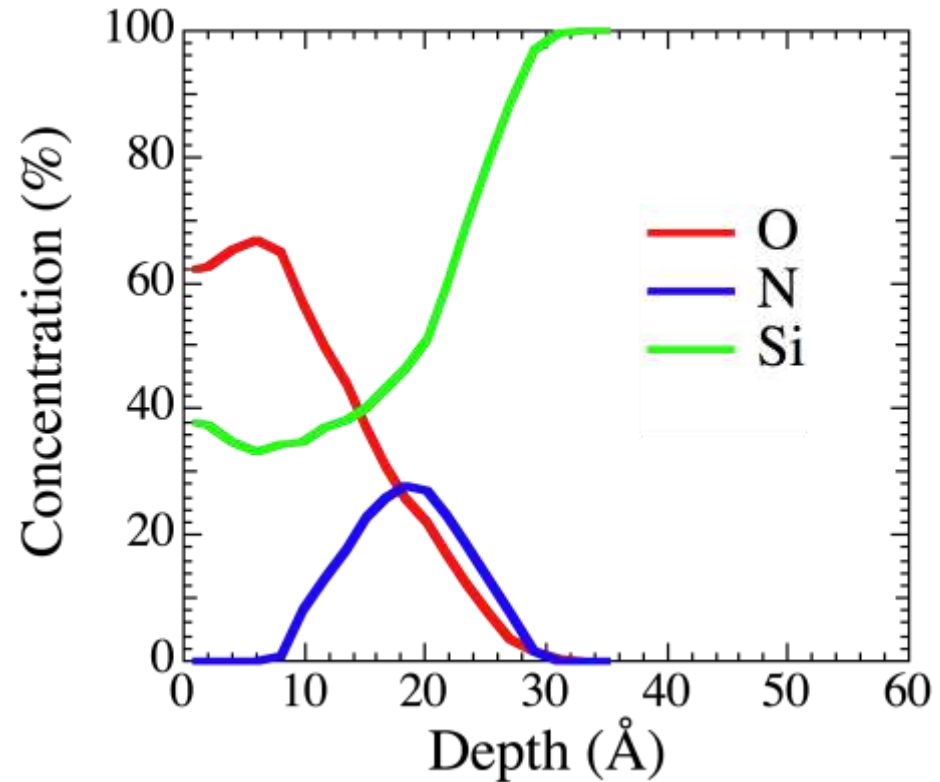
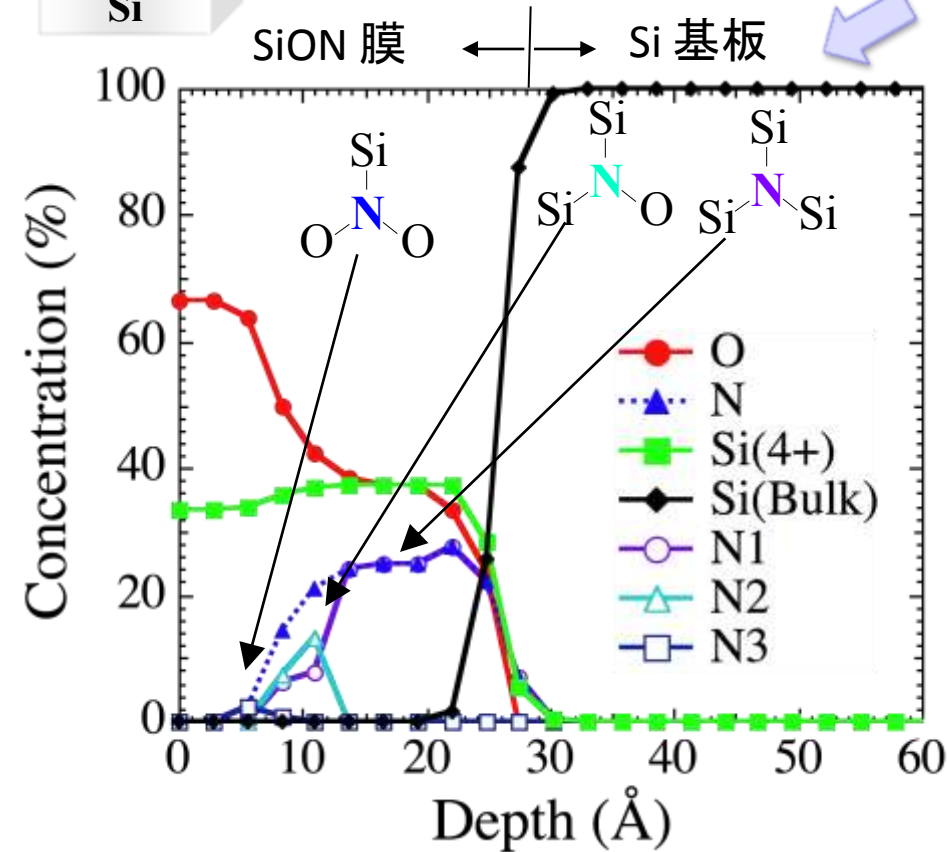
SiON膜の解析例

CVD-SiO₂/SiN 積層膜



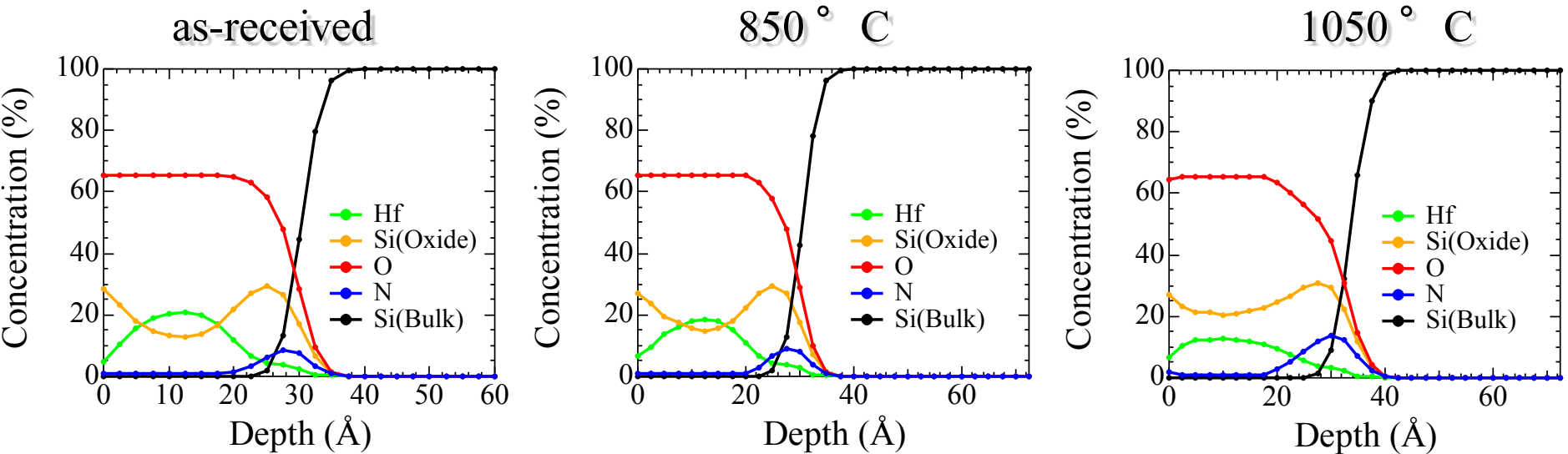
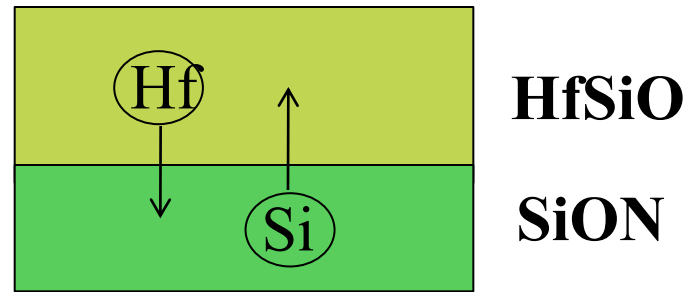
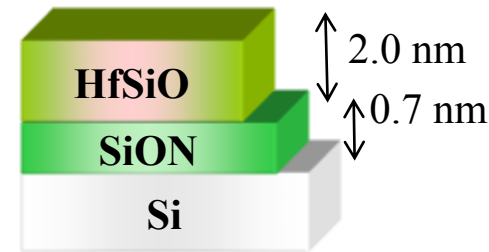
S. Toyoda *et al.*,
Surf. Interface Anal.
40, 1619 (2008).

ラザフォード後方散乱法



1. 2層構造試料の化学状態識別深さ方向解析ができた。
2. 薄膜形成プロセスへのフィードバックが可能になった。

応用例: High- k 膜の熱処理温度依存性



1. 窒素中(100 Torr)熱処理温度依存性を評価した。
2. 熱処理温度を上昇させることで膜中Hf、Si原子のミキシングが起きる。
3. 1050° Cでは窒素濃度も若干変化する。

光電子分光により得られる諸性質

試料構造

組成・膜厚
作成法

化学的性質

深さ方向分布
熱的安定性

測定パラメータ

検出角度
測定時間

物理的性質

バンド不連続
有効質量

電氣的性質

トラップ電荷
誘電率

物性と電子状態の相関を解明 →

ゲート絶縁膜作製プロセスへのフィードバック