

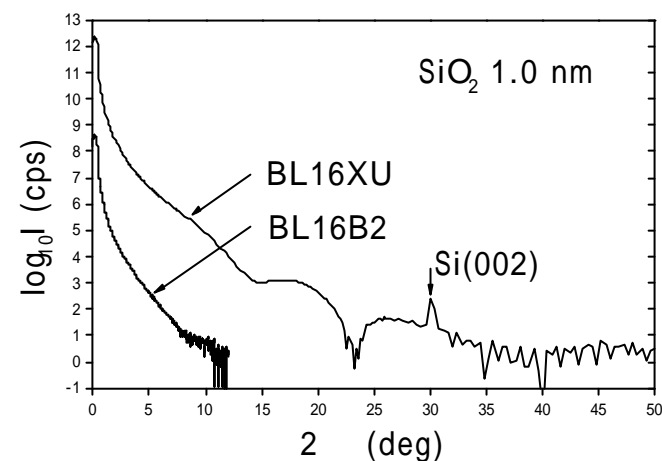
9. アンジュレータ線を用いたゲート酸化膜の高精度反射率測定技術開発

(株) 富士通研究所 材料環境技術研究所 淡路 直樹

awaji@imat.flab.fujitsu.co.jp

最新のMOSデバイス用ゲートSiO₂膜は薄膜化が進み、2nm以下の膜が開発されており、将来1nm以下のゲート膜が使われると考えられている。さらに、ゲート膜にはボロンの拡散防止のために窒素が添加されるなど複雑な構造になっており、良質なゲート膜開発のために、高精度な分析法が要求されている。しかし、ゲート膜は薄いことに加え、アモルファス構造であることから、その評価は難しい。

X線反射率法は、その評価法の一つであるが、従来の技術では、精度のある膜厚は1nmが限界であった。今回、強力なアンジュレータ線を用いたX線反射率測定技術を開発した。その結果、従来に較べ一桁高い計数率と低バックグラウンドを達成し、ダイナミックレンジ12桁（従来8桁）および測定角度範囲30°以上（従来10°）を得た。これは、評価可能膜厚0.3nmに対応しており、1nmのゲート膜の内部構造（密度、膜厚、界面、表面凹凸）が評価できる。右図は、アンジュレータビームライン16XUでの膜厚1nmゲート膜の測定結果と比較の為、偏向電磁石ビームライン16B2での結果を示す。

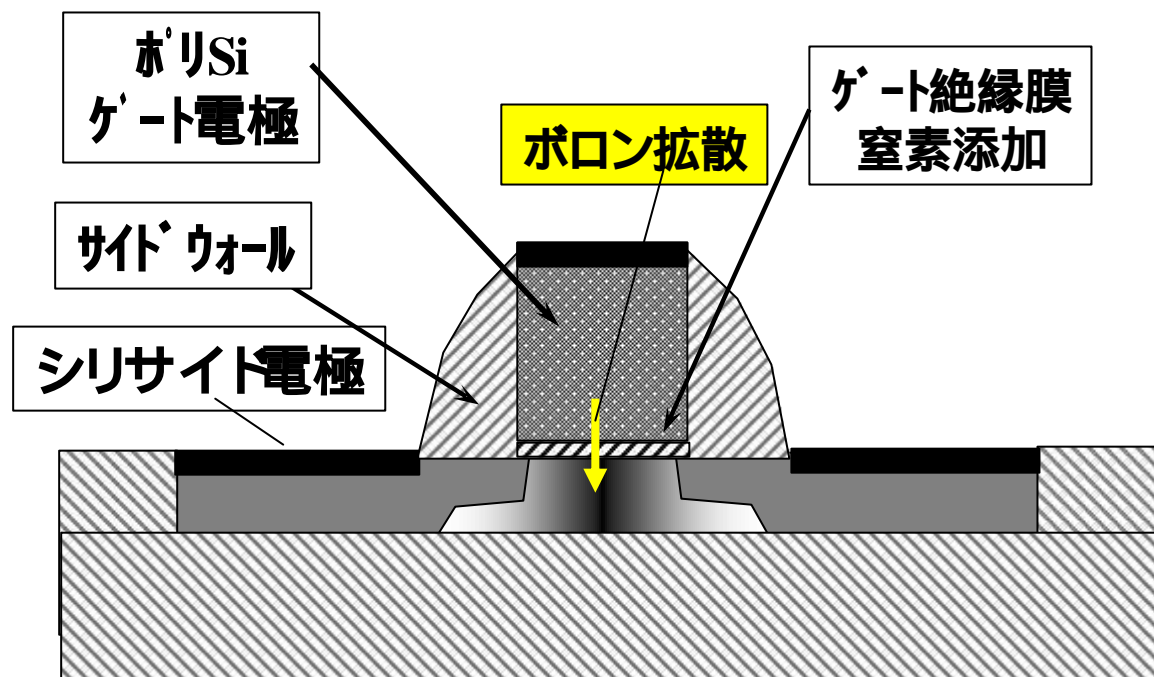


アンジュレータX線を用いたゲート酸化膜の 高精度反射率測定技術開発

(株)富士通研究所
淡路直樹

1. トランジスタ構造

ゲート長40nm, 90nmテクノロジー
ゲート酸化膜1.4nm



ロードマップ ITRS 2001 (MPU)

量産開始年	2001	2004	2007	2010	2013	2016
テクノロジーノード	130nm	90nm	65nm	45nm	32nm	22nm
ゲート長	90nm	53nm	35nm	25nm	18nm	13nm
SiO ₂ 換算膜厚	1.3 ~ 1.6nm	0.9 ~ 1.4nm	0.6 ~ 1.1nm	0.5 ~ 0.8nm	0.4 ~ 0.6nm	0.4 ~ 0.5nm

2. X線反射率

(1) 膜密度 (g/cm³)

$$\begin{aligned} \text{複素屈折率 } n &= 1 - \frac{r_e N_A}{2} \frac{Z + f'}{A} + i \frac{r_e N_A}{2} \frac{f''}{A} \\ &= 1 - \frac{r_e N_A}{2} \frac{Z + f'}{A} + i \frac{r_e N_A}{2} \frac{f''}{A} \end{aligned}$$

(2) 層状モデル (界面電場の連続性)

界面 i での反射強度 $E_i \sim (n_{i+1} - n_i)^2 \sim$
 $(\frac{1}{n_{i+1}} + \frac{1}{n_i})^2$ — 干渉振幅

(3) 表面・界面凹凸

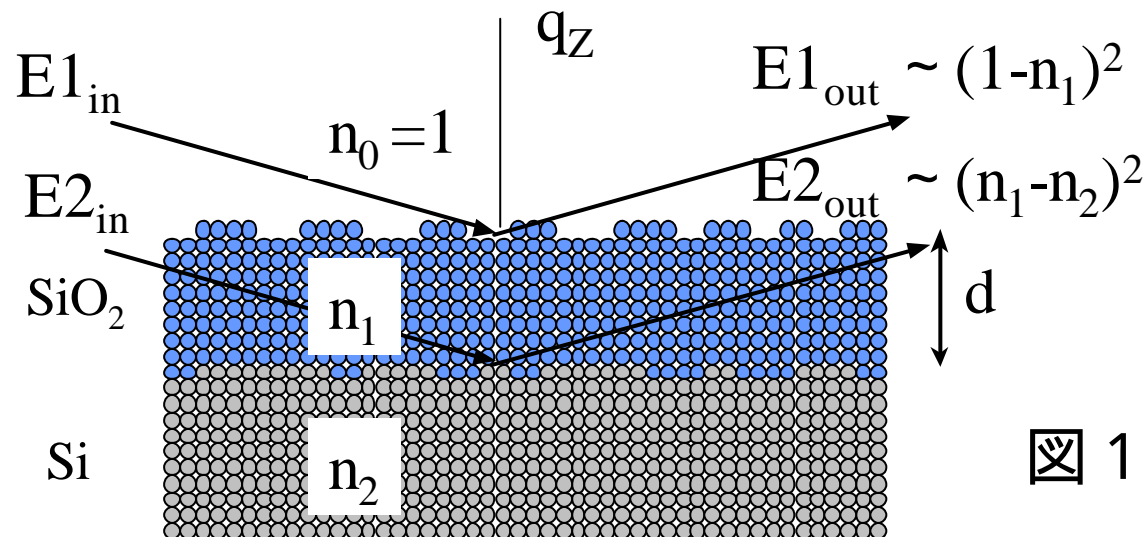
(a) $< d$ の場合 (減衰項)

$$R' \sim R \exp(-16 \pi^2 d^2 \sin^2 \theta / \lambda^2)$$

(b) $> d$ の場合 (界面スライス)

$$n_j(z) = \frac{(n_j + n_{j+1})}{2} - \frac{(n_j - n_{j+1})}{2} \operatorname{erf}\left(\frac{z - z_j}{\Delta z_j}\right)$$

Effective density method



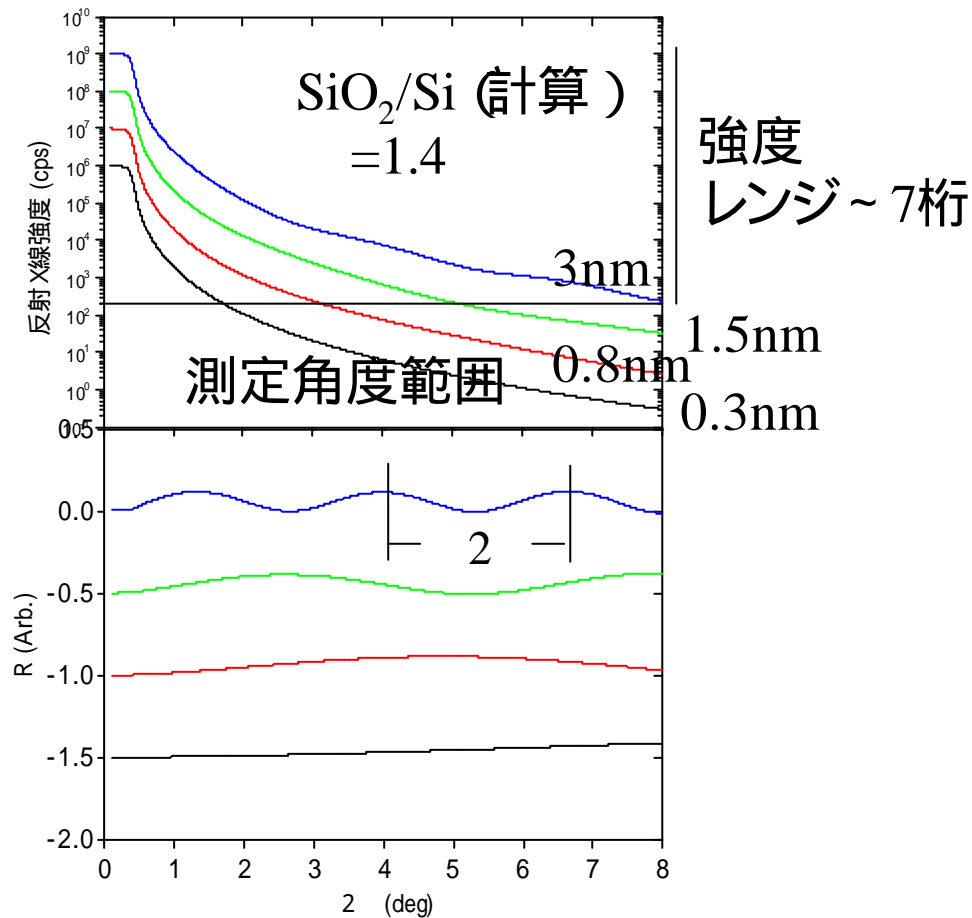
(4) 積分形式

$$R = R_F \left| \frac{1}{d} \int_0^d \exp(iq_z z) dz \right|^2$$

図 1

(5) 差分反射率 R

$$R(\theta) = R_F(\theta) \cdot \exp(-16 \frac{q_z^2 \sin^2 \theta}{\lambda^2})$$



(6) 膜厚

干渉振動一周期： $\frac{2}{\lambda} d \sin \theta$

$$\text{膜厚} : d = \frac{2}{\lambda} \frac{1}{2} \sin \theta$$



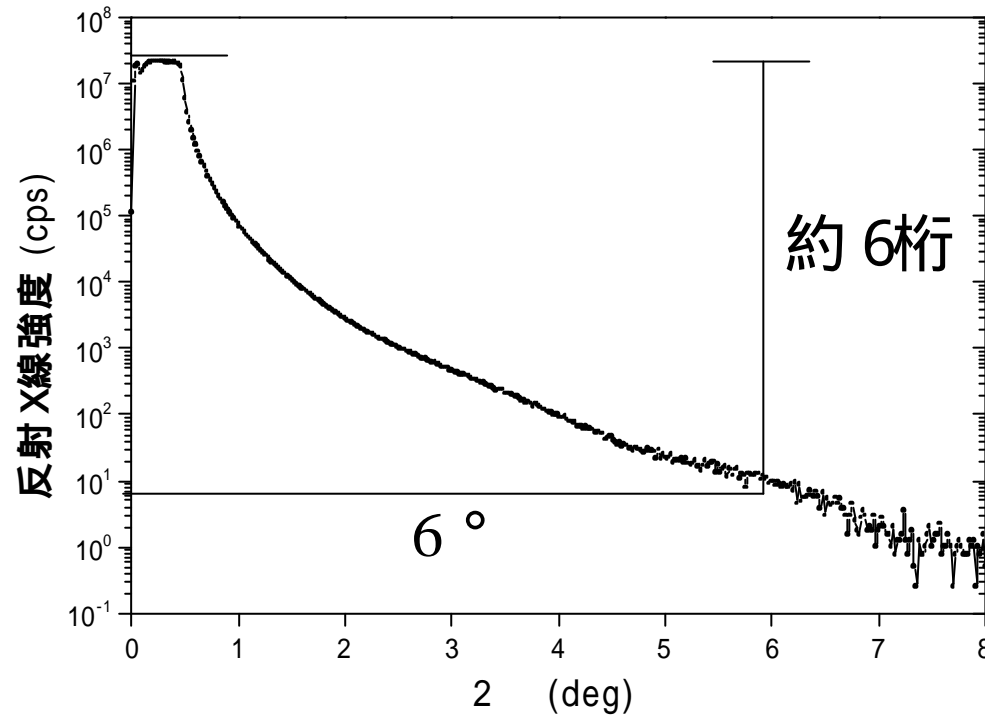
最小膜厚：(定義)

$$d_{\min} = \frac{1}{2} \lambda \sin \theta_{\max}$$

最小膜厚をさらに薄くするには
強度レンジを広くし、測定角度
範囲を高角まで広げる必要。

3.市販装置

X線波長： ($\lambda=1.541$)



最小膜厚

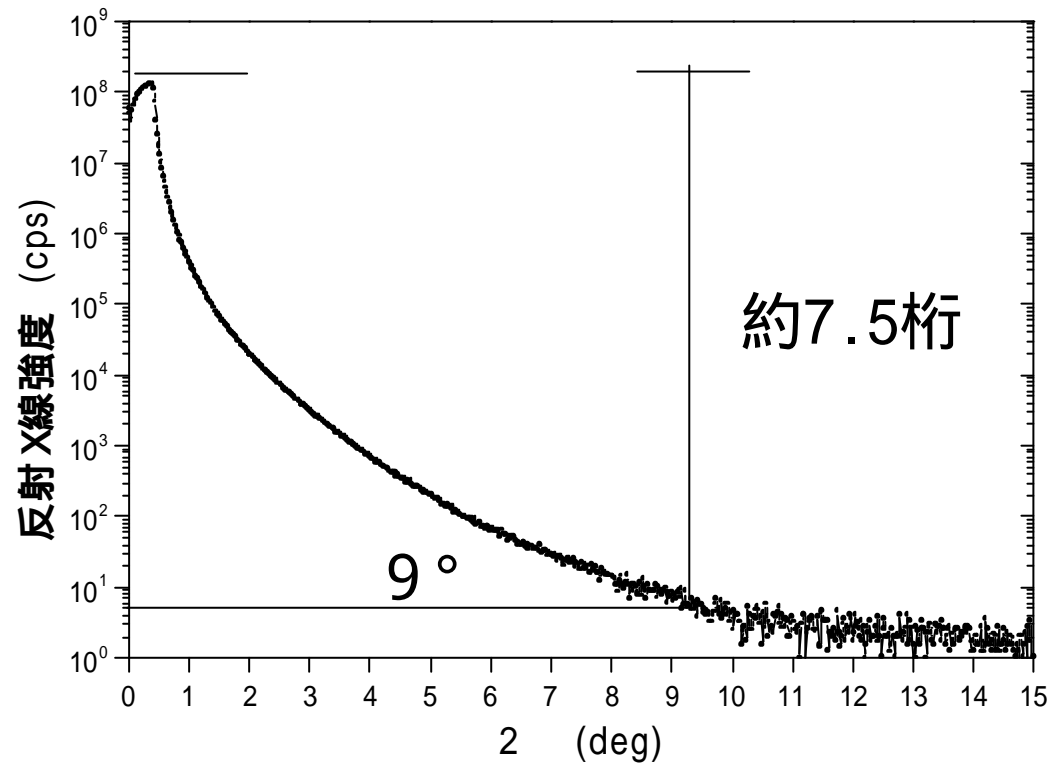
$$d_{\min} = \frac{\lambda}{2 \sin \theta_{\max}}$$

=1.5nm

リガクRGXR :Cuローター光源 60KV,300mA(18KW)

4. 偏向ビームライン16B2

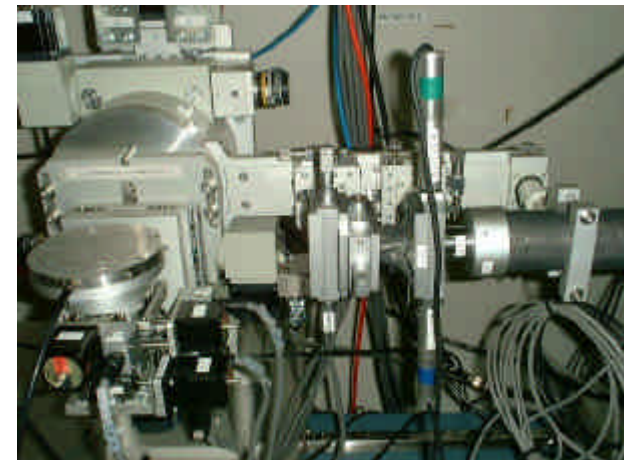
X線波長： ($\lambda=1.541$)



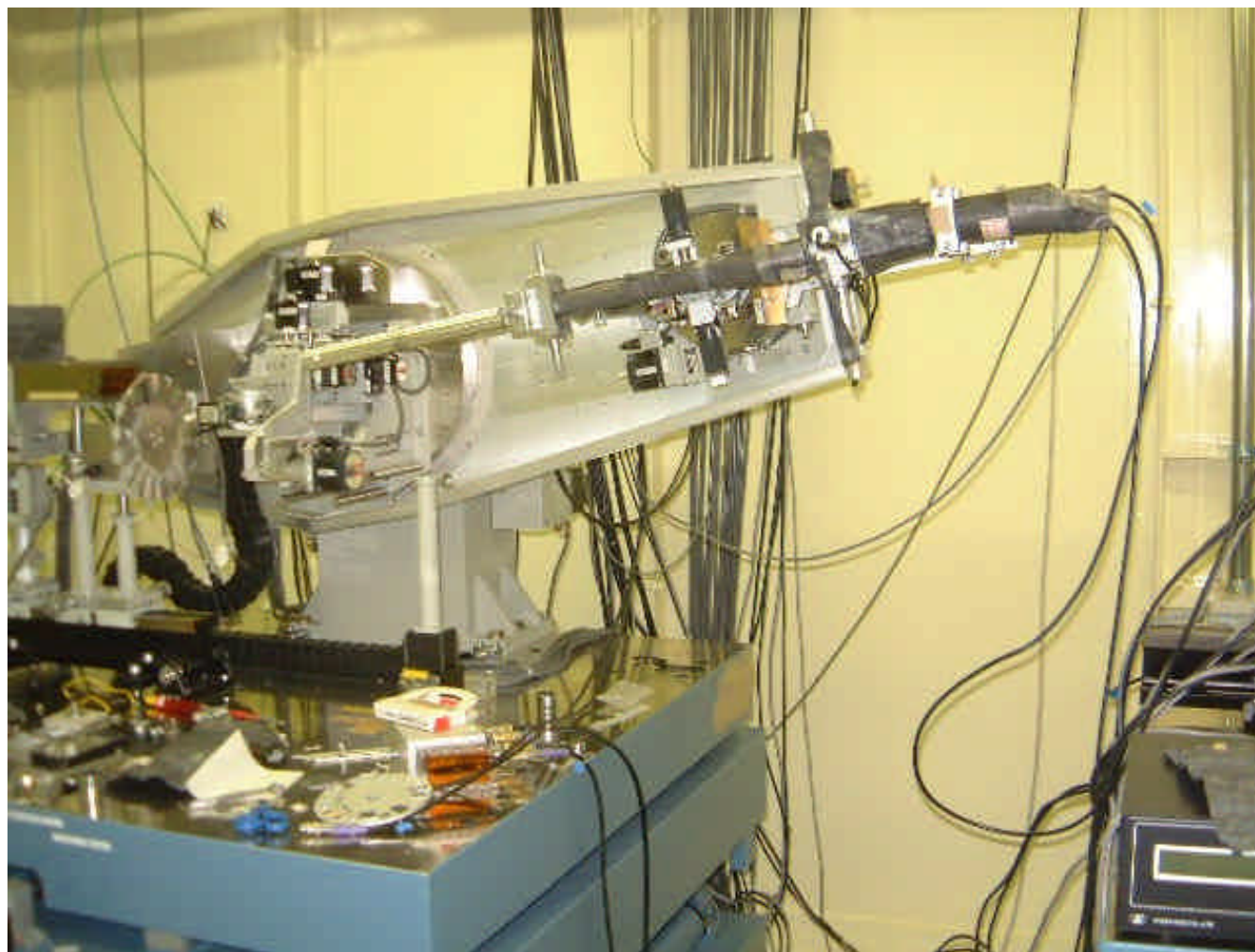
最小膜厚

$$d_{\min} = \lambda / 2 \sin \theta_{\max}$$

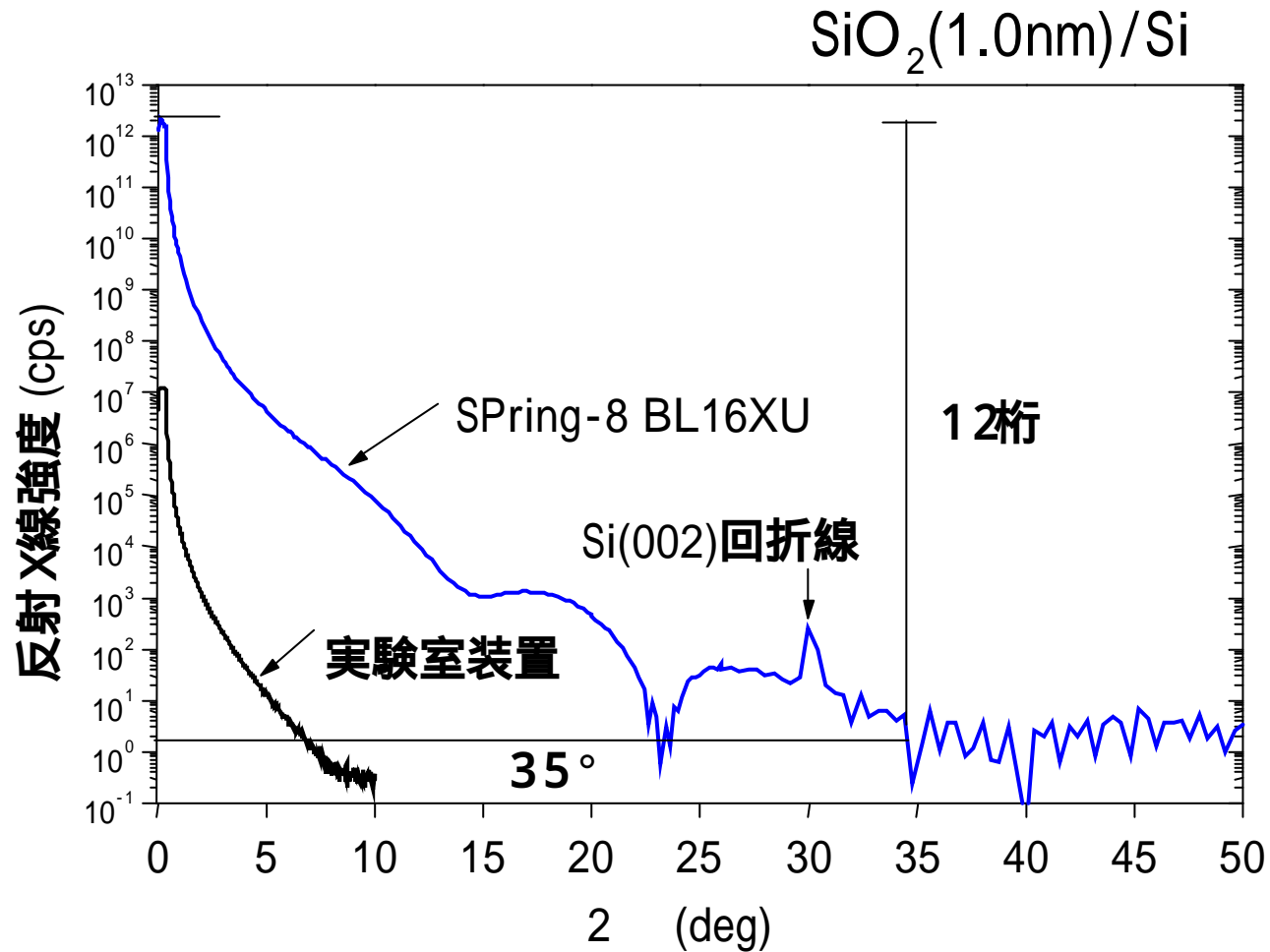
= 1 nm



5. アンジュレータビームライン 16XU



X線波長： (≈ 1.4)



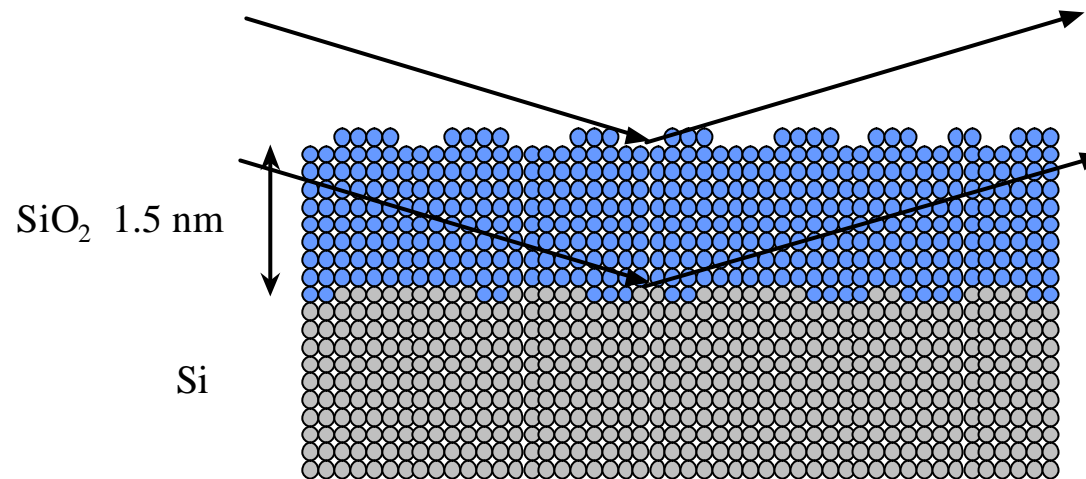
最小膜厚

$$d_{\min} = \frac{\lambda}{2} \sin^2 \theta_{\max}$$

= **0.3 nm**

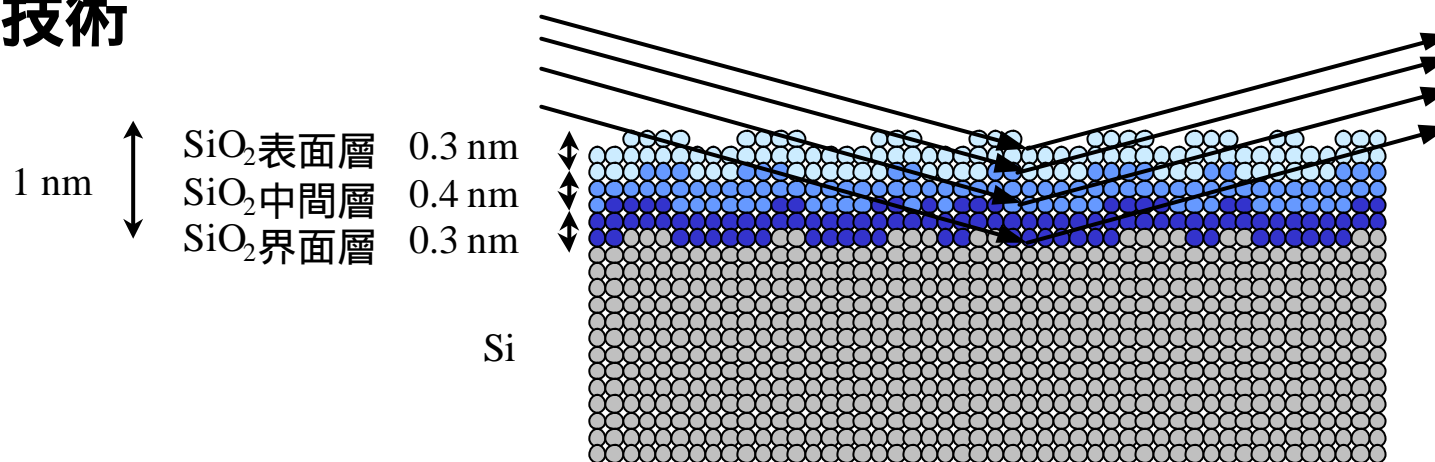
6.データ解析

従来



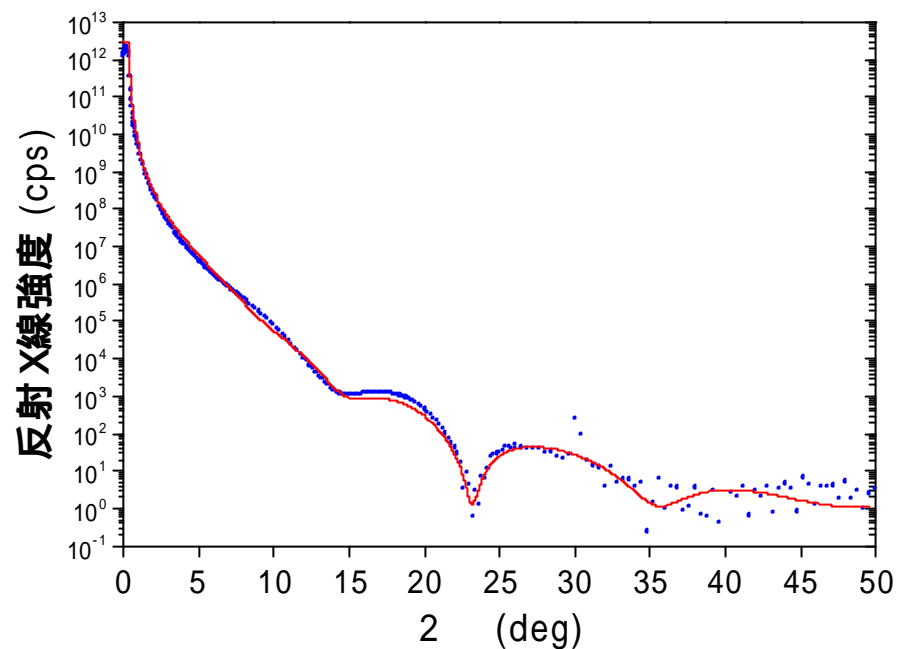
1.5 nm酸化膜を一層として評価

今回の技術

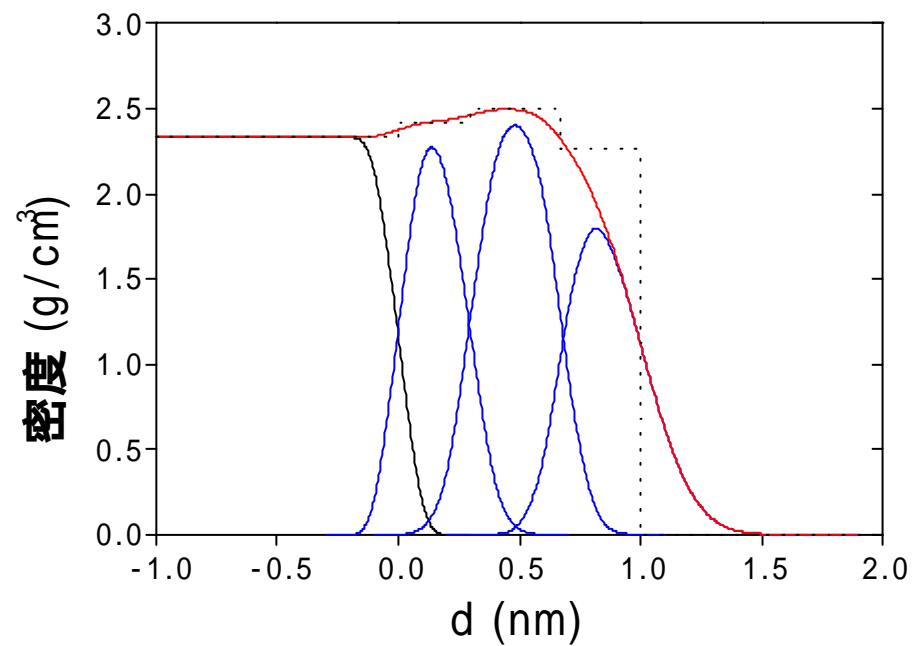


1 nm酸化膜を表面、中間、界面層に分離して評価

3層構造解析 (右図実線)



得られた密度および
凹凸のプロファイル。
界面プロファイルは
誤差関数 $\text{erf}(z/\sigma)$
で与えた。



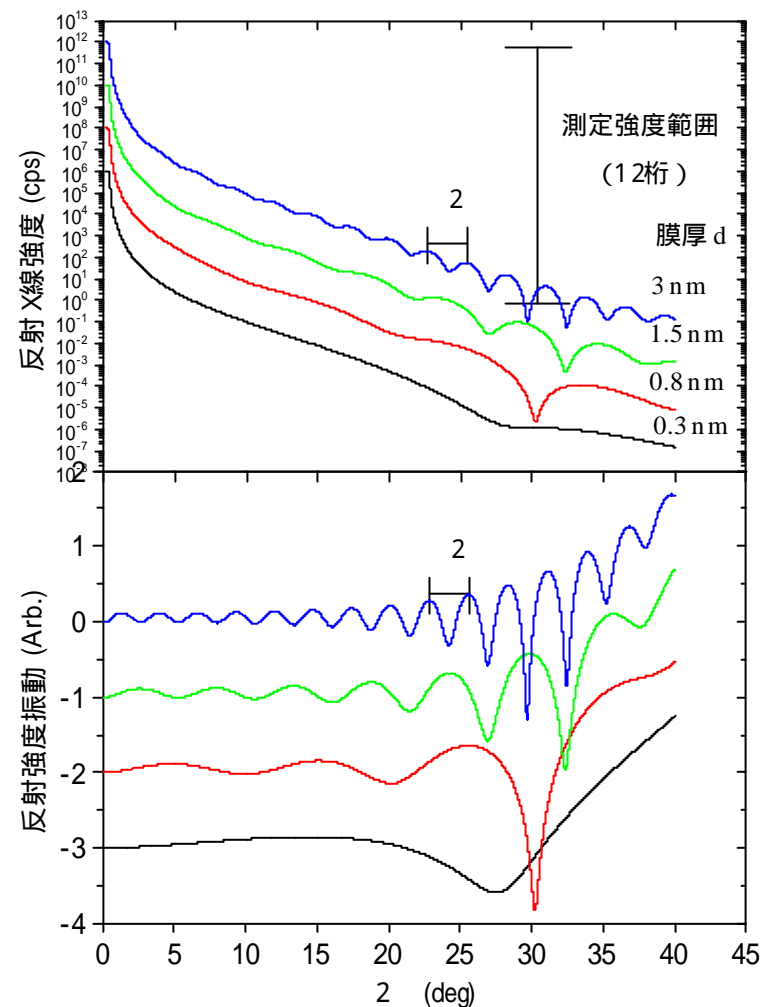
7.まとめ

アンジュレータ放射光利用で
ダイナミックレンジ12桁、測定
角度範囲 35° 以上が得られた。

$$2\theta = 35^\circ \quad q_z = 2.7 \text{ }^{-1}$$

$$2\theta = 50^\circ \quad q_z = 3.8 \text{ }^{-1}$$

この結果、最小膜厚は0.3nm
(SiO_2 一分子層に対応)まで評価
可能になり、今後のゲート酸化膜
でも対応可能になった。



シミュレーション
0.3nmでも評価可能