

# はじめに①

- 対象

- ULSIに代表されるSi半導体デバイス
- 抵抗・信頼性の点でAl配線に代わるCu配線

- 課題

- SM (Stress Migration) 耐性に優れるとされるCu配線だが、特定のビア (層間接続孔) においてSIV (Stress-induced voiding) による集中的な断線不良が生じる  
→ 配線信頼性における深刻な課題

## はじめに②

- 原因とメカニズム

- ULSIの微細配線には変形拘束による残留応力が存在する。
- 応力により誘起される原子輸送現象が亀裂を成長させる。
- 断線不良に至る。

- 対策

- 微細配線に存在する残留応力を詳細に評価する。
- 残留応力のメカニズムを明らかにし、適切な膜組成、成膜方法・条件を見出す。



- まずベタ膜において、薄膜中残留応力の深さ方向分布を評価する方法を検討する。

# 評価手法

- 非破壊での薄膜表面近傍の残留応力を測定 → X線回折法
- 薄膜試料が対象 → 斜入射 (低角入射)
  - 全反射条件以上、基板到達深さ以下の侵入深さを測定する。
  - 下層からの回折ピークを深さの指標とする。
- 深さ方向分布 →  $\omega$ - $\chi$  法 (入射角一定)
  - 通常の応力測定法 (並傾法、側傾法) では、傾斜角  $\psi$  変化時に侵入深さが変化する。
  - 試料回転角  $\omega$  および  $\chi$  を制御し、傾斜角  $\psi$  変化時にも入射角  $\alpha$  を一定に保持する条件で回折ピークを測定する。
- 平行ビーム、高感度、高精度測定 → 放射光利用

# $\omega$ - $\chi$ 法の概念

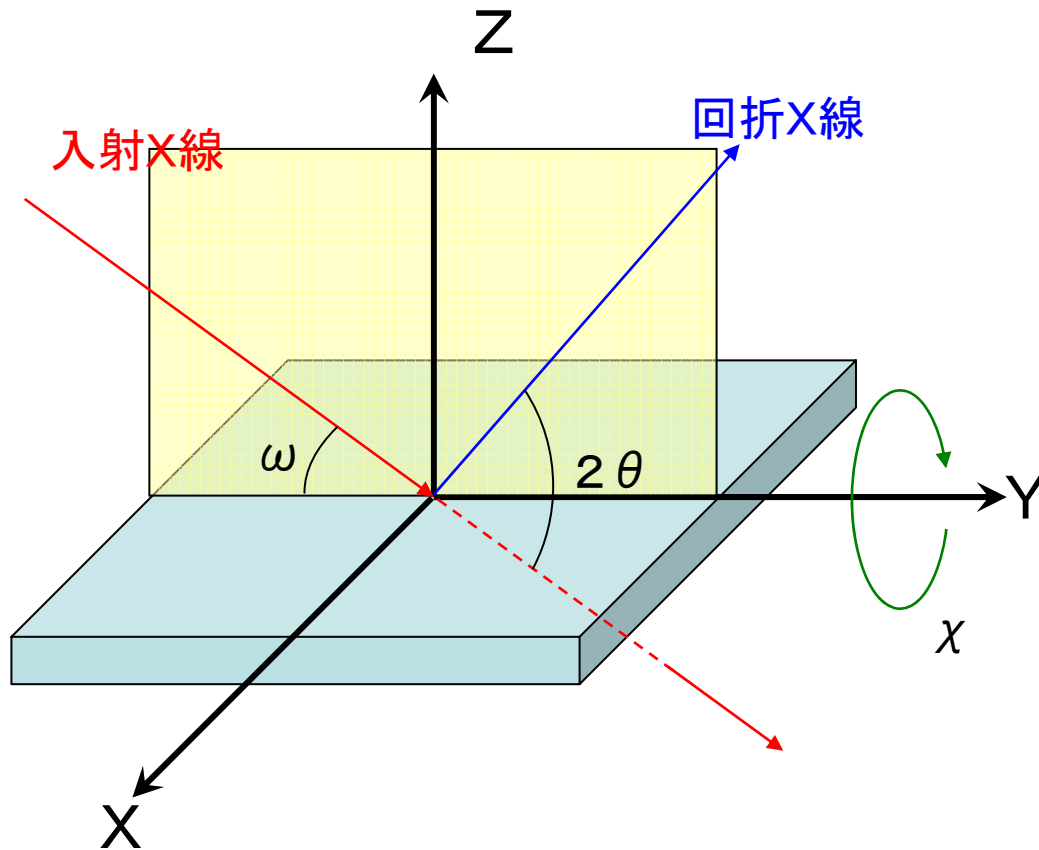


図1  $\omega$ - $\chi$  法の光学的配置 (概念図)

試料面法線と回折面のなす角  $\psi$

$$\cos \psi = \cos \chi * \cos(\theta - \omega)$$

従って、

$$\begin{aligned} \sin^2 \psi &= 1 - \cos^2 \psi \\ &= 1 - (\cos \chi * \cos(\theta - \omega))^2 \end{aligned}$$

侵入深さ  $Z$

$$Z = K_x \frac{\cos \chi \sin \omega}{\mu} \frac{\sin(2\theta - \omega)}{\sin \omega + \sin(2\theta - \omega)}$$

$$K_x = -\ln(1 - G_x)$$

$\mu$ : 線吸収係数

$G_x$ : 無限厚試料に対する厚み $x$ 時の回折強度比

$\cos \chi \sin \omega$ を一定にする $\chi, \omega$ を選べば  
 $\sin \alpha = \cos \chi \sin \omega$ で与えられ、  
 真の入射角 $\alpha$ 一定の応力測定が可能

# 測定方法

- 概略

- Cu薄膜中残留応力の深さ方向分布を評価
  - $\omega$ - $\chi$ 法を用いた斜入射X線回折法で測定する
- 成膜・アニール等処理条件や材質・組成が応力分布に与える影響を評価
  - 各種処理したCu薄膜、Cu合金薄膜を試料として用いる

- 測定試料

- 2インチ径ウェハー(短冊状に切り出し)
- Si基板／バリアメタル層(TaN、50nm)／配線膜層(Cu、200nm)
- TaN成膜法 DCマグネトロンスパッタ
- Cu成膜法 電解めっきorスパッタ
- 熱処理条件
  - 熱処理なし(as depo)
  - 真空熱処理(600°C × 15分)

# 実験配置 (SPring-8 BL16XU)

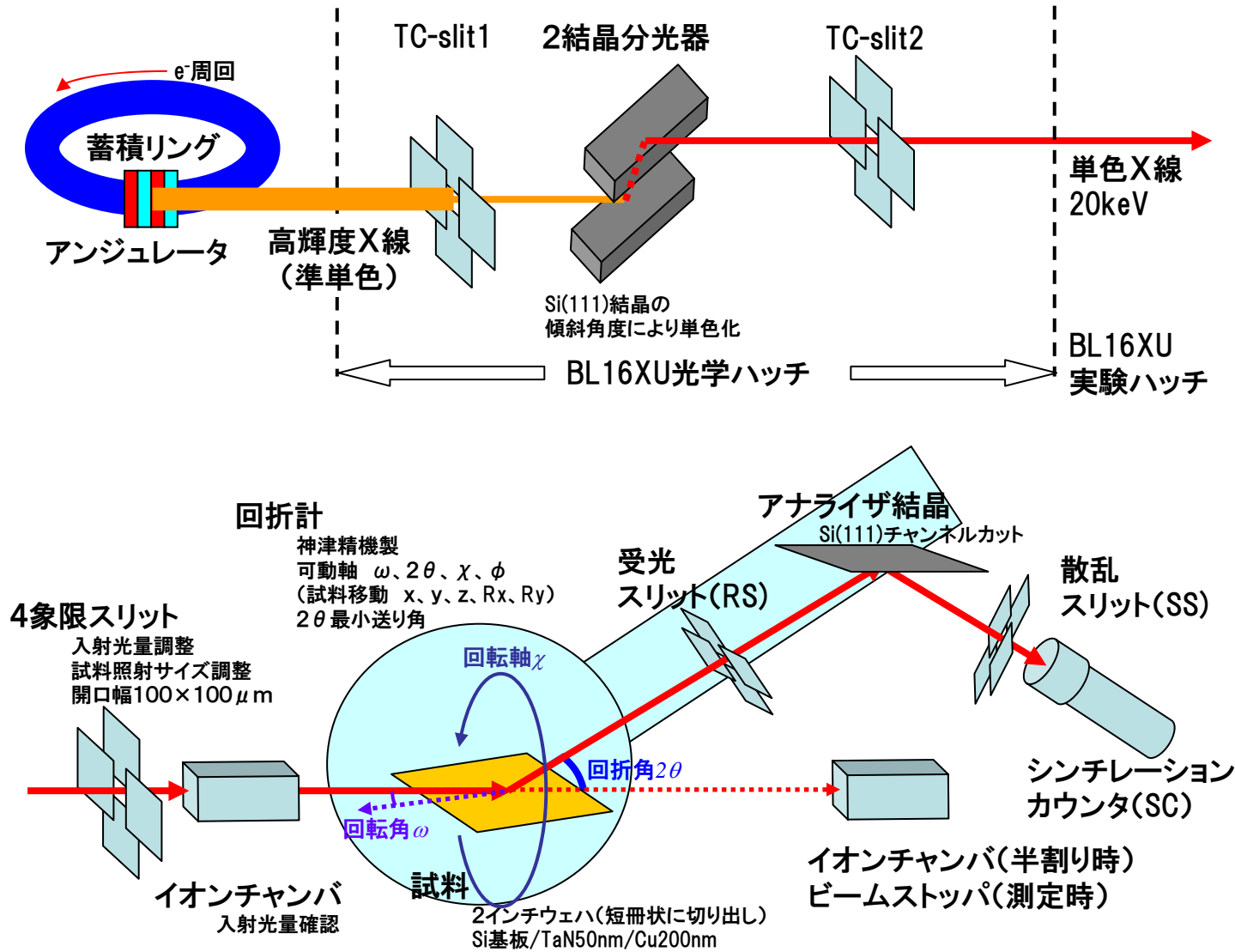


図2 残留応力測定時の機器配置(概略)



写真1 BL16実験ホール(下流側から撮影)

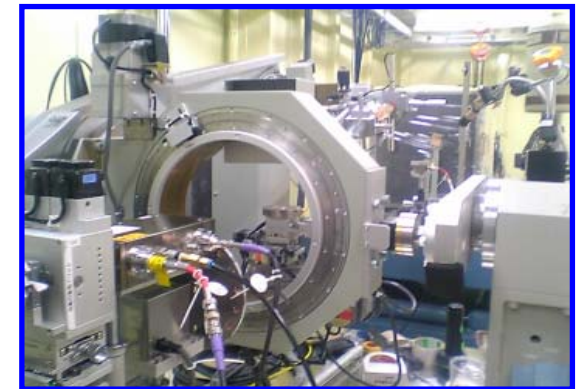


写真2 BL16XU回折計(上流側から撮影)

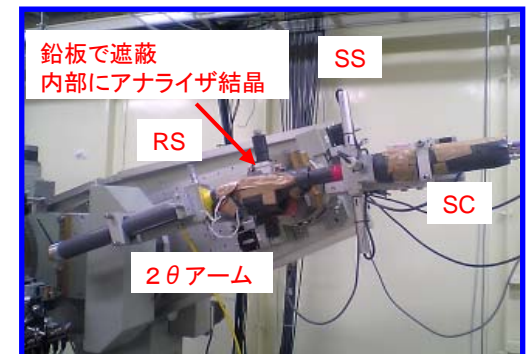


写真3 測定時の様子(2θアーム周辺)

# 実際の測定条件

- 測定ピーク
  - Cu2本:111、220←異方性考慮
  - TaN1本:111←深さ確認用

- 角度設定
  - 入射角  $\alpha$  は任意の6点に設定
    - $\alpha = 0.18, 0.22, 0.26, 0.50, 1.00, 3.00^\circ$
  - 傾斜角  $\psi$  は任意の9点\*1に設定
    - $\sin^2 \psi = 0.00, 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30, 0.40, 0.50$
  - $\alpha$  と  $\psi$  の組み合わせに対して、条件を満たす試料回転角  $\omega$  および  $\chi$  を算出する。

表1 測定条件の一例

$\alpha$	$\sin^2 \psi$	$\omega$	$\chi$	2 $\theta$ 始点	2 $\theta$ 終点	角度送り	積算時間	回折面	filename
0.18	0.00	0.18000	0.0000	12.50	15.00	0.0100	1.0	TaN(111)	M20001a018-0.dat
0.18	0.00	0.18000	0.0000	16.90	17.35	0.0025	2.0	Cu(111)	M20001a018-1.dat
0.18	0.00	0.18000	0.0000	27.95	28.30	0.0025	2.0	Cu(220)	M20001a018-2.dat
0.18	0.05	0.18271	9.8769	16.90	17.35	0.0025	2.0	Cu(111)	M20001a018-3.dat
0.18	0.05	0.18271	9.8769	27.95	28.30	0.0025	2.0	Cu(220)	M20001a018-4.dat
0.18	0.10	0.18771	16.4858	16.90	17.35	0.0025	2.0	Cu(111)	M20001a018-5.dat
0.18	0.10	0.18771	16.4858	27.95	28.30	0.0025	2.0	Cu(220)	M20001a018-6.dat
0.18	0.15	0.19316	21.2733	16.90	17.35	0.0025	2.0	Cu(111)	M20001a018-7.dat
0.18	0.15	0.19316	21.2733	27.95	28.30	0.0025	2.0	Cu(220)	M20001a018-8.dat
0.18	0.20	0.19911	25.3079	16.90	17.35	0.0025	2.0	Cu(111)	M20001a018-9.dat
0.18	0.20	0.19911	25.3079	27.95	28.30	0.0025	2.0	Cu(220)	M20001a018-10.dat
0.18	0.25	0.20564	28.9192	16.90	17.35	0.0025	2.0	Cu(111)	M20001a018-11.dat
0.18	0.25	0.20564	28.9192	27.95	28.30	0.0025	2.0	Cu(220)	M20001a018-12.dat
0.18	0.30	0.21287	32.2630	16.90	17.35	0.0025	2.0	Cu(111)	M20001a018-13.dat
0.18	0.30	0.21287	32.2630	27.95	28.30	0.0025	2.0	Cu(220)	M20001a018-14.dat
0.18	0.40	0.22993	38.4781	16.90	17.35	0.0025	2.0	Cu(111)	M20001a018-15.dat
0.18	0.40	0.22993	38.4781	27.95	28.30	0.0025	2.0	Cu(220)	M20001a018-16.dat
0.18	0.50	0.25189	44.3898	16.90	17.35	0.0025	2.0	Cu(111)	M20001a018-17.dat
0.18	0.50	0.25189	44.3898	27.95	28.30	0.0025	2.0	Cu(220)	M20001a018-18.dat
0.22									
0.26									
0.50									
1.00									
3.00									

\* 1 材料学会の残留応力測定標準(鉄鋼編)では、 $\sin^2 \psi$  は0.0~0.6°の範囲で5点以上測定することが推奨されている。

# 測定データ① (Cuピーク)

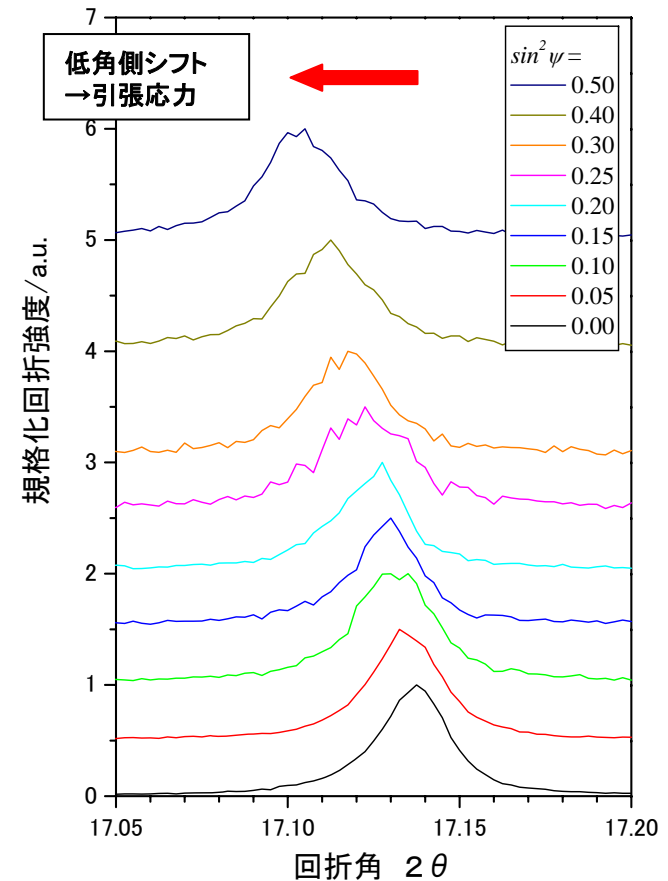
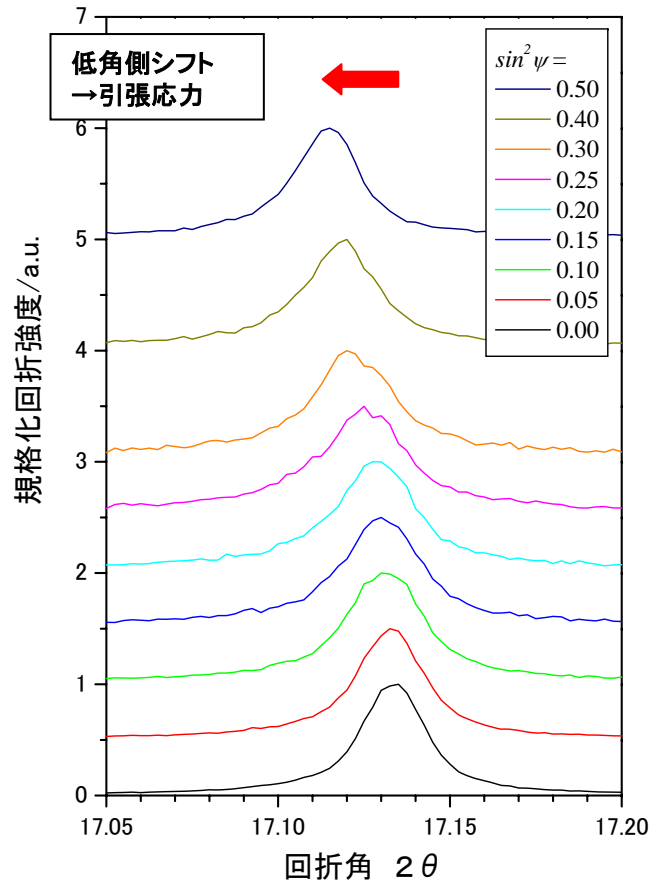


図3.1 Cu薄膜試料(めっき、as depo)における $\psi$ 変化によるCu(111)回折ピークのシフト(入射角 $\alpha = 0.22^\circ$ 一定)

図3.2 Cu薄膜試料(めっき、真空熱処理)における $\psi$ 変化によるCu(111)回折ピークのシフト(入射角 $\alpha = 0.22^\circ$ 一定)

**$\sin^2 \psi$ 変化に伴う低角(面間隔拡大)方向へのピークシフトが確認された  
→ 引張応力の存在**



# 測定データ② (TaNピーク)

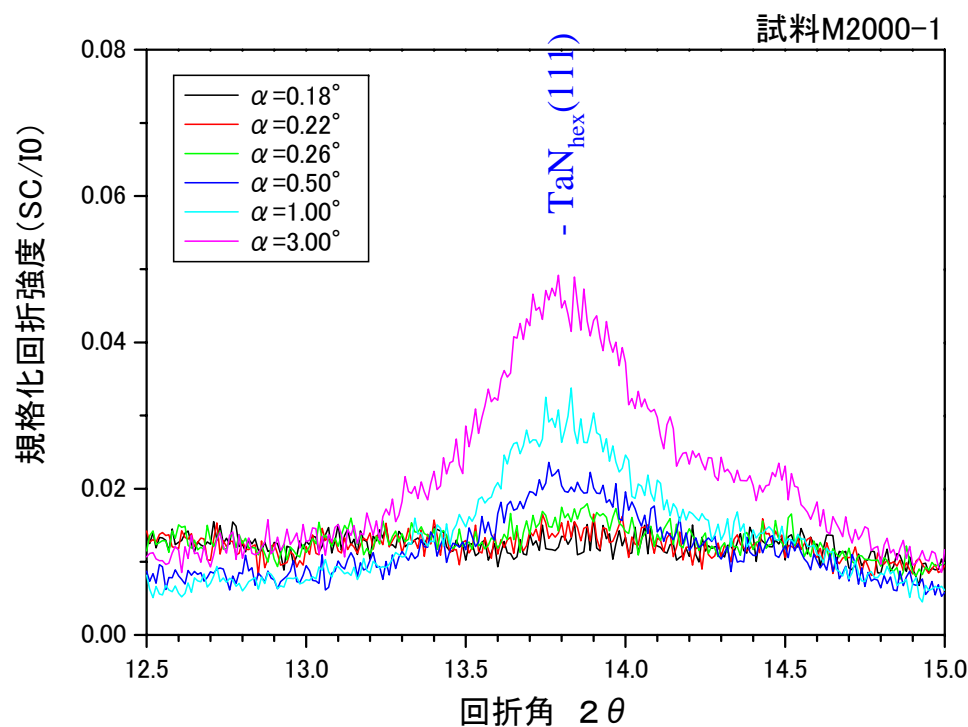


図4.1 Cu薄膜試料(めっき、as depo)における入射角  $\alpha$  に対するTaN(111)回折ピークの変化

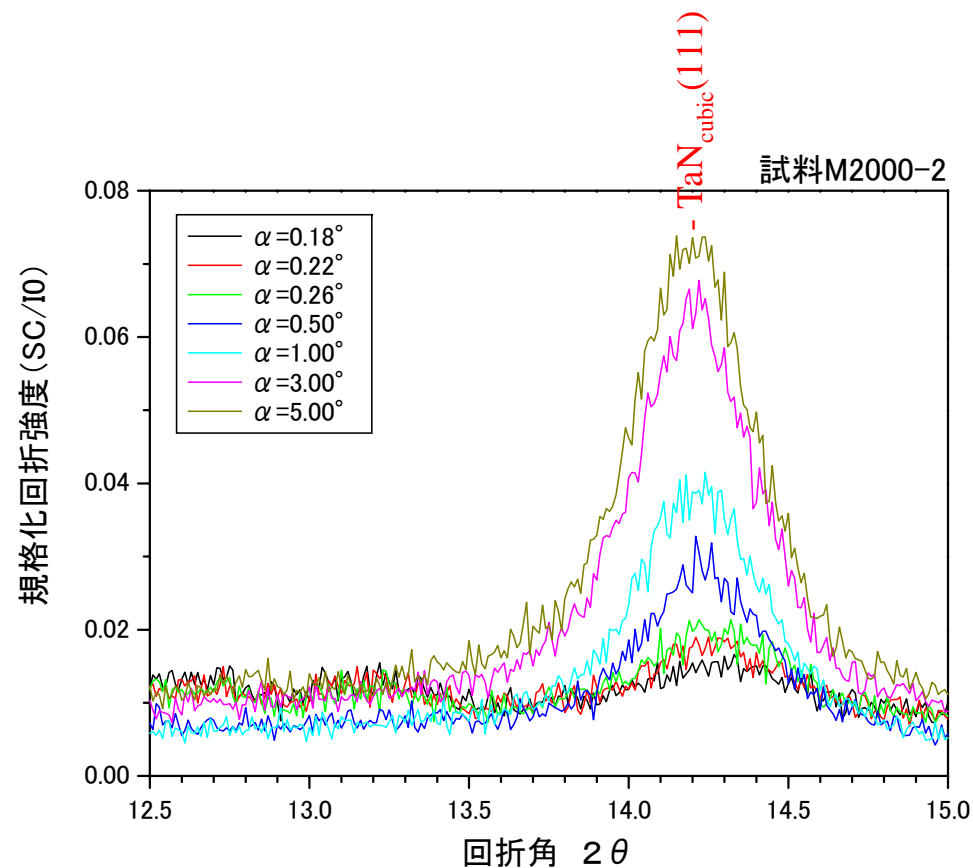


図4.2 Cu薄膜試料(めっき、真空熱処理)における入射角  $\alpha$  に対するTaN(111)回折ピークの変化

深さ情報を追跡できている  
熱処理によるTaN変質が確認された

# 処理データ ( $2\theta$ - $\sin^2\psi$ 線図)

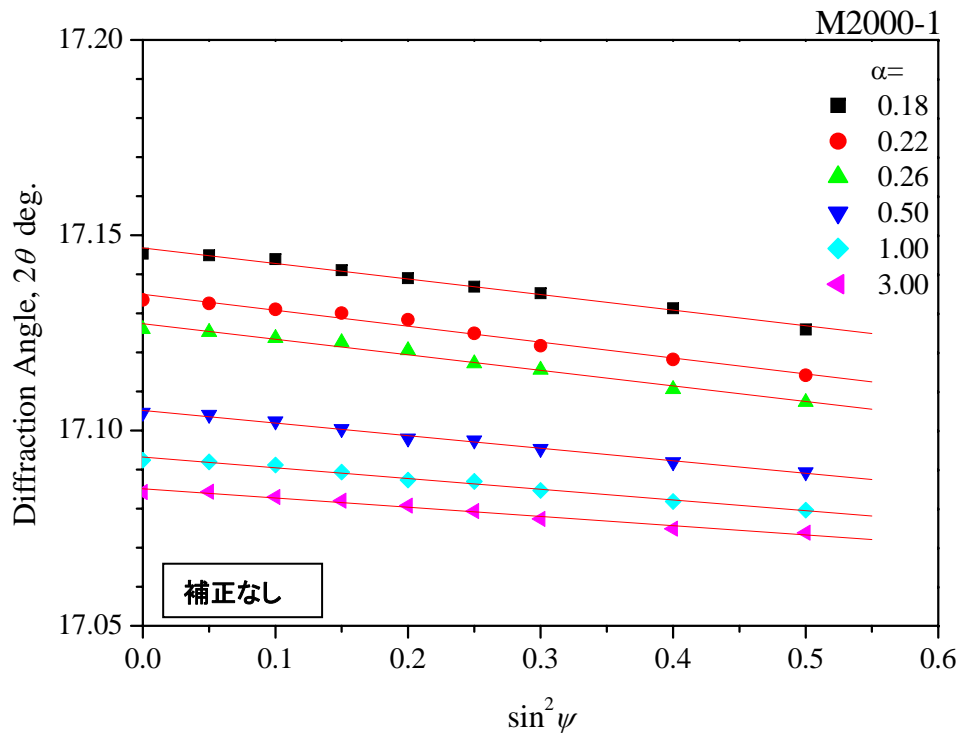


図5.1 Cu薄膜試料(めっき、as depo)における  $2\theta$ - $\sin^2\psi$ 線図

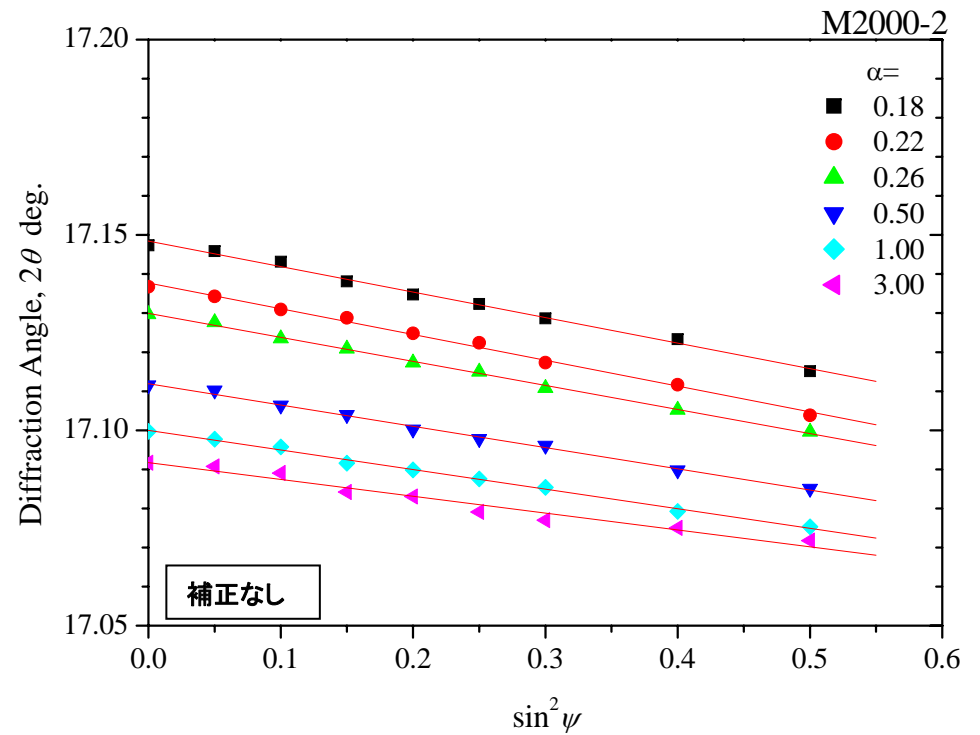


図5.2 Cu薄膜試料(めっき、真空熱処理)における  $2\theta$ - $\sin^2\psi$ 線図

線図プロットの直線性が確認できた  
試料により傾きが異なる = 応力値が異なる

# 残留応力値と深さの算出

- 残留応力値  $\sigma$  の計算

- 線図の傾き  $M$

- ピークフィッティングを行い回折ピークの位置決めを行う。
- $2\theta - \sin^2\psi$  線図を作成し、直線近似で傾きを求める。

- 定数項

- ヤング率\*  $E = 129800\text{MPa}$
- ポアソン比\*  $\nu = 0.343$
- 無歪回折角\*\*  $2\theta_0 = 17.371\text{deg.}$

$$\sigma = \frac{-E}{2(1+\nu)} \cot \frac{2\theta_0}{2} \frac{\pi}{180} M$$

- 深さの算出

- TaNピークが出現した時点で侵入深さがCu膜厚と同等になったものと定義する。
- 侵入深さの計算式より  $K_x/\mu$  を算出する。
- 求められた  $K_x/\mu$  を用いて、他の測定条件における侵入深さを算出する。

$$Z = K_x \frac{\cos \chi \sin \omega}{\mu} \frac{\sin(2\theta - \omega)}{\sin \omega + \sin(2\theta - \omega)}$$

# 残留応力の深さ方向分布

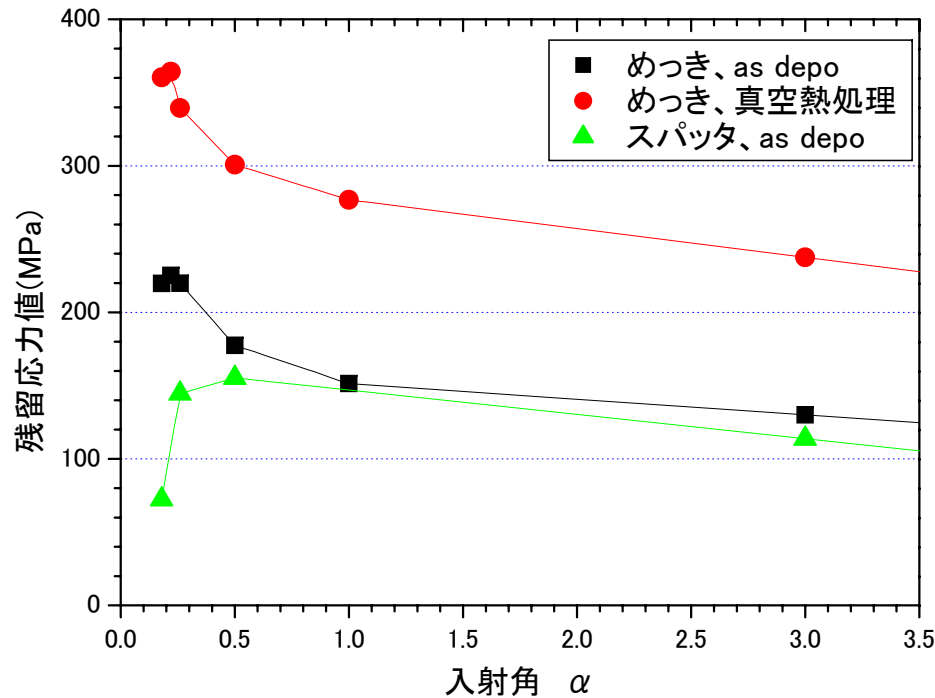


図6.1 入射角に応じた各種Cu薄膜試料における残留応力の変化

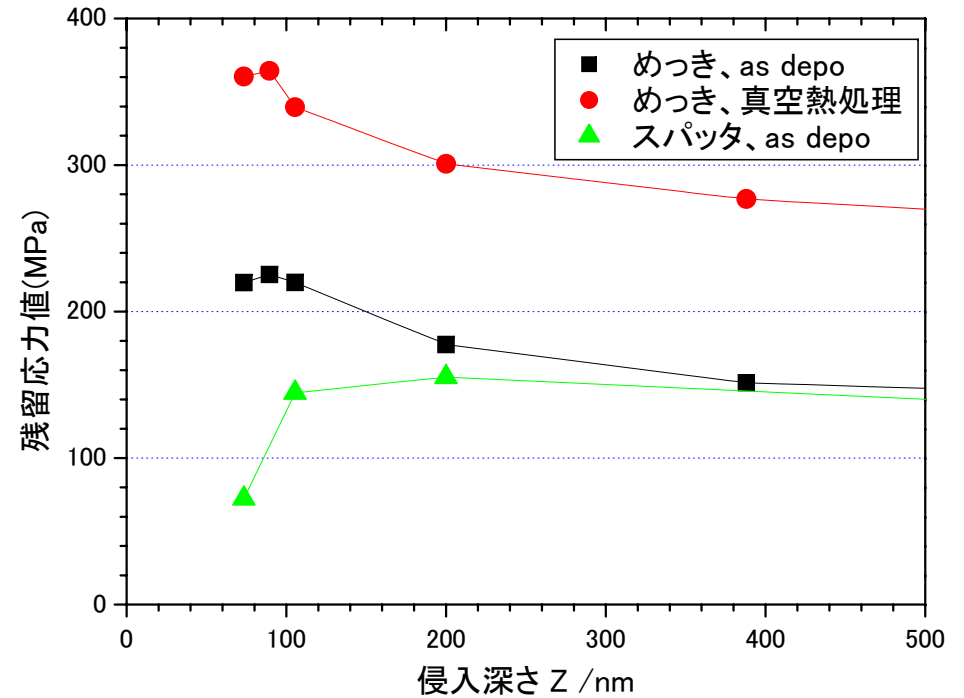


図6.2 各種Cu薄膜試料における残留応力の深さ方向分布

成膜方法により膜中応力分布が異なる  
真空熱処理により膜中応力値が変化する

# まとめ

薄膜中残留応力の深さ方向分布を測定できた  
成膜方法・処理により分布が異なることが確認できた



合金薄膜や処理条件の影響評価が可能

## ● 課題、問題点

- 応力値の精度検証・向上
  - 測定誤差の検証
  - 幾何学的な補正計算
  - 定数項の検討
  - 面方位の検討
  - 実験室型装置データとの関連付け

## ● 今後の予定

- 膜組成が応力に与える影響評価
  - 薄膜の組成を変えた試料の測定 (CuN薄膜等)
- 処理条件が応力に与える影響評価
  - 処理条件を変えた試料の測定 (真空熱処理と高圧アニールの差異評価)