

ナノメートル計測学 システム創成学科BISコース

2005年6月13日
東京大学工学系研究科精密機械工学専攻
高増潔

産業技術総合研究所における 測長AFMを用いたナノメートル標準の確立

東京大学大学院工学系研究科
高増潔, 高橋哲
三隅伊知子 (産総研)

HP: <http://www.nano.pe.u-tokyo.ac.jp/>

ナノメートル計測用標準試料と計測装置

線幅及び段差、一次元グレーティング、超格子、二次元グレーティング

	面内方向		線幅	段差	薄膜	超格子
	一次元グレーティング	二次元グレーティング				
原子間力顕微鏡				#1	#1	
CD-SEM				-	-	
光散乱計			#2	-	-	
光回折計				-	-	
顕微干涉計	-	-			#1	
触針式粗さ計	-	-			#1	
X線反射率計	-	-			-	
エリブソメータ	-	-			-	

校正可能: #1: 何らかの加工方法で段差形状が形成できれば校正可能
#2: 孤立ラインでなく周期的なラインであれば校正可能; -: 校正不可

2005/6/13 ナノメートル計測工学2005年 3

ナノメートル計測におけるトレーサビリティ

長さの国家標準 (よう素安定化He-Neレーザ)
レーザー周波数校正
長さ標準にトレーサブルなナノメートル計測装置
ナノメートル標準試料を用いた校正
市販のナノメートル計測装置 (SEM, AFM, 光学顕微鏡)

例: 一次元グレーティング

例: 測長AFM

2005/6/13 ナノメートル計測工学2005年 4

ナノメートル標準の確立の定義

長さ標準にトレーサブルなナノメートル計測装置の開発
トレーサビリティの確保
不確かさの評価

これだけでは不十分

1. 国家標準にトレーサブルな校正システムの構築及びその不確かさ評価
2. 校正システムを用いた精密測定, 比較測定
3. 校正システムに文書管理の伴う品質システムの構築

2005/6/13 ナノメートル計測工学2005年 5

レーザー干渉計を搭載した測長AFM

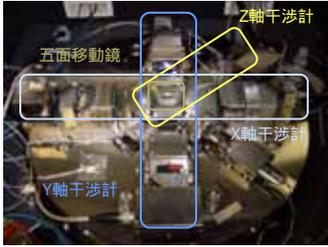
- XYZ軸レーザー干渉計搭載型のAFM. 干渉計信号を用いてサーボコントロール. 実時間校正が可能に.
 - 光源: 周波数安定化He-Ne レーザ(波長633 nm)
 - ステージユニット
 - XY: ピエゾ駆動板ばね式
 - Z: ピエゾチューブスキャナ
 - 測定範囲: 17.5(X) × 17.5(Y) × 2.5(Z) μm
 - 干渉計分解能: 0.04 nm= $\lambda/16$ (光学的) × 1/2048

測長AFM装置 (プローブユニットを取り外した状態)

2005/6/13 ナノメートル計測工学2005年 6

差動式レーザ干渉計を搭載した差動式測長AFM

- レーザ干渉計
 - 五面移動鏡
 - XY軸:2パスの差動式ホモダイン干渉計
 - Z軸:4パスのホモダイン干渉計
 - 分解能:0.04 nm
 - デッドパス0
 - 周波数安定化He-Neレーザ
- ステージ
 - XY軸:ピエゾ駆動板ばね式ステージ
 - Z軸:ピエゾチューブスキャナ
 - 走査範囲:100 μm(X)x100 μm(Y)x12 μm(Z)



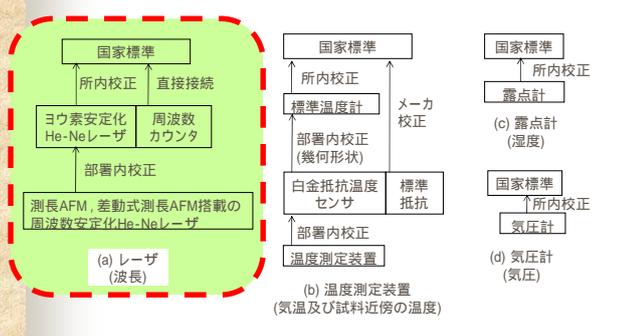
2005/6/13 ナノメートル計測工学2005年 7

測長AFMと差動式測長AFMの比較

	測長AFM	差動式測長AFM
走査範囲 (μm)	17.5 x 17.5 x 2.5	100 x 100 x 12
干渉計のデッドパス	Yes	No
XY軸干渉計の配置	非対称形	対称形
ベースの材料	金属 (アルミニウム)	低熱膨張材 (スーパーインバー)
測定モード	コンタクト	AC, コンタクト

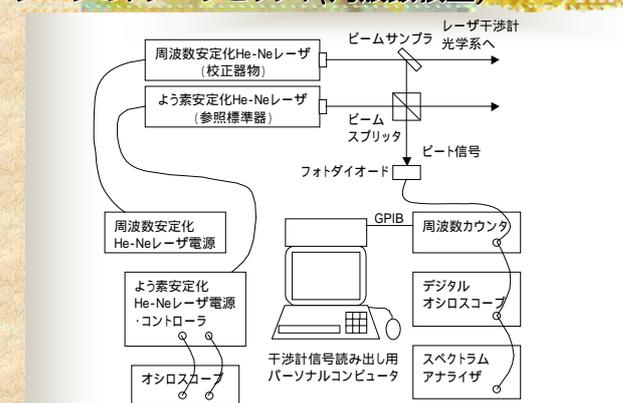
2005/6/13 ナノメートル計測工学2005年 8

トレーサビリティを確保する方法



2005/6/13 ナノメートル計測工学2005年 9

レーザのトレーサビリティ(周波数校正)



2005/6/13 ナノメートル計測工学2005年 10

レーザのトレーサビリティ(不確かさ)

不確かさ要因	各要因の不確かさ	タイプ	分布	感度係数	標準不確かさ
参照標準器ヨウ素安定化He-Neレーザ周波数, u_1	11.7 kHz	A		1	1.35×10^{-2} MHz
周波数安定化He-Neレーザの周波数測定, u_2	124 kHz	A		1	1.24×10^{-1} MHz
周波数カウンタ, u_3	1.1×10^{-2} Hz	B	R	0.58	6.3×10^{-9} MHz
合成標準不確かさ					1.25×10^{-1} MHz
拡張不確かさ, $U (k=2)$					2.49×10^{-1} MHz

測長AFM及び差動式測長AFMに搭載のレーザ干渉計の光源が長さの標準であるヨウ素安定化He-Neレーザへのトレーサビリティを確保する(校正周期, 校正の手間)

オフセットロックレーザ装置により, 常にヨウ素安定化He-Neレーザにトレーサブルにすることを計画中

2005/6/13 ナノメートル計測工学2005年 11

AFMシステムの不確かさ要因

- レーザ干渉計に由来する不確かさ
 - レーザ周波数の短期的な不安定性
 - レーザ周波数の長期的な不安定性
 - 干渉計のデッドパスの温度変化成分
 - 干渉計のデッドパスの熱膨張係数
 - 干渉計の分解能
 - 光学系のアライメントによるコサイン誤差
 - アップ誤差
 - ステージ走査時のステージ回転による光路長変化
 - 干渉計の非線形性(周期誤差)
- 大気の屈折率補正に由来する不確かさ
 - 気温変動成分
 - 気圧変動成分
 - 湿度変動成分
 - 炭酸ガス変動成分

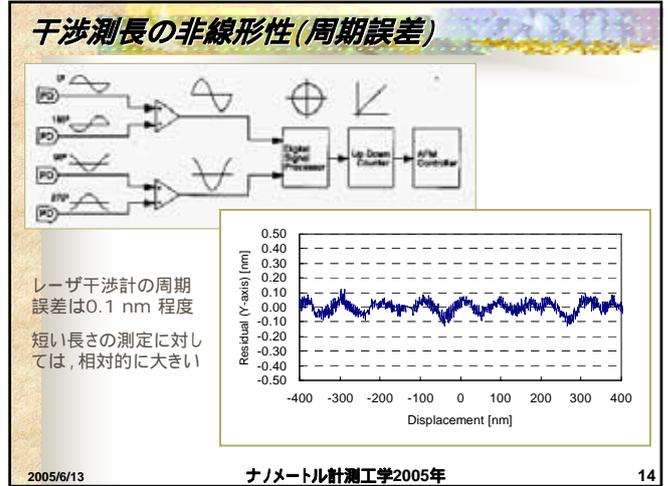
2005/6/13 ナノメートル計測工学2005年 12

測長AFMシステムの不確かさ評価結果

不確かさ要因	標準不確かさ (nm)	
	測長AFM	差動式測長AFM
(1)レーザ周波数の短期的な不安定性	5.86×10^{-3}	nearly 0
(2)レーザ周波数の長期的な不安定性	$4.56 \times 10^{-8} \times l$	nearly 0
(3)干渉計のデッドパス変化 温度変化成分	5.66×10^{-7}	nearly 0
(4)干渉計のデッドパス変化 熱膨張係数成分	5.66×10^{-7}	nearly 0
(5)干渉計の分解能	2.23×10^{-2}	2.23×10^{-2}
(6)光学系のアライメントによるコサイン誤差	$7.06 \times 10^{-6} \times l$	$2.44 \times 10^{-6} \times l$
(7)アッペ誤差	$4.52 \times 10^{-5} \times l$	$8.40 \times 10^{-6} \times l$
(8)ステージ回転による光路長変化	$8.56 \times 10^{-6} \times l + 2.70 \times 10^{-12} \times l^2$	$4.67 \times 10^{-6} \times l + 1.60 \times 10^{-12} \times l^2$
(9)干渉測長の非線形性(周期誤差)	1.15×10^{-1}	9.47×10^{-2}
(1)大気の屈折率補正 気温変化成分	$6.55 \times 10^{-7} \times l$	$6.55 \times 10^{-7} \times l$
(2)大気の屈折率補正 湿度変化成分	$1.93 \times 10^{-8} \times l$	$1.93 \times 10^{-8} \times l$
(3)大気の屈折率補正 気圧変化成分	$2.31 \times 10^{-6} \times l$	$2.31 \times 10^{-6} \times l$
(4)大気の屈折率補正 炭酸ガス濃度変化成分	$4.10 \times 10^{-9} \times l$	$4.10 \times 10^{-9} \times l$

l : ピッチや線幅などの測定値

$l = 10 \mu\text{m}$ のとき標準不確かさが 0.001 nm 以下で全体の不確かさへの寄与が小さいもの



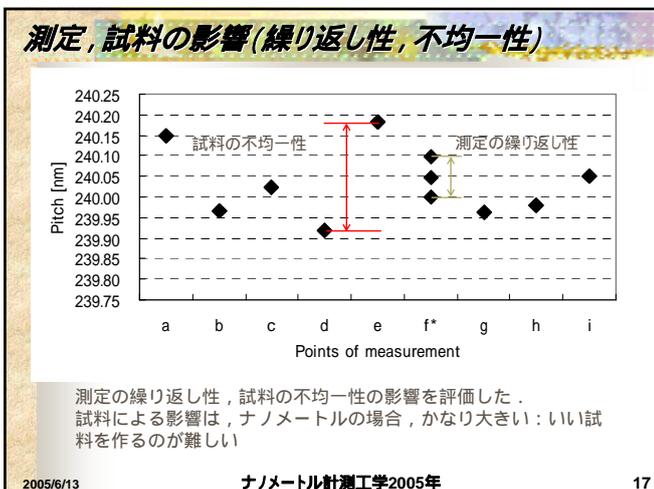
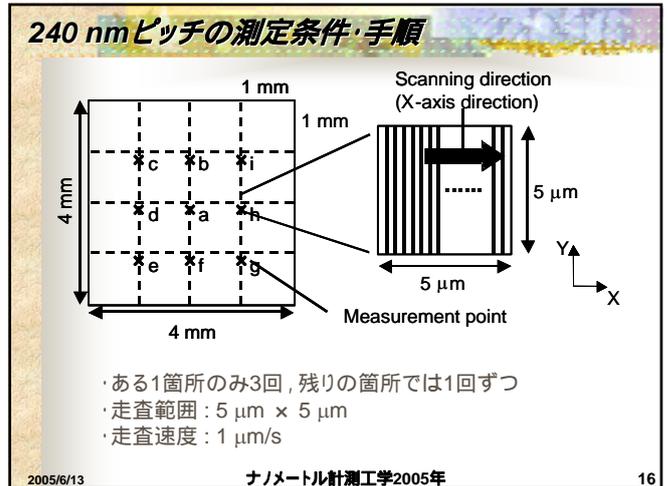
一次元グレーティング(240 nmピッチ)

測長AFM用試料台
一次元グレーティング試料
光回折法, 測長SEM用試料台

SEM像
中山義則: 解説“電子ビームによる半導体パターン計測”, 精密工学会誌, vol.68, p342, 2002より

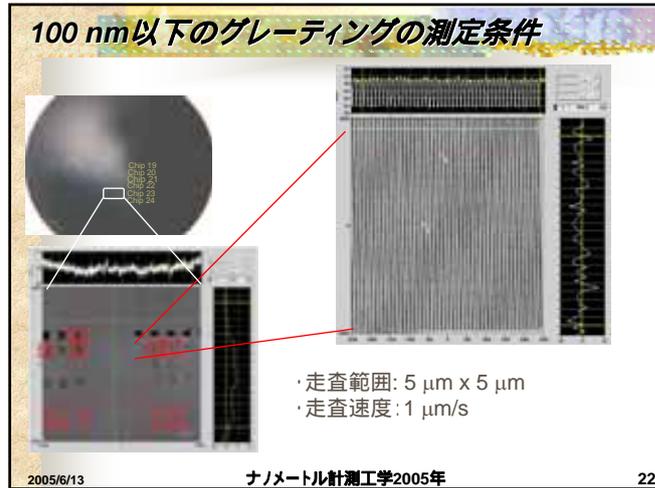
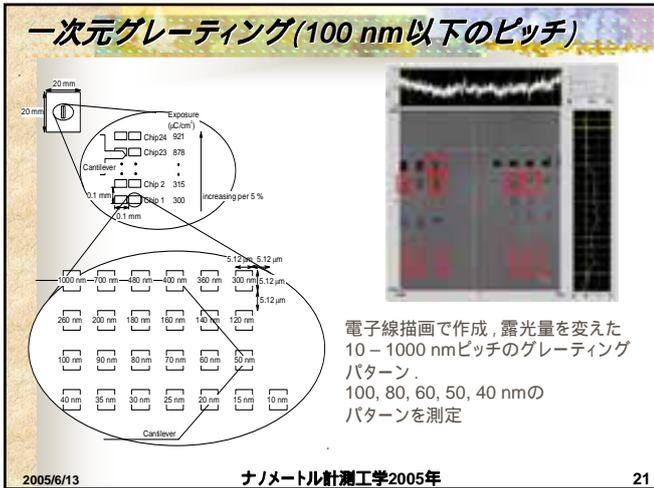
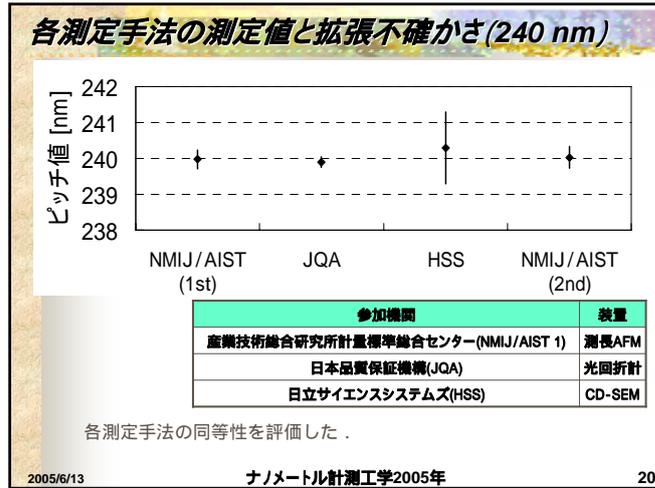
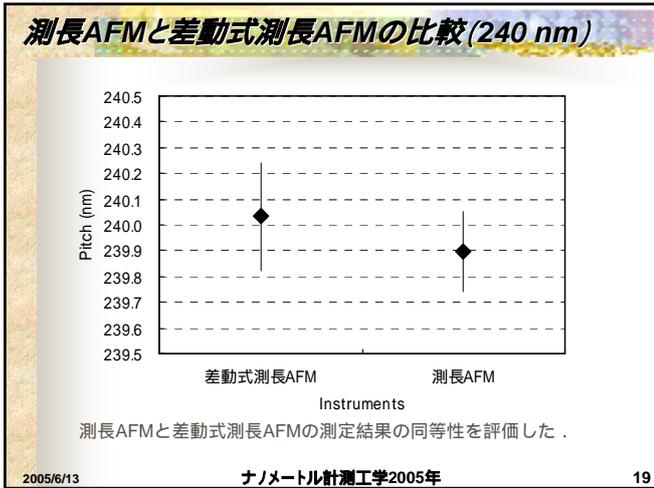
測定試料及び試料台

レーザ干渉露光法と異方性湿式エッチングにより作成したSi(110)基板の一次元グレーティング(240 nmピッチ, 標準マイクロスケールHS-1000)



測定, 試料による不確かさ要因

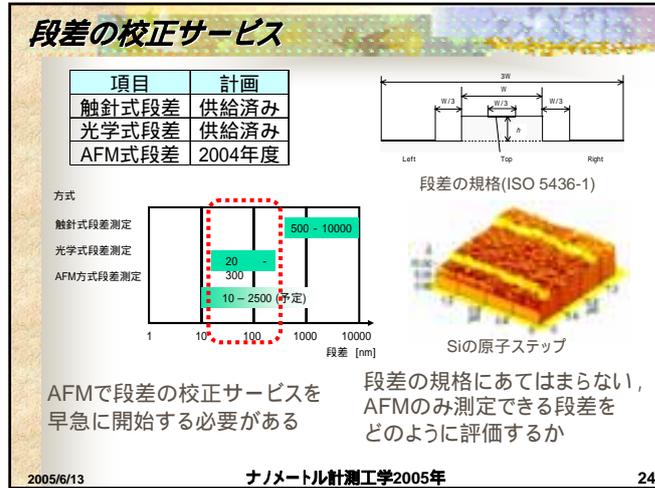
不確かさ要因	標準不確かさ (nm)		
	測長AFM	差動式測長AFM	
	240 nmピッチ	50 nmピッチ	
測定の繰り返し性	4.88×10^{-2}	6.23×10^{-2}	
試料の不均一性	8.71×10^{-2}	1.73×10^{-1}	2.30×10^{-2}
試料の傾き	1.16×10^{-3}	5.53×10^{-3}	1.30×10^{-5}
試料の面内回転	1.14×10^{-3}	1.73×10^{-2}	2.01×10^{-3}
試料の温度変化による熱膨張	1.15×10^{-3}	1.15×10^{-3}	2.40×10^{-4}
試料の熱膨張係数	1.15×10^{-3}	1.15×10^{-3}	2.40×10^{-4}



50 nmピッチ測定の不確かさ評価

Source of uncertainty	Standard uncertainty (nm)
Frequency variation of laser	nearly 0
Frequency stability of laser	nearly 0
Change of dead path (temperature)	nearly 0
Change of dead path (thermal expansion)	nearly 0
Interferometer resolution	2.23E-02
Cosine error in optical alignment	1.22E-06
Abbe error	4.20E-04
Change in optical path	2.35E-04
Interferometer nonlinearity	9.47E-02
Refractive index of air (temperature)	3.28E-05
Refractive index of air (humidity)	9.65E-07
Refractive index of air (pressure)	1.15E-04
Refractive index of air (CO2)	2.05E-07
Difference of sample temperature	2.40E-04
Thermal expansion	2.40E-04
Nonuniformity	2.30E-02
Cosine error (vertical inclination)	1.30E-05
Cosine error (lateral inclination)	2.01E-03
Combined standard uncertainty	1.00E-01
Expanded uncertainty	2.00E-01

2005/6/13 ナノメートル計測工学2005年 23



20 nm - 300 nm の段差の測定範囲

シュツットガルト大学が作成
Si基板上にSiO₂のラインが形成,
100 nmのCr膜で保護

断面図

2005/6/13 ナノメートル計測工学2005年 25

段差測定的主要な不確かさ要因

20 nm	70 nm	300 nm
試料の均一性 0.206 nm	試料の均一性 1.327 nm	試料の均一性 0.488 nm
干渉計の周期誤差 0.114 nm	測定の繰返し性 0.145 nm	コサイン誤差 (X軸回り)0.329 nm
レーザ周波数安定性 0.052 nm	干渉計の周期誤差 0.114 nm	コサイン誤差 (Y軸回り)0.198 nm
測定の繰返し性 0.037 nm	レーザ周波数安定性 0.052 nm	干渉計の周期誤差 0.114 nm
コサイン誤差 (X軸回り)0.017 nm	コサイン誤差 (X軸回り)0.045 nm	測定の繰返し性 0.108 nm
測定値 20.75 nm	67.06 nm	291.09 nm
拡張不確かさ 0.49 nm	2.68 nm	1.28 nm

2005/6/13 ナノメートル計測工学2005年 26

10 nm 以下の段差測定試料

断面模式図

測長AFM像 (走査範囲5 μm x 5 μm)

Siの熱酸化膜をバッファードフッ酸で精密にエッチング.
所望の膜厚に調整.(10, 7, 5, 3 nm)
試料サイズ: 15 mm x 15 mm

測定値 nm	拡張不確かさ
10.46	0.27
7.72	0.28
5.47	0.35
3.63	0.28

2005/6/13 ナノメートル計測工学2005年 27

認定証(一次元グレーティング)

0.2 μm - 8 μm: $2\sqrt{(1.6 \times 10^{-1})^2 + (9.9 \times 10^{-6} L)^2}$

2005/6/13 ナノメートル計測工学2005年 28

標準供給体制の拡充

- 依頼試験, 校正サービスと認定事業者 (ISO 17025)
- 次のステップとして: 標準物質の供給
 - ISO Guide34に基づく体制が必要(経年変化...)

計量標準総合センター

産業技術総合研究所

依頼試験

校正サービス

認定事業者

校正サービス

顧客

認定標準物質頒布

ISO Guide34

2005/6/13 ナノメートル計測工学2005年 29

測長AFMによるナノメートル標準の確立

- 産総研計測標準で, 測長AFM及び差動式測長AFMを用いたナノメートル計測用標準試料校正システムを開発した
 - 不確かさが評価され, 短い長さに対して, 0.2 nm 程度の不確かさで測定できるシステム, トレーサビリティが確保されている
- 一次元グレーティング
 - 240 nmピッチは, 拡張不確かさが0.4 nm以下, 100 nm 以下は, 0.2 nm 以下で値付けができた.
 - 種々の比較測定において, 同等性が保障されている.
 - 依頼試験, 校正サービスが開始された.
- AFM段差
 - 段差測定が行え, 不確かさの評価ができた.
 - 10 nm ~ 2500 nm の段差の依頼試験, 校正サービスが行えるように準備している.
- 測長AFM及び差動式測長AFMは, ナノメートル標準の確立に適した装置である
 - 標準物質の供給も検討している.

2005/6/13 ナノメートル計測工学2005年 30