回折パターンによる極微細溝形状の測定評価 に関する研究*

—矩形溝形状の測定評価—

高谷裕浩** 三好隆志*** 外山 潔** 斎藤勝政***

Fundamental Study for Measurement of the Size Parameters of Fine Grooves
based on Fraunhofer Diffraction
—Analysis and Measurement of Rectangular Groove—

Yasuhiro TAKAYA, Takashi MIYOSHI, Kiyoshi TOYAMA and Katsumasa SAITO

This paper describes a measuring method based on Fraunhofer diffraction which can estimate quantitatively the size parameters of fine grooves, for example the LSI pattern, the grating and the tracking pre-groove of optical memory disks. Theoretical analysis of the relation between a rectangular groove model and diffraction intensity pattern is performed. Equations which can estimate the size parameters of grooves such as pitch, width and depth from diffraction intensity patterns are derived. From the equations, the duty ratio (width/pitch) in the range of 0.1 to maximum 0.8 and depth 1 nm to maximum 150 nm are determined within 10% errors. In order to verify the validity of the proposed method, computer simulations and fundamental experiments are carried out. It is shown by the computer simulations that this method is useful for measuring the size parameters of the fine grooves without the influences of noise on diffraction intensity and random roughness on the surface of the groove. From the measurement of the size parameters of the grooves of a high precision grating plate with pitch of 2.0 μm , width of 1.0 μm and depth of 100 nm, it is found that this method makes it possible to measure pitch, width and depth of a fine groove with consistency.

Key words: Fraunhofer diffraction, rectangular groove, fine groove, grating, optical measurement, optical memory disk

1. 結 論

近年、表面に極微細な形状を加工する技術が発展してきている。超 LSI のサーキットパターン及び精密格子板や回折格子の溝、さらに計算機用光メモリーディスクのトラッキング用案内溝（ブリグループ）のようなサブミクロンオーダーの加工精度が要求されるものがその代表的なものとして挙げることができる。

例えば、計算機用光メモリーディスクのブリグループでは、極微細な溝形状がトラッキング制御信号や再生信号に大きな影響を与える¹⁾。また、これまで行われてきたディスクから得られる電気信号による評価では生産効率が良くないことから、スタンパ工程でのブリグループのインプロセス形状測定評価技術の開発が

重要な課題となってきた。

一方、幅の狭い極微細な溝の形状を計測するためには縦方向の分解能に加え横方向にも高い分解能が要求されるため、従来の計測法では十分な精度が得られないことが指摘され始めている。現在、タリステップを用いた測定や、STM（走査型トンネル顕微鏡）による測定が試みられている²⁾。しかし、触針式ではスタイラスが溝底部に達しないために幅の狭い溝の形状寸法を測定することが困難であることが指摘されている。また、STM は高分解能な測定が可能であるが、インプロセス計測の応用を考えた場合、表面全体を走査しながら測定する方法としてはまだ多くの課題が残されている。筆者らは、これまでに Fraunhofer 回折によるナノメータオーダーに仕上げられた超精密ダイヤモンド旋削面粗さのインプロセス計測について研究を行っており³⁾、この手法は極微細溝形状のインプロセス測定評価法としても有効であると思われる。

そこで本研究は、溝の形状モデルと回折パターンと

* 原稿受付 平成 3 年 5 月 2 日。1991 年度精密工学会春季大会学術講演会（平成 3 年 3 月 28 日）にて発表

** 学生会員 北海道大学工学部（札幌市北区北 13 条西 8 丁目）

*** 正 会 員 北海道大学工学部

Fig. 1 Optical arrangement for observing Fraunhofer diffraction pattern

の関係について理論的、実験的な解明を行うことによって、極微細溝形状の基本的な特性を決定するパラメータである、溝深さ、溝幅、ピッチなどを回折パターンから定量的に評価でき、溝形状の特徴なども抽出できる測定手法の開発を目的としている。今回は定量評価の手法を確立するための基礎的な解析として、溝形状モデルに矩形形状を仮定した場合の回折強度による溝形状パラメータ測定法の理論的導出、シミュレーションによる検討、測定装置の試作及び精密格子板の測定実験について述べる。

2. 測定原理

2.1 矩形溝モデルによる理論解析

本研究における極微細溝形状の測定原理は、Fraunhofer 回折理論に基づいている。従って、本節では、まず各次回折光強度と溝形状パラメータの関係を解析し、次に回折強度に変化を与える溝形状パラメータを分離し、理論式を導出するという手順で解析を行った。

2.1.1 各次回折光強度と矩形溝形状パラメータとの関係

図1にフーリエ変換光学系の構成を示す。矩形溝表面(x - y 面)における反射光の複素振幅分布を $g(x, y)$ とすると、結像面(ξ - η 面)での複素振幅分布 $u(\xi, \eta)$ は $g(x, y)$ とフーリエ変換の関係にあり⁴⁾、次のように表される、

$$u(\xi, \eta) = \iint_{-\infty}^{\infty} g(x, y) \exp\left\{-i\frac{2\pi}{\lambda f}(\xi x + \eta y)\right\} dx dy \quad (1)$$

但し、 λ は入射レーザー光の波長($=0.6328 \mu\text{m}$)、 f はフーリエ変換レンズの焦点距離である。また、矩形溝の凹凸形状を表す関数を $h(x, y)$ とし、照射するレーザースポットの範囲で溝表面の反射率が一定であると仮定すると $g(x, y)$ は、レーザー光が試料面に対して垂直に照射される場合、

Fig. 2 Size parameters of rectangular groove model

$$g(x, y) = \exp\left\{i\frac{4\pi}{\lambda}h(x, y)\right\} \quad (2)$$

と表される⁵⁾。よって、溝の周期方向である x 方向のみを考慮し、式(2)を式(1)に代入すると、 $h(x)$ と $u(N_x)$ の関係は、

$$u(N_x) = \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left\{i\frac{4\pi}{\lambda}h(x)\right\} \exp\{-i2\pi N_x x\} dx \quad (3)$$

のようになる。ここで空間周波数を $N_x = \xi/\lambda f$ とした。そこで今、図2に示すようなピッチ P 、溝幅 W 、溝深さ D の形状パラメータをもつ矩形溝を考えると、 $h(x)$ は1周期 P において、

$$h(x) = \begin{cases} D & (-P/2 < x < -W/2, W/2 < x < P/2) \\ 0 & (-W/2 < x < W/2) \end{cases} \quad (4)$$

と表され、レーザー光が n 周期の溝表面に照射されるとして、式(3)と式(4)から $u(N_x)$ を計算すると、

$$u(N_x) = \left[-\frac{1}{\pi N_x} \right] \frac{\sin(n\pi N_x P)}{\sin(\pi N_x P)} \left\{ \left[\cos\left(\frac{4\pi D}{\lambda}\right) \times (\sin(\pi N_x W) - \sin(\pi N_x P)) - \sin(\pi N_x W) \right] + i \left[\sin\left(\frac{4\pi D}{\lambda}\right) (\sin(\pi N_x W) - \sin(\pi N_x P)) \right] \right\} \quad (5)$$

となる。よって、 m 次回折光の強度分布 I_m は、 $I(N_x) = u \cdot u^*$ (u^* は u の複素共役を表す) より、 $m = N_x P$ ($m=0, 1, 2, \dots$)、 $t = 2\pi D/\lambda$ 、とおくと、次のように表される。

$$I_m = \left[\frac{\sin(n\pi m)}{\sin(\pi m)} \right]^2 \left\{ P^2 \text{sinc}^2(m\pi) + 4W^2 \text{sinc}^2\left(\frac{m\pi W}{P}\right) \sin^2(t) - 4WP \text{sinc}(m\pi) \text{sinc}\left(\frac{m\pi W}{P}\right) \sin^2(t) \right\} \quad (6)$$

ただし、 $\text{sinc}(x) = \sin(x)/x$ である。次に、式(6)より、0次、1次、2次の回折光強度を求めると、

0次回折光強度 ($m=0$ のとき): I_0

$$I_0 = n^2 \{ P^2 - 4(WP - W^2) \sin^2(t) \} \quad (7)$$

1次回折光強度 ($m=1$ のとき): I_1

$$I_1 = n^2 4 W^2 \sin^2\left(\frac{\pi W}{P}\right) \sin^2(t) \quad (8)$$

2次回折光強度 ($m=2$ のとき) : I_2

$$I_2 = n^2 4 W^2 \sin^2\left(\frac{2\pi W}{P}\right) \sin^2(t) \quad (9)$$

また、全回折強度の和 ΣI は、式 (6) を用いて、

$$\Sigma I = \sum_{m=0}^{\infty} I_m = n^2 \{P^2 - 2(WP - W^2) \sin^2(t)\} \quad (10)$$

となる。

2.1.2 矩形溝形状パラメータの理論式

次に、各次回折光強度から溝形状パラメータを求める理論式を導出する。

1) ピッチ P の理論式の導出

0次回折光を基準とした m 次回折光の位置を T_m とすると、 m 次回折光の空間周波数 N_x は $N_x = T_m / \lambda f$ と表されるので、 $m = N_x P$ より、

$$P = \frac{\lambda f}{T_m} \cdot m \quad (m=1, 2, 3, \dots) \quad (11)$$

から、 T_m を測定することによりピッチ P を求めることができる。

2) 溝幅 W の理論式の導出

溝幅 W とピッチ P の比 (デューティ比) を $r_d = W/P$ (<1) とする。1次回折光強度 I_1 と2次回折光強度 I_2 の比を Γ_1 とすると、 Γ_1 は式 (8) と式 (9) から、

$$\Gamma_1 = \frac{I_2}{I_1} = \cos^2(\pi r_d) \quad (12)$$

となり、溝幅 W は

$$W = \frac{P}{\pi} \arccos \sqrt{\Gamma_1} \quad (13)$$

を用いて、 I_1 と I_2 を測定することにより求めることができる。

3) 溝深さ D の理論式の導出

全回折光強度の和 ΣI と0次回折光を除いた回折光強度の和 ($\Sigma I - I_0$) の比を Γ_2 とすると、 Γ_2 は式 (7) および式 (10) から、

$$\Gamma_2 = \frac{\Sigma I - I_0}{\Sigma I} = \frac{2(r_d - r_d^2) \sin^2(t)}{1 - 2(r_d - r_d^2) \sin^2(t)} \quad (14)$$

となり、 $t = 2\pi D / \lambda$ であるから、溝深さ D は、

$$D = \frac{\lambda}{2\pi} \arcsin \left\{ \sqrt{\Gamma_2 / 2(r_d - r_d^2)(\Gamma_2 + 1)} \right\} \quad (15)$$

と r_d を用いて求めることができる。

2.1.3 理論式から得られる測定限界

以上の解析から、本測定法の溝深さ D と溝幅 W の測定限界を理論式から明らかにすることができる。

まず、溝深さ D の測定限界は式 (14) を $\sin^2(t)$ につ

いて解くと、

$$\sin^2(t) = \frac{\Gamma_2}{2(r_d - r_d^2)(\Gamma_2 + 1)} \quad (16)$$

となることから、 t を一意に決定できる範囲 $0 \leq t \leq \pi/2$ から求められる。今、波長 λ を He-Ne レーザの波長 ($0.6328 \mu\text{m}$) とすると、溝深さ D は 158 nm 以下で測定可能である。

次に、溝幅 W は式 (13) から $\Gamma_1 \geq 0$ よりデューティ比 r_d は $0 \leq r_d \leq 0.5$ の範囲でしか値をとることができない。そのため、デューティ比が 0.5 より大きい時 (溝幅 W が $P/2$ より大きい場合) は、回折光強度から求めた r_d から

$$W = P \left\{ 1 - \frac{1}{\pi} \arccos \sqrt{\Gamma_1} \right\} \quad (17)$$

を用いて溝幅 W を求めることができる。

2.2 数値解析

本報が測定対象とするサブミクロンオーダの極微細溝形状を考え (例えば、光メモリーディスクのブリグループはピッチ $1.6 \mu\text{m}$ 、溝幅 $0.6 \mu\text{m}$ 、溝深さ 84 nm 程度である)、ピッチ $1 \mu\text{m}$ 及び $2 \mu\text{m}$ の矩形溝について、回折光強度の特性と理論式の誤差特性を調べるため、理論解析に基づいた数値解析を行った。また、ピッチ $2 \mu\text{m}$ の矩形溝の解析は、本測定法の検証実験に用いた矩形溝精密格子板に関する比較データとなっている。

2.2.1 回折光強度の特性

表1はピッチ P が $1 \mu\text{m}$ および $2 \mu\text{m}$ の矩形溝について、溝幅 W と溝深さ D を与えて式 (7)~式 (10) より計算した各次回折光強度とそれらを用いて理論式から求めた溝深さ D_{FD} を示したものである。なお、全回折光強度は実際の計測を考慮し $I_0 \sim I_3$ の和 I_{0-3} を用いて計算している。表1によると、式 (10) から得られた理論値 ΣI と I_{0-3} の差は小さく、溝深さの推定も 1 nm からはば 10% 以内の誤差で求められている。また、デューティ比 0.5 の溝では2次回折光強度が0となる次数欠除が生じているが、溝深さの測定には影響しないことがわかる。

2.2.2 誤差特性

さらに、溝幅と溝深さ共に 10% 以内の誤差で測定できる範囲 (図のドットで示してある範囲) を、ピッチ $1 \mu\text{m}$ と $2 \mu\text{m}$ の溝に対して示したものが図3である。ピッチが変わっても誤差の傾向が全く変わっていないことから、誤差は溝のピッチとは無関係に、デューティ比と溝深さで決定されることがわかる。つまり、本測定法は溝形状のデューティ比が $0.1 \sim 0.8$ 、深さが 150 nm 以下の場合の広い範囲において、誤差

Table 1 Ideal intensity in each order diffraction calculated by theoretical equations and depth of rectangular groove estimated from the intensity

P μm	W μm	D nm	I_0	I_1	I_2	I_3	I_{0-3}	ΣI	D_{FD} nm
1	0.3	1	230 381	6.021 38	2.080 34	0.097 61	230 389	230 309	0.927 3
		10	228 499	600.183	207.358	9.729 48	229 317	229 450	9.276 9
		50	186 517	12 857.8	4 787.76	224.647	205 387	208 458	46.753
		100	94 668	42 862.5	14 808.6	694.839	153 034	162 534	95.253
		150	38 158	60 707.5	20 973.9	984.121	120 824	134 279	139.91
	0.5	1	230 377	9.199 85	0.000 00	1.022 21	230 388	230 389	0.949 0
		10	228 137	916.998	0.000 00	101.889	229 156	229 269	9.493 2
		50	178 158	21 172.9	0.000 00	2 352.54	201 683	204 279	47.824
		100	68 814	65 488.1	0.000 00	7 276.46	141 579	149 607	97.562
		150	1 541	92 752.8	0.000 00	10 305.9	104 600	115 971	149.55
2	0.5	1	230 382	4.602 83	2.301 41	0.511 42	230 390	230 391	0.933 1
		10	228 701	458.787	229.393	50.976 4	229 441	229 650	9.333 1
		50	191 195	10 592.5	5 296.28	1 176.96	208 261	210 797	46.942
		100	109 161	32 757.4	16 378.7	3 639.71	161 937	167 780	96.020
		150	58 742	46 379.9	23 189.9	5 153.33	133 466	144 571	137.19
	1.0	1	230 377	9.205 66	0.000 00	1.022 85	230 387	230 388	0.949 0
		10	228 135	917.575	0.000 00	101.952	229 155	229 267	9.493 2
		50	178 127	21 185.1	0.000 00	2 353.90	201 666	204 263	47.824
		100	68 748	65 514.9	0.000 00	7 279.43	141 542	149 574	97.563
		150	1 523	92 759.9	0.000 00	10 306.6	104 590	115 961	149.56

Fig. 3 Measuring range of width and depth within 10% errors determined by numerical analysis of the equations which can estimate the size parameters of rectangular grooves

10% 以内の高精度な測定が可能であることがわかる。なお、デューティ比がおおよそ 0.1 以下、0.8 以上の場合と溝深さが 150 nm を越えてくると誤差が大きくなっていく傾向があるが、誤差の要因としては、全回折光強度 ΣI の代わりに 0 次～3 次までの回折光強度の和 I_{0-3} を用いて溝パラメータを求めたことによる影響がでてきているものと思われる。

3. 計算機シミュレーションによる解析

3.1 シミュレーションの手法と結果の一例

まず、シミュレーションの手順を以下に示す。

- ① 溝形状をサンプル数 4 096 点の離散データでモデル化する。
- ② 溝形状データを複素振幅データに変換する。
- ③ 高速フーリエ変換 (FFT) によって回折光の複素振幅分布を計算する。
- ④ 複素振幅分布から回折強度分布を計算し、理論解析で導出した溝形状パラメータを求める理論式を用いて溝のピッチ、溝幅、溝深さを求める。
- ⑤ 溝形状モデルのパラメータと比較する。

図 4 (a), (b) に、シミュレーション結果の一例としてピッチ 2 μm 、幅 1 μm 、深さ 100 nm の溝形状モデルと回折光強度分布を示す。数値解析で示した回折光強度

を 0 次回折光で正規化した各次回折光強度とシミュレーションによって得られた回折光強度分布の結果は良く一致している。また、シミュレーションによる回折光強度分布から理論式を用いて求めたピッチ P 、溝幅 W 、溝深さ D も溝形状モデルのパラメータと 10% 以内の誤差で一致していることがわかる。以上のことから、シミュレーションの手法は理論解析の結果と良く一致する妥当なものであると言える。

3.2 ノイズ及びランダム粗さの影響

はじめに、実際の測定を考慮したシミュレーションとして、本測定法のノイズ特性と、矩形溝形状にランダムな微小粗さがある場合についてのシミュレーションを行った。そこで、回折光強度分布の測定ノイズや外乱光によるノイズが生じた場合、その影響を定量的に調べるため、ノイズの程度を次のように定義した。ノイズを含んでいない回折光の複素振幅分布 u_j および強度分布 $|u_j|^2$ を、

$$u_j = \text{Re}(u_j) + i\text{Im}(u_j),$$

$$|u_j|^2 = [\text{Re}(u_j)]^2 + [\text{Im}(u_j)]^2 \quad (18)$$

とし、ノイズ成分 n_j 、 $|n_j|^2$ を、

$$n_j = \text{Re}(n_j) + i\text{Im}(n_j),$$

$$|n_j|^2 = [\text{Re}(n_j)]^2 + [\text{Im}(n_j)]^2 \quad (19)$$

とすると、ノイズを含んだ回折光強度 $|u_j'|^2$ は、

$$|u_j'|^2 = [\text{Re}(u_j) + \text{Re}(n_j)]^2$$

Fig. 4 Examples of the computer simulation by using FFT: Groove models and intensity distribution obtained from the groove with pitch of 2.0 μm , width of 1.0 μm and depth of 100 nm

$$+[\text{Im}(u_j) + \text{Im}(n_j)]^2 \quad (20)$$

で表され、これを用いて溝形状パラメータを計算した。また、ノイズレベルは

$$\text{SNR}[\text{dB}] = 10 \log_{10} \left[\frac{\sum_{j=1}^n |u_j|^2}{\sum_{j=1}^n |n_j|^2} \right] \quad (21)$$

のように S/N 比 (SNR) で定義し、デシベルで表した。また、溝表面に発生したランダムな微小粗さはガウス分布に従うと仮定し、その大きさを自乗平均平方根粗さ (RMS) で定義した。従って、溝形状を h_j 、微小粗さ成分を n_j とすると、粗さを含んだ溝形状は $h_j + n_j$ で表され、図 4 (c) のようになり、これを用いて回折光強度を計算した。表 2 はシミュレーションの結果を示したもので、ノイズを含んだ回折光強度から求めた溝深さと S/N 比の間に相関関係はほとんど見られない。さらに、粗さのある溝の場合も同様な結果となっており、微少な粗さがあっても溝深さの測定にはほとんど影響を与えないということがわかる。従って、本測定法はノイズの影響を受けにくく、また多少ランダムな粗さ成分があっても形状の変化に対しては敏感に反応し溝形状パラメータを高精度に計ることができることから、

Table 2 Depth estimated from noisy diffraction intensity vs. SNR and depth estimated from diffraction intensity from the groove with random roughness vs. RMS

Noisy diffraction		Random roughness	
SNR dB	Depth nm	RMS nm	Depth nm
—	100.0	0.0	100.0
13.1	97.1	5.0	97.1
7.3	97.7	10.0	97.1
2.7	96.6	20.0	96.6
1.6	97.6	30.0	96.4

実際の測定への適用が可能であることがわかる。

3.3 形状偏差が回折光強度に与える影響

次に、実際の溝形状が理想的な矩形形状とは異なっている場合、特に台形形状に近い形状になっている場合の回折光強度の挙動を調べた。図 4 (d) は、ピッチ、幅、深さを変えずに底幅を変化させた溝形状を示しており、溝幅 W と溝底幅 B の比 B/W によって溝形状偏差を定義した。図 5 (a) は、ピッチ 2 μm 、溝幅 1 μm 、溝深さ 100 nm の溝の回折光強度と溝形状偏差の関係を示したものである。また (b) は、ピッチ 1 μm 、溝幅 0.5 μm 、溝深さ 100 nm の場合について示してある。図 5 から、溝のピッチが異なっても溝形状偏差 B/W に対する回折光強度の変化はほとんど同じである。従って、回折光強度は形状偏差のみに依存して変化していると言える。また、2 次回折光及び 3 次回折光は溝形状が変化してもほとんど変化していないのに対し、1 次回折光は形状偏差の影響を強く受けることから、1 次回折光の変化から形状偏差を推定できる可能性があると考えられる。

4. 測定実験

4.1 実験装置の構成

本測定法の有効性を検証するため、ピッチ 2 μm の

Fig. 5 Plot of diffraction intensity obtained from trapezoidal grooves vs. ratio B/W of trapezoidal groove model

Fig. 6 Schematic diagram of fine groove measuring system

矩形溝精密格子板を試料として測定実験を行った。

図6に測定装置の構成を示す。計算機シミュレーションの結果からもわかるように、極微細な溝からの回折光はピッチ $2\mu\text{m}$ の溝による3次回折光で回折角が 43.5° と大きく広がる。そのため、本測定装置は回折パターンを一度に測定することができるように、焦点距離 70mm 、開口 50mm のフーリエ変換レンズを試料表面から 10mm 程度の位置に設置することによってレンズの開口に高次の回折光までが入るようにし、さらに受光素子としてイメージスキャナに用いられているA4サイズのアモルファスシリコンイメージセンサ（長さ 216mm 、画素数 3402 ドット、画素ピッチ 400dot/inch ）を採用した。このイメージセンサを用いた場合、溝ピッチの測定分解能 $|dP|$ は、式(11)を用いて、

$$|dP| = \left| \frac{\lambda f}{T^2} \right| \cdot |dT| \quad (22)$$

から求めることができ、レーザの波長 $\lambda = 0.6328\mu\text{m}$ 、フーリエ変換レンズの焦点距離 $f = 70\text{mm}$ とし、ピッチ $2.0\mu\text{m}$ 程度の溝の場合を考え0次回折光と1次回折光の距離 $T = 20\text{mm}$ とすると、イメージセンサの画素ピッチ $|dT| = 63.5\mu\text{m}$ を用いて、 $|dP| = 0.007\mu\text{m}$ となる。従って、溝ピッチの測定には十分な分解能を持っている。また、イメージセンサはAGC (Auto Gain Control) 回路を内蔵しており、ドライバ回路によって白基準、黒基準を測定しダイナミックレンジの設定および各画素間の感度校正を行うことができる。従って、測定前にあらかじめAGCを行って、回折光強度の測定を開始する。

光源にはHe-Neレーザ（出力 0.8mW 、スポット径 $480\mu\text{m}$ ）を用いており、射出されたレーザ光はレンズの後方焦点側に置かれたハーフミラーで反射され、レンズの光軸を通り試料面に照射される。試料からの回折光はフーリエ変換レンズによって焦点距離に配置されたイメージセンサ上に結像する。このとき0次回折光だけが再びハーフミラーを通過するため、回折光強度を測定するときはハーフミラーの透過率（50%）を考慮し、0次回折光だけを2.0倍してデータ処理を行う。イメージセンサで受光した回折光強度データは256階調にA/D変換されDMAボードを介してパーソナルコンピュータに取り込まれ、強度分布データを用いて理論式からピッチ、溝幅、溝深さの計算を行う。

4.2 実験結果

極微細矩形溝の試料には、標準矩形格子として用いられているガラス製精密格子板（公称値：ピッチ $2.0 \pm 0.002\mu\text{m}$ 、溝幅 $1.0 \pm 0.4\mu\text{m}$ 、溝深さ $100 \pm 20\text{nm}$ ）を用意し、さらにそれを反射型とするために表面にアルミニウム蒸着を行ったものを用いた。図7(a)および(b)は、ガラス製精密格子板の断面形状とアルミニウム蒸着を行った後の断面形状をタリステップで測定した結果を示したものである。これより、アルミニウム蒸着を行った後でも溝形状はほぼ矩形形状になっていることが確認できる。また、図7(c)は試料から得られた回折光強度分布と溝パラメータの測定結果を示したもので、回折光強度は、1次回折光に加えて2次回折光が測定された。これは、数値解析で得られた結果からわかるように、溝幅が $1.0\mu\text{m}$ （デューティ比0.5）より小さいことを示している。さらに、図7(b)の試料の断面曲線からも確認できるように、アルミニウム蒸着を行ったことによって溝幅がガラス製精密格子板よりも狭くなっており、回折光強度から求めた溝幅の測定値 $0.83\mu\text{m}$ は、断面曲線から得られた溝幅 $0.8\mu\text{m}$ と良く一致していることがわかる。また、回折光強度によるピッチ、溝深さの測定値はそれぞれ $1.98\mu\text{m}$ 、 98.8nm となっており、試料の断面曲線による値（ピッチ $2.0\mu\text{m}$ 、溝深さ 100nm ）と比較するといずれも10%以内の誤差で測定されていることがわかる。

次に、本測定法の繰返し精度を調べるため往復測定を行った。測定は、レーザスポット（ $\phi 480\mu\text{m}$ ）を格子に対して横切る方向に走査しながら 0.5mm 間隔で行い、すべての測定点（15点）に対してピッチ、溝幅、溝深さを求めた。まず、ピッチの測定結果はすべての測定点で往復共に $1.98\mu\text{m}$ となっていた。こ

(c) Diffraction intensity distribution and groove parameters

Fig. 7 An example of measuring data obtained by proposed method and cross section of grooves measured by stylus profilometer

れは、試料の矩形溝がほぼ様なピッチでできていることを示している。次に、行き (Forward) と帰り (Backward) での各測定点に対する溝幅および溝深さの測定結果を示したものが図 8 (a) と (b) である。往復での測定値の差は、最大でも溝幅でただか $0.02 \mu\text{m}$ 、溝深さで 10 nm 程度で、全体的によく一致しており、良好な繰返し性が得られていることがわかる。なお、測定箇所によって、溝幅の測定値は $0.77 \sim 0.83 \mu\text{m}$ 、溝深さの測定値は $78 \sim 98 \text{ nm}$ とほぼ精密格子板の寸法公差の範囲でばらついてはいるが、測定値が往復で良く一致していることから測定誤差によるばらつきではなく、溝の凹部に付着した蒸着膜厚の不均一さによって生じたものであると考えられる。

以上の実験結果から、本測定法は極微細な矩形溝形状の高精度な定量評価に有効であることがわかる。

5. 結 論

回折パターンを用いて極微細な矩形溝形状のパラメータを定量的に評価する手法について論じ、以下のような結論を得た。

- (1) 溝形状を矩形状モデルで表し、回折光強度分布と溝形状パラメータとの関係を理論的に解析し、ピッチ、溝幅、溝深さを求める理論式を導出

Fig. 8 Size parameters of groove along a path to go forward and backward on a high precision grating plate surface measured in 0.5 mm sampling interval and 15 sampling points

した。

- (2) 理論式を基にした数値解析から、本手法はデューティ比 $0.1 \sim 0.8$ 、溝深さ 1 nm から 158 nm までを理論的に誤差 10% 以内で測定できることを明らかにした。
- (3) 矩形溝モデルから回折光強度を求め、ピッチ、溝幅、溝深さを推定する計算機シミュレーションを行い、本測定法のノイズ特性や、溝表面に微小なランダム粗さがある場合でも測定には影響しないこと、さらに溝形状が底幅 B 、溝幅 W の台形状である場合、形状偏差 B/W の影響は 1 次回折光に現れることを示した。
- (4) ピッチ $2 \mu\text{m}$ 、溝幅 $0.8 \mu\text{m}$ 、溝深さ 100 nm のアルミニウム蒸着した矩形溝精密格子板の測定実験によって理論解析を検証し、本測定法は極微細な溝形状の定量評価に有効であることを示した。

参 考 文 献

- 1) 応用物理学会光学懇話会編：光ディスクシステム，朝倉書店，(1989)。
- 2) 加藤恵三ほか：STM による光ディスク案内溝の形状寸法測定，昭和 63 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集，J78 (1988)。
- 3) 清水義幸ほか：Fraunhofer 回折像による超精密加工面形状の測定評価に関する研究 (第 2 報)——ダイヤモンド旋削面粗さのオンマシン計測，1989 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集，D07 (1989)。
- 4) J. W. Goodman: Introduction to Fourier Optics, McGraw-Hill, New York, (1968) 57。
- 5) J. W. Goodman: Laser Speckle and Related Phenomena, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, (1975) 62。