

AFM 探針の鋭利化と MO ディスク表面 微細形状測定への適用

岸 本 洋 明
松 田 正 代

Sharpening of AFM Probes for the Measurement of Fine Shapes on the Surface of Magneto-Optical Disks

Hiroaki KISHIMOTO
Masayo MATSUDA

Conventional AFM probes were sharpened by the irradiation of electron beam in SEM and using the probes obtained, very fine pits and grooves on the surface of magneto-optical disks (MOD) were measured faithfully. The sharpened probes successfully led to a symmetrical cross section of MOD pit, while a distorted shape resulted with conventional probes. The hand-made probes were calibrated against the standard cross section specimen for quantitative measurement.

1. はじめに

表面の微細な凹凸形状を定量的に測定する手段として、AFM (Atomic Force Microscope=原子間力顕微鏡) が多方面で利用されつつある。特徴としては、

- 1) 個々の原子が識別できる高解像度を有する、
- 2) 測定環境を選ばず、大気中での測定が可能、
- 3) 絶縁物の測定が可能であり、導電膜付けなどの前処理が一切不要である、

などが挙げられる。

一般的に、探針先端と試料表面の何らかの相互作用を、両者間の距離の制御手段として用い、表面を走査したときの制御信号より、試料表面の微細凹凸を測定する顕微鏡を、SPM (Scanning Probe Microscope=走査型プローブ顕微鏡) と呼ぶ。このようなものとして、まず最初に、探針と試料が 1 nm まで接近したときに流れるトンネル電流を相互作用として適用したものが、1982年に発明された STM (Scanning Tunneling Microscope=走査型トンネル顕微鏡) である¹⁾。しかし、この STM

は、絶縁体の測定が基本的に不可能であるという欠点を持つ。

そこで、このような制限のない測定手段として、1986年に、AFM が発明された²⁾。AFM は、微小探針を用いた、極めて微小な荷重下における、触針式の段差計と見ることができる。従って、測定された段差形状には、探針形状の影響が必ず出る。ところが、従来の AFM の探針形状は鋭利でないために、切り立った断面形状の測定には不向きである。

MOD (Magneto-Optical Disk=光磁気ディスク) は、現在すでに、将来の大容量化のための高密度化に向けた開発が、当社を含めて開始されており、記録面上の微細パターンの、より一層の微細化が図られることになる。この微細形状の設計が、出荷される MOD の信号品質に、直接、効果を及ぼすため、その形状の設計と、定量的な評価法の確立が重要となってくる。現行規格の MOD の評価は、これまで SEM により行ってきたが、限界に達しつつある。

微細形状の“深さ方向”の測定再現性が、SEM より

も優れている AFM (SFA-300、SEIKO) を導入し、より一層多面的な形状測定を試みようとした。これに際し、AFM の唯一の欠点ともいえる、探針の形状の問題に対し、筆者らは、SEM を用いて市販の探針先端を簡便に鋭利化する手法を見出し、MOD の測定に適用したので、報告する。

2. AFM の測定法

Fig. 1 に、“光てこ方式”と呼ばれる方式の作動原理を示す。カンチレバー（片持ち梁）の先端に、エッチングにより形成されたピラミッド型の突起を探針とする。カンチレバーの背面にレーザービームを照射し、その反射光を、2分割フォトダイオードの中心で検出するようにしておく。試料は、3軸が独立の圧電素子で駆動される試料台上に設置されている。この探針を、試料表面にほとんど接触するまで近づけると、原子間力と呼んでい

る反発力により、カンチレバーが僅かに上に反る。このとき現れるフォトダイオードの差動出力が0となるように、Z 軸圧電素子に印加する電圧を制御する。試料を X-Y 方向に走査したときの電圧値を、表面の段差として読み出す。

3. MOD 信号面の微細パターン

測定対象としている MOD の概略を、Fig. 2 に示す。データは、ディスク面の渦巻き状の案内溝に沿って配列されている。放射状に見えるのは、データ配列の位置を認識するためのアドレス部であり、拡大図に示すように、案内溝に挟まれた帯状のトラック上に、デジタル変換されたビットとして、予め記録されている。

Fig. 3 は、このビットと溝の断面形状を模式的に示したものである。形状は深さや幅で特徴づけられる。MOD では、凸レンズにより、回折限界まで絞ったレー

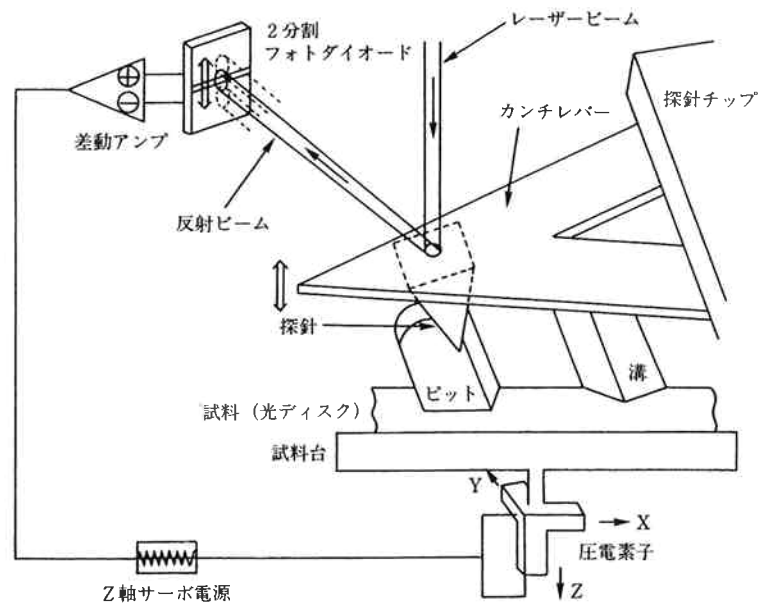


Fig. 1 Configuration of an AFM measurement.

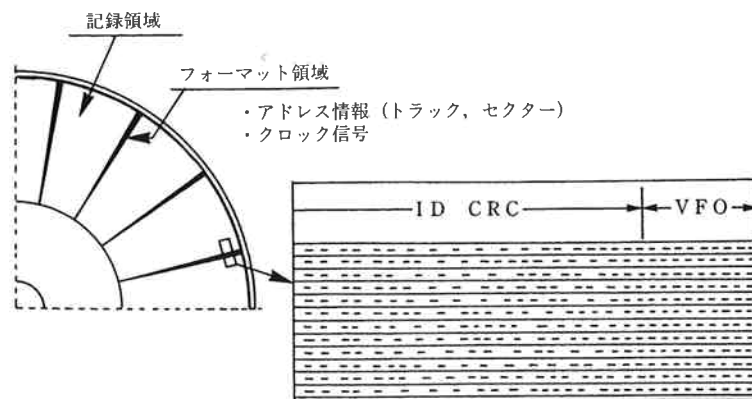


Fig. 2 Data layout on a magneto-optical disk.

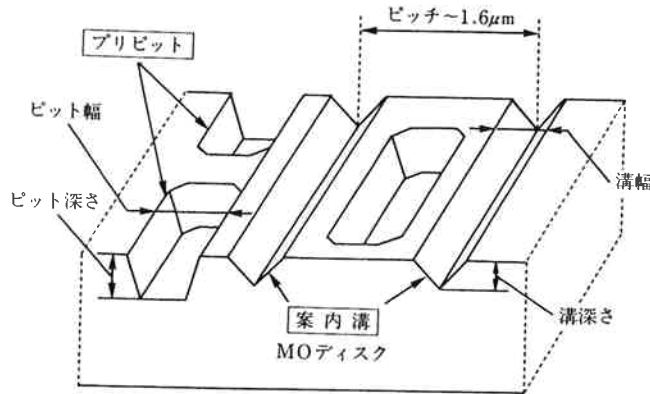


Fig. 3 Shapes of pits and grooves pre-formatted on a magneto-optical disk.

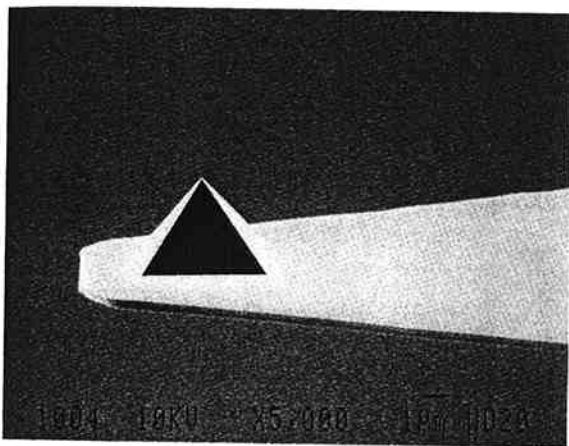


Fig. 4 Tip shape of a conventional AFM probe.

もに、困難となることが予想された。そこで AFM を導入し、微細断面の定量的な測定の実現をめざした。

4. AFM 探針形状の較正法

AFM は、触針式の表面段差計の一種であるため、探針の形状が測定形状に影響を与える。そこで、この探針形状そのものを測定し、断面形状の実測値に対する較正を行う必要がある^{3,4)}。探針となるピラミッドの先端は、Fig. 4 に示すように、実際には丸くなっており、その形状は、曲率半径 R と、開き角 α で特徴づけられる。市販されている探針では、 $R \sim 100$ nm、 $\alpha \sim 70^\circ$ である。

矩形断面を持った試料表面を測定することにより、この R と α を求めることができる。Fig. 5 において、以下のように定義する。

- R : 探針先端半径
- α : 探針先端開き角
- d_t : 真の矩形の深さ
- d_m : 測定された矩形の深さ
- w_t : 真の矩形の半値幅
- w_m : 測定された矩形の半値幅
- δ : 探針形状による矩形底の位置ずれ
- ω, k : 図の通り

幾何学的な関係から、

$$\begin{aligned} \omega &= (d_m/2) \tan(\alpha/2) \\ (w_t/2) &= (w_m/2) - \omega + \delta \\ d_t &= k \cos(\alpha/2) \\ &\quad + R[1 - \sin(\alpha/2)] \\ \delta &= k \sin(\alpha/2) \\ &\quad + R \cos(\alpha/2) \\ d_m &= d_t \end{aligned}$$

これらの式より、

レーザービームをディスク面に照射し、ピットや溝による反射光の強弱変化を利用して、案内溝でトラッキングしながら、ピットの情報を読み出している。このため、これらの形状の適否が、反射光量の“必要十分な変化量の成否”にかかっている。現在製造している MOD では、SEM (走査型電子顕微鏡) により、断面形状を評価している。しかし、高密度化に伴う凹凸形状の微細化とと

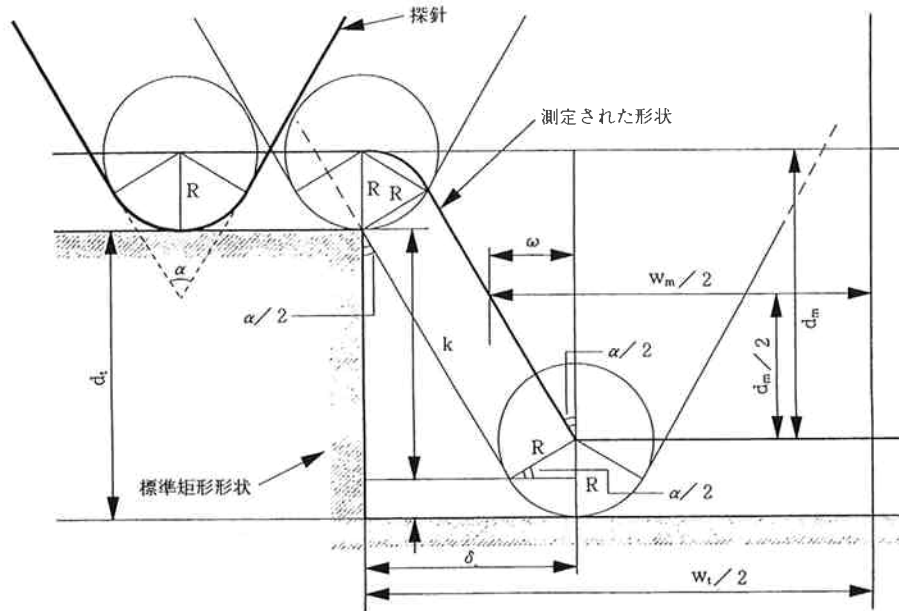


Fig. 5 Conceptual of an AFM measurement in rectangular cross section.

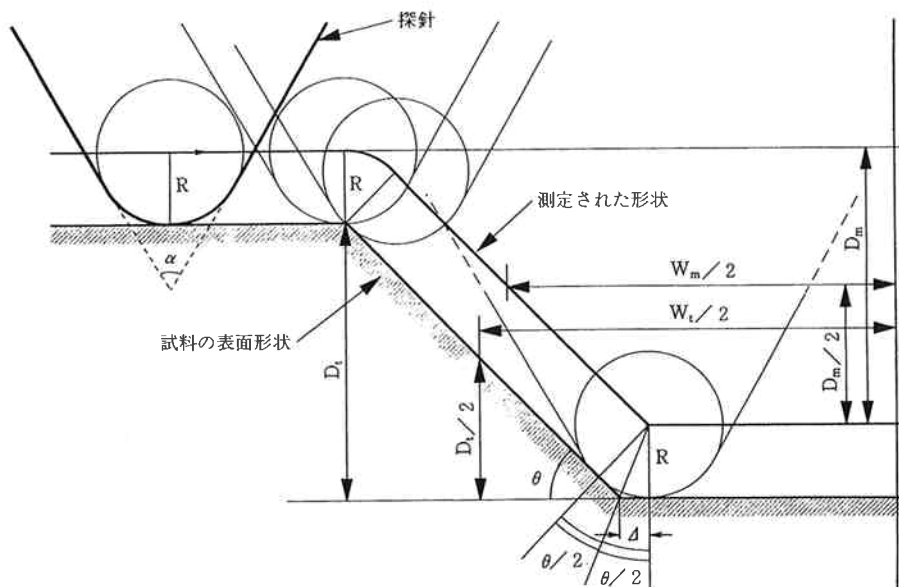


Fig. 6 Conceptual of an AFM measurement in cross section with a slope.

$$R = [(w_i - w_m) \cos(\alpha/2) - d_m \sin(\alpha/2)] / [2(1 - \sin(\alpha/2))]$$

ここで、 $(\alpha/2)$ は測定された形状からわかるので、先端開き角 α が求まる。 w_i が既知であれば、 R がわかる。こうして、探針の R と α を知ることができる。

次に、この探針を使って、Fig. 6 のように、MOD のピット形状を測定する場合を考える。定義は以下の通りである。

- D_i : 真のピットの深さ
- D_m : 測定されたピットの深さ
- W_i : 真のピットの半値幅

- W_m : 測定されたピットの半値幅
- Δ : 探針形状によるピット底の位置ずれ
- θ : ピット側面の水平からのずれ

これらから、 $\theta + (\alpha/2) < 90^\circ$ の条件を満たすとき、

$$\Delta = R \tan(\theta/2)$$

$$\Delta = (W_i/2) - (W_m/2)$$

これより、

$$W_i = W_m + 2\Delta$$

$$= W_m + 2R \tan(\theta/2)$$

これは、 α とは無関係である。また、

$$D_i = D_m$$

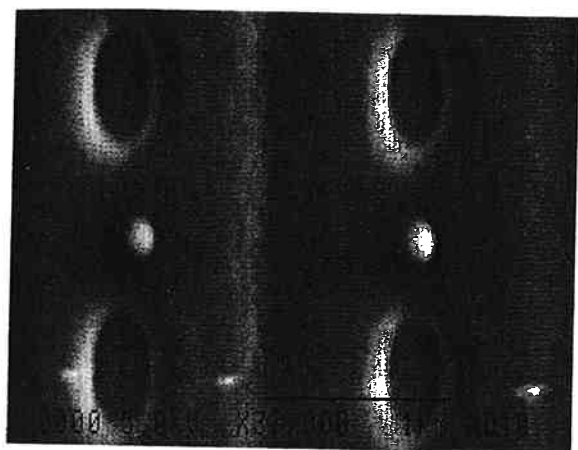
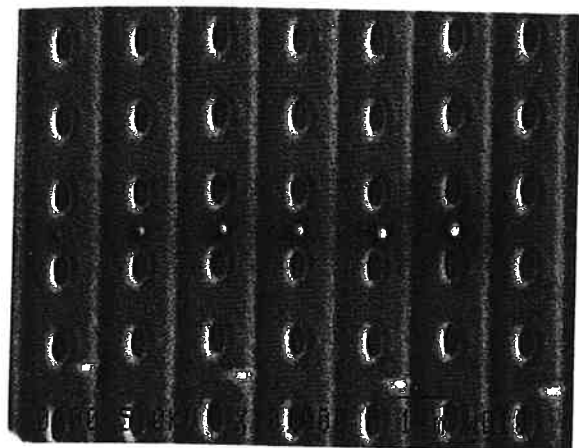


Fig. 7 Spotmark on a MOD substrate formed by irradiation of electron beam in SEM.

こうして、 W_i と D_i が求まる。条件を満たすためには、 α が小さい、即ち、探針先端が、より鋭利であることが望ましい。

5. AFM 探針の鋭利化

現有の SEM (JSM-820、JEOL) には、電子ビームを走査せずに、任意の時間、一点に照射し続ける機能がある。このときに生じる微小スポットは、平坦な表面を観察するときの焦点や、非点収差の調整の目標となって、便利である。このスポットを、MOD の PC (ポリカーボネート) 基板に作成した例を、Fig. 7 に示す。楕円状に見えるのは、現行規格における最も小さいピットである。縦方向の線状のパターンは、案内溝である。加速電圧、照射電流値、収束状態にもよるが、このスポットは、ピットよりも十分小さいことがわかる。真上から見ると米粒状に見えるこのスポットを、真横から見ると、電子ビームの上流方向に、角状に伸びた突起形状をしていることがわかった。この突起は、ピットの中に入り込むことのできる形状であることから、これを、AFM 探針先端の鋭利化に応用することを考えて、検討を始めた。

照射電流値と照射時間を変えた場合の探針の太さや長さを検討した様子を、Fig. 8 に示す。これは、MOD のスタンプ表面のパターン上に、角状の突起を形成したものである。このように、条件を変えることによって、様

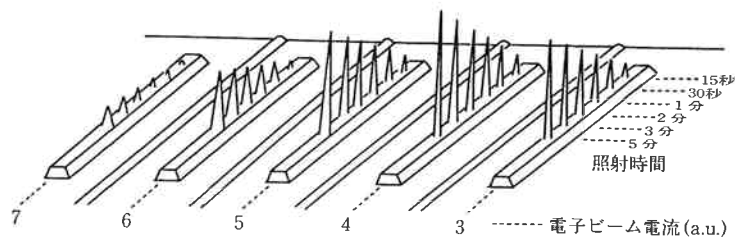
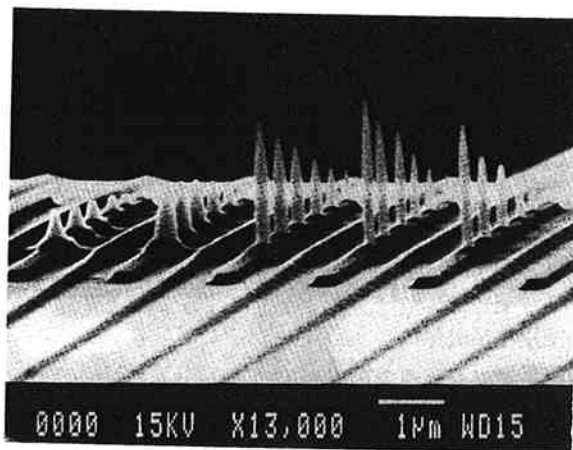


Fig. 8 Several shapes of hornlike projection formed by the irradiation of electron beam under various conditions.

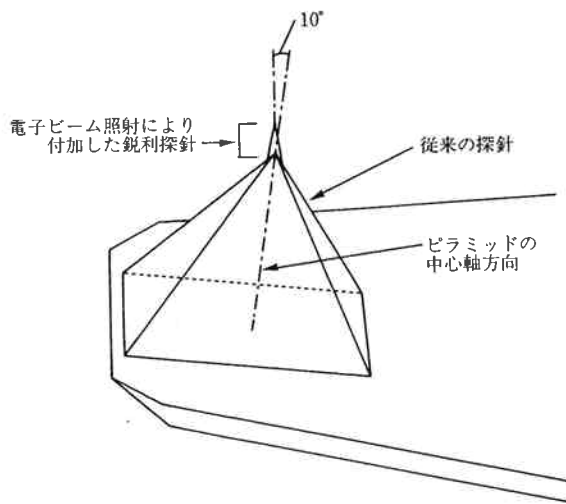
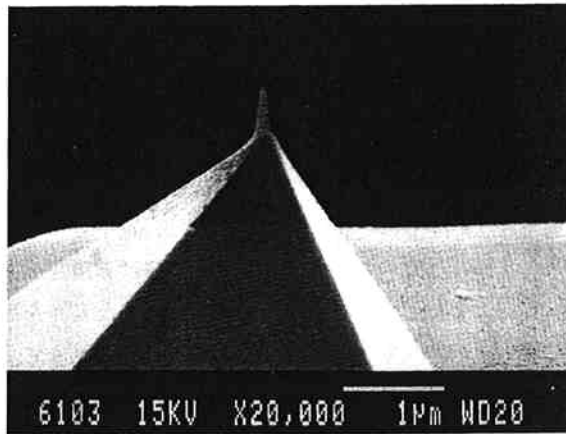


Fig. 9 Hornlike projection grown on a tip of a conventional AFM probe.

々な形状の突起を得ることができる。しかし、実際に同一条件で、別の機会に作成したところ、必ずしも同じ形状を得ることはできず、その時々焦点や、非点状態の微妙な差、及び、個人差によっても、太さや長さが異なった。この差異は、先端の R や α の差となって現れる。

ここで、スタンプとは、樹脂の射出圧縮成形により、大量に複製される MOD 基板上に、ピットや溝を形成するための、これに対応する微細な突起を表面を持った、金型の一部分をなすものである。直径 138 mm、厚さ 0.3 mm の Ni 製の薄板であり、本体の金型の記録面側に取り付けて、基板の成形複製を行う。従って、スタンプ上のピットや溝に相当する微細突起形状の適否が、大量に複製される MOD の信号品質を左右する。

Fig. 9 は、従来のピラミッド型探針の頂上に、この角状の突起を成長させた様子を示したものである。“光てこ方式”の場合、Fig. 1 の光学的配置からわかるように、カンチレバーは試料面と平行ではなく、約 10° の

傾きがある。従って、ピラミッドの中心軸は、試料面に対して垂直ではなくなる。そこで、測定時において、この鋭利探針を試料面に垂直とするために、この軸に対して約 10° 傾いた方向に沿って、角状突起を成長させた。この様子も併せて、Fig. 9 に示す。

6. MOD 表面測定への適用

MOD 上の、VFO ピットと呼ばれる最小のピットを形成するための、スタンプ上の突起を、従来の探針、及び、試作した鋭利探針により、比較測定した。Fig. 10 の上部は測定結果であり、凹凸の高さを濃淡で表示したものである。従来の探針で測定すると、鋭利探針の場合と比べて、ピットは大きくなっている。しかも、その形は非対称であり、右側の傾斜が左側よりも緩やかである。これに対して、鋭利探針では、対称性の良い形状として測定されている。

Fig. 10 の下部は、測定の様子の概念図である。VFO 突起の断面は台形である。従来の探針は、先端開き角が 70° で、その中心軸が 10° 傾いているため、探針それ自身が邪魔となって、探針の先端が台形の右側斜面を忠実に走査することができず、探針自身の形状を反映した測定形状となってしまう。鋭利探針の先端角は台形の傾斜角よりも小さいので、VFO 突起の特徴を損なわずに測定することができた。次に、測定形状の較正法について考える。

7. 測定形状の較正法

探針形状の較正法については、5. において考察した通りである。しかし、MOD の信号特性を議論する場合、ピット、溝形状の測定精度は、10 nm 以下が要求される。AFM 探針は消耗品であるため、探針の交換毎に、標準試料による較正が必要となる。ところが、実際には、標準となるべき満足な矩形断面試料は、現在は存在しない。標準試料と称するものでも、矩形の角の部分は、現実にはある程度の丸みを持っており、更にその形状には、面内分布が存在するため、探針毎に較正の仕方が異なってくる恐れもある。その上、段差の測定に際して、鋭利探針の反りの影響と思われる、形状の若干のひずみが観察された。このようなことから、現状では、探針先端の R や α を精度良く求めるのは困難である。

さて、いま、AFM により形状測定を行う対象は、MOD のピットや溝である。そこで、一つのスタンプを決めて、この面上のパターン形状を標準試料とした。SEM 観察による Fig. 11 のような断面形状から、突起

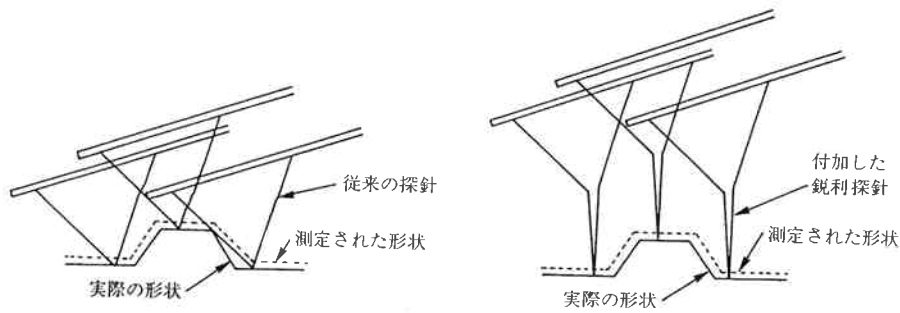
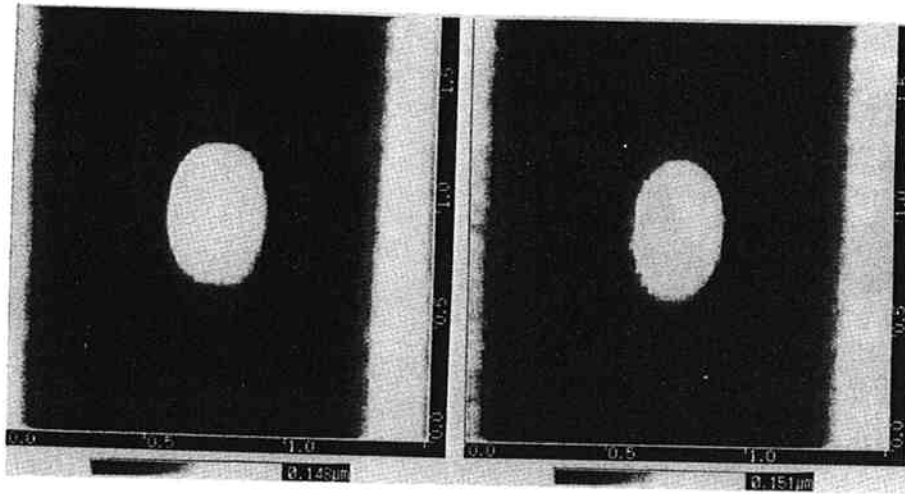


Fig. 10 Shapes of projection on a MOD stamper for VFO pit measured by AFM with conventional and hornlike probes.

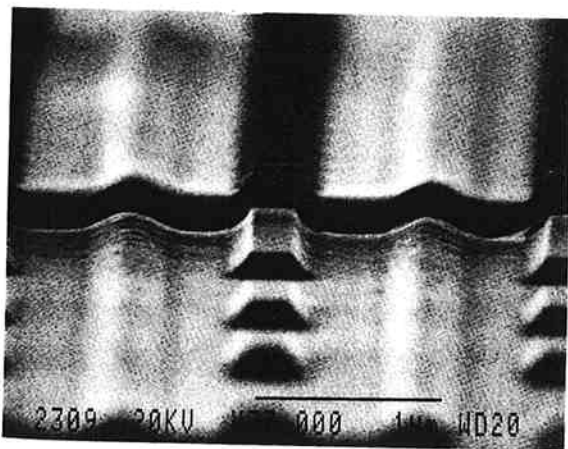


Fig. 11 Cross section of the projection on a MOD stamper used for pit and groove stamping on a MOD substrate.

を、従来型探針の先端に照射してできる角状突起を、より鋭利な探針とし、MOD 表面の、微細なピットや溝形状の、解像度の良い測定に適用した。消耗品である AFM 探針は手作りであるため、探針毎の較正法についても、検討を行った。その結果、現段階では、MOD スタンプ状の微細パターンが、実用的であることがわかった。

MOD は、現在すでに、高密度化の検討が開始されている。その眼目の一つは、ピットや溝の、より一層の微細化である。SEM による形状評価は、すでに、限界に達しつつあり、今後は、較正された鋭利な探針を用いた AFM による評価が重要になると考えている。

文 献

- 1) G. Binnig, H. Rohrer, Ch. Gerber and E. Weibel, *Phys. Rev. Lett.*, **49**, 57 (1982).
- 2) G. Binnig, C. F. Quate and Ch. Gerber, *Phys. Rev. Lett.*, **56**, 930 (1986).
- 3) T. Nakano, K. Taira, M. Matsumaru and T. Murakami, *JJAP Proc. Int. Symp. on Optical Memory*, **6**, 51 (1991).
- 4) D. Keller, *Surf. Sci.*, **253**, 353 (1991).

の高さや、幅を求めておく。これを AFM 測定値と比較し、その差異を探針の較正值としている。

8. ま と め

AFM による表面段差測定において、最も問題となる探針形状の影響を極力抑えるため、SEM の電子ビーム



著 者

氏名 岸 本 洋 明
Hiroaki KISHIMOTO
入社 昭和62年 4 月 1 日
所属 研究本部
新材料研究所
新素材応用研究室
副主任研究員



著 者

氏名 松 田 正 代
Masayo MATSUDA
入社 平成元年 3 月 16 日
所属 研究本部
新材料研究所
新素材応用研究室