

環境負荷を考慮した大容量光メモリ用反射膜材料の開発

Low-Noise and Low-Environmental-Impact Reflective Material for High-Density Optical Data Storage

樋口 隆信, 細田 康雄

Takanobu Higuchi, Yasuo Hosoda

要旨 記録再生特性と環境負荷の両立を目的として新しい反射膜材料の開発を行い、環境負荷の目安となる PRTR 法の対象にならない物質を用いて、反射膜を構成する結晶粒子を微細化することにより媒体ノイズを低減した。新規に開発した AlPdSnO 合金を Blu-ray Disc 型の光メモリ媒体に適用すると、既存のアルミニウム合金よりも優れた記録再生特性を示した。

Summary We designed a new reflective material for high-density optical data storage that considers both recording and reproducing properties, and environmental impact. In order to improve disk noise, we tried to reduce the size of the crystal grains of the reflective layer by adding some elements that obstruct the growth of the grains. All elements of the reflective layer did not contain any substances specified by the PRTR law. We have developed a new alloy of AlPdSnO having a small grain size. When the new alloy was applied in the BD-type disk media, recording and reproducing properties were improved compared with the conventional aluminum alloy of AlTi.

キーワード : 光メモリ, 反射膜, 低ノイズ, 環境負荷, 表面粗さ, 結晶粒子径

Keywords : optical data storage, reflective layer, low noise, environmental impact, surface roughness, crystal grain size

1. 光メモリシステムの大容量化と媒体ノイズ

近年、光メモリシステムの大容量化が求められており、Blu-ray Disc や HD-DVD のように記録媒体 1 枚あたりの記録容量が 50 ギガバイト (GB) を超える、大容量光メモリシステムの研究開発が行われ、商品化されている。また、環境保護の観点から、光メモリ媒体から環境負荷の高い材料を削減することも重要になってきている。筆者らは、有害性のある多種多様な化学物質が、環境中に排出された量を把握、集計、公表する仕組みである pollutant release and transfer register law (PRTR 法) の対象外となる、環境負荷の低い材料のみで構成した、Blu-ray Disc システムに対応した追記型の光メモリ媒体を報告している⁽¹⁾。

一方、サブテラバイトあるいはテラバイトの記録容量をもつ次世代光メモリシステムの実現を目標として、幾つかの技術候補が研究されている。例えば、ホ

ログラフィックメモリ⁽²⁾⁻⁽⁴⁾、マイクロホログラムメモリ^{(5),(6)}、近接場メモリ⁽⁷⁾、super-resolution near-field structure (Super-RENS)⁽⁸⁾、二光子メモリ⁽⁹⁾⁻⁽¹²⁾、層選択型多層メモリ⁽¹³⁾、などである。これらの技術候補の中で、記録マークを小さくしていくことで大容量化を実現しようとする方法、すなわち、近接場メモリや Super-RENS においては、記録再生光学系の分解能が必然的に上がるため、従来以上に光メモリ媒体のもつノイズ (以下、媒体ノイズと呼ぶ) の影響が大きくなってくると考えられる。したがって、これらの候補技術においては、媒体ノイズをいかに低減していくかも大きな課題となってくる。

これらの観点から、次世代光メモリとして、実用的な光メモリ媒体を実現するためには、媒体ノイズなどの記録再生に影響を与える特性と環境負荷の低減を両立することが、より一層求められてくるであろうと予想される。

2. 低ノイズ化を実現するための材料設計

金 (Au), シリコン (Si), 銀合金, アルミニウム合金は光メモリ媒体の反射膜材料として一般に用いられている。金やシリコンは CD や DVD など, 従来の光メモリシステムにおいて必要十分な光学特性を示す。しかしながら, Blu-ray Disc などの青紫色レーザを光源に用いた光メモリシステムにおいては, 材料自体の吸収が大きくなるため使用することができない。銀合金は青紫色波長帯域で優れた光学特性を示すが, 銀が PRTR 法に該当するため環境負荷の点で十分であるとはいえない。アルミニウム合金は, 低コストであるため, 再生専用光メモリ媒体の反射膜材料などに広く用いられている。クロム (Cr), チタン (Ti), マグネシウム (Mg) やシリコン (Si) など高純度アルミニウムに添加し, 耐食性を高めた合金として用いられることが一般的である。これらのアルミニウム合金は従来の光メモリシステム, 例えば CD, DVD, MiniDisc (MD) などにおいては, 必要十分な特性を示す。しかしながら, より大容量の光メモリシステムにおいては, 媒体ノイズが許容できない水準にまで増大するためノイズレベルを低減する必要がある。

本宮は, 媒体ノイズと光メモリ媒体を構成する基板の表面粗さ, 記録マークの大きさや案内溝形状の変動などの間に強い相関があることを理論解析によって示している^{(14)~(16)}。本宮の検討結果によれば, 反射膜材料を構成する粒子の大きさやばらつきを制御することによって, 媒体ノイズを低減することが可能であると思われる。そこで, アルミニウム合金の結晶粒子を微細化することを試みた。結晶粒子の成長を阻害するような働きをもつ物質を添加することにより, 結晶粒子を微細化することが可能になるはずである。

光メモリ媒体の製造工程においては, スパッタリング法を用いて反射膜を形成することが一般的である。そこで, スパッタリングによる薄膜形成と結晶成長のメカニズムを考慮して, 結晶粒子の成長を阻害するために, 以下の観点から添加物質を選択した。

すなわち,

- ・アルミニウムと結合, 固溶しにくいこと
- ・結晶化速度が速いこと (一般には融点が高いこと)
- ・アルミニウムと比較して原子半径や結合距離の差が大きいこと

とした。

基板表面に薄膜が形成されていく過程では, 初めに小さな結晶粒子が点々と形成され, 成長していく過程を

とると考えられる。上記の基準に従って添加物質を選ぶと, 添加物質の微粒子がでやすくなるため, アルミニウム結晶の外に添加物質の微粒子が析出することで, アルミニウム結晶粒子が結合して大きな結晶へ成長することを抑制する。また, 添加物質がアルミニウム結晶粒子内部に取り込まれた場合は, 結晶格子に歪が蓄積され, 結晶粒子の成長を抑制する。などの効果が期待できる。ただし, 歪の蓄積は薄膜内部の応力の増大をまねくため, 応力とのバランスを考慮することが重要である。さらに, 上記の基準を満たした上で, 環境負荷の低い物質を選択することが必要である。これらの要求を元に, 白金族元素や貴金属元素, さらに PRTR 法に規定された化学物質を含まない酸化物を添加物質として選択し, アルミニウムとの合金を作製し, 光メモリ媒体の反射膜材料としての特性を評価した。

3. 低ノイズ反射膜の試作と評価

3.1 添加物質のスクリーニング

初めに, 結晶粒子の微細化に効果のある物質を見出すため, 添加物質のスクリーニングを行った。まず, 高純度アルミニウムのスパッタリングターゲットを用意し, 候補となる添加物質の小片をスパッタリングターゲット上に貼り付けて (On chip 法) 薄膜作製を行った。評価方法は,

1. 表面粗さ測定
2. 結晶構造解析
3. 膜中元素の結合状態分析
4. 媒体ノイズ評価
5. 薄膜断面の電子顕微鏡観察

などを用いた。また, 薄膜中の元素組成測定および薄膜の厚さ測定は, 蛍光 X 線分析法 (X-ray fluorescence spectrometry) を用いた。ただし, 組成の最適化については, 分析精度に優れる誘導結合プラズマ発光分析法 (inductively coupled plasma atomic emission spectrometry (ICP-AES)) を用いて薄膜中の元素組成を定量した。

第一選択肢として白金族元素であるパラジウム (Pd) を選び, 薄膜試料を作製し, 表面粗さを測定した。良く研磨されたシリコンウェハの小片にアルミニウム合金薄膜を形成し, 厚さは約 100 nm とした。表面粗さの測定は原子間力顕微鏡 (atomic force microscope (AFM)) を用いた。既存のアルミニウム合金である AlTi 薄膜と AlPd 薄膜の表面を観察した結果を図 1 に示す。パラジウムの添加による結晶粒子の微細化効果

は著しく、表面粗さ (Ra) は約 1/3 になる。パラジウムはアルミニウムに固溶しないため⁽¹⁷⁾、アルミニウム結晶の成長を抑制する効果が大いと考えられる。一方、固溶しない元素の導入によって応力の増大が懸念されたため、X線回折法 (X-ray diffractometer) を用いて結晶構造解析を行った。測定対象の薄膜は石英ガラス片上に約 100 nm の厚さに形成し、基板の回折ピークによる妨害を受けないように In-plane 法にて測定を行った。純アルミニウム薄膜およびアルミニウム合金薄膜の X 線回折測定結果を図 2 に示す。Al(111) 面由来の回折波形を観察すると、AlPd 薄膜ではピーク位置が高角度側にシフトすると共に強度も増大する傾向がある。この結果はパラジウムの添加によって、薄膜内部に圧縮応力が発生しているとともに、結晶性が高くなっていることを示している。

応力の増大は、薄膜のひび割れなどの物理的劣化や基板の反りの原因となるため、応力をできる限り抑制することが必要になる。そこで、アルミニウム薄膜内部に微量の酸化物を導入することによって、結晶性を低下させ応力を緩和することを試みた。ただし、酸化物の導入は反射膜特性の劣化を引き起こす可能性があるため、媒体ノイズに注目して酸化物のスクリーニングを行った。媒体ノイズの評価方法を以下に説明する。

初めに Blu-ray Disc に準じた仕様のポリカーボネート樹脂製基板を用意した。基板の表面には深さ 25 nm 溝ピッチ 320 nm の案内溝を形成し、基板の厚さは 1.1 mm とした。案内溝を形成する金型となるニッケル (Ni) 製スタンプは電子線原盤記録装置と反応性イオンエッチングを組合せたプロセス技術⁽¹⁸⁾を用いて作製した。次に、高純度アルミニウムのスパッタリングターゲット

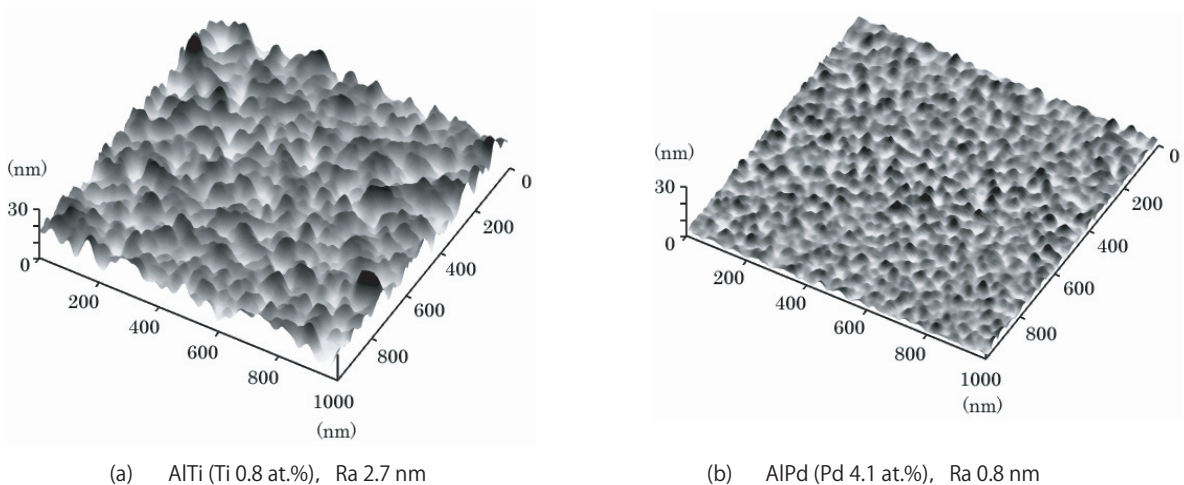


図 1 AlTi 薄膜表面と AlPd 薄膜表面の AFM 観察像

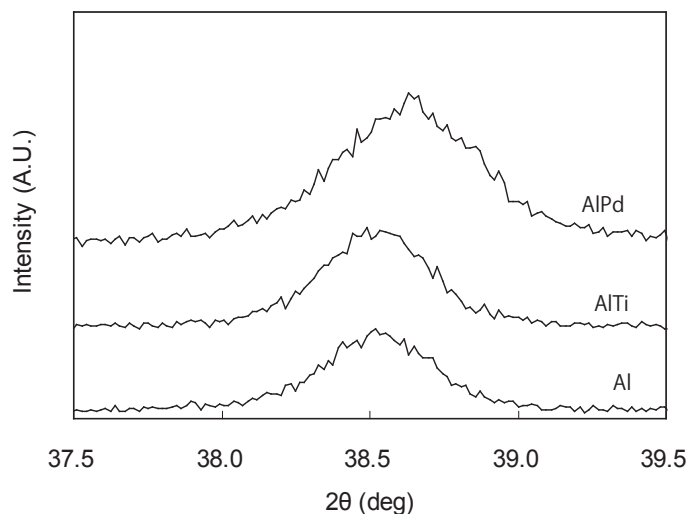


図 2 X 線回折測定結果

を用意し、酸化物のチップをスパッタリングターゲット上に適宜貼り付けた状態でスパッタリングを行い、形成される反射膜の組成を変更した。反射膜の厚さは約 50 nm とした。酸化物の導入量は、薄膜中に含まれる各元素の含有量を蛍光 X 線分析法によって求めた。続いて、ポリカーボネート製樹脂フィルムを紫外線硬化型接着剤により接着し、厚さ 0.1 mm のカバー層を形成した。媒体ノイズの評価装置はパルステック工業社製 DDU-1000 を用いた。その他の実験条件を表 1 に示す。再生線速度は 3.92 m/s とし、スペクトラムアナライザを用いて、媒体ノイズを DC から 20 MHz まで測定し、積分した。なお、添加物質の組成により反射率も変化するため、すべての試料に対して

反射率を測定し、ノイズレベルを反射率で規格化し、比較した。

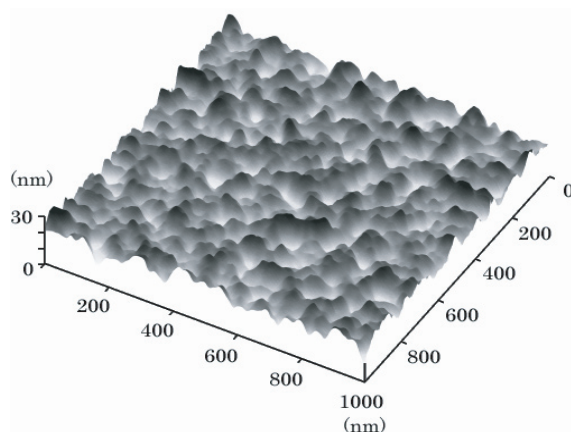
酸化物として、酸化錫 (SnO₂)、酸化チタン (TiO₂ および TiO)、酸化ニオブ (Nb₂O₃ 相当) を選び、これらの酸化物の小片をスパッタリングターゲット上に貼り付け、アルミニウム合金薄膜を形成したディスク試料の媒体ノイズを評価した。表 2 に各添加物質に対する媒体ノイズの測定結果を示す。選択した 4 種類の酸化物の中で、酸化錫がもっとも低い媒体ノイズを示した。また、酸化錫を添加した AlSnO 薄膜表面の AFM 観察像を図 3 に示す。酸化錫を添加した場合の結晶粒子の微細化効果は既存のアルミニウム合金 (AlTi) (図 1(a) を参照) と同等であり劣化は見られなかった。ま

表 1 媒体ノイズ測定および記録再生評価の実験条件

Condition	
Wavelength of LD (nm)	405
Numerical aperture of objective lens	0.85
Recording/reproduction velocity (m/s)	4.92
Trackpitch (nm)	320
Thickness of cover layer (mm)	0.1

表 2 Al に対して酸化物を添加した場合の媒体ノイズ

Additional compound	ratio (at.%)	Noise level (dB)
None (pure Al)	-	- 39.9
SnO ₂	0.4 (as Sn)	- 42.0
TiO	0.6 (as Ti)	- 40.1
TiO ₂	0.4 (as Ti)	- 39.2
Nb ₂ O ₃ (approx.)	0.6 (as Nb)	- 39.9



AlSnO (Sn 0.5 at.%), Ra 2.5 nm

図 3 AlSnO 薄膜表面の AFM 観察像

た、X線回折測定結果を図4に示す。AlSnO薄膜ではAl(111)面由来の回折波形のピークシフトは観察されず、強度が減少する傾向がある。この結果は、酸化錫の添加によって結晶性が下がり、応力の発生を抑制していることを示唆している。

次に、酸化錫の添加に際して、酸素がどのように薄膜中に取り込まれているか確認するため、X線光電子分光法(X-ray photo-spectroscopy)を用いて膜中元素の結合状態を分析した。分析結果を図5に示す。膜中には微量な酸化アルミニウムが存在しており、錫は金属として存在していることが分かる。スパッタリング法ではターゲットからはじき出された元素は、原子レベルに分解されて基板まで到達し、基板上で再構成される。アルミニウムは錫よりも酸化されやすいため、再構成過程で酸化アルミニウムが優先的に生成する。

微量の酸素導入によってアルミニウム薄膜の結晶性は低下し、内部応力も緩和すると考えられる。また、錫は単体ではアルミニウムと固溶せず、容易に化合物を作ることもない⁽¹⁷⁾ため、パラジウムなどと同様に結晶粒子の微細化効果をもつと考えられる。

3.2 組成の最適化と結晶粒子微細化効果の検証

以上の結果から、アルミニウムに酸化錫とパラジウムを加えたスパッタリングターゲットを用いることにより、アルミニウム合金薄膜の結晶粒子を微細化し、同時に応力を抑制することができると考えた。そこで、各々の添加量を変更しながら薄膜の媒体ノイズを評価して組成の最適化を行った。組成の変更は酸化錫およびパラジウムの小片をスパッタリングターゲットに貼り付ける量を変更することで行った。薄膜中の添加物質の含有量はICP-AES法によって定量した。図6に薄

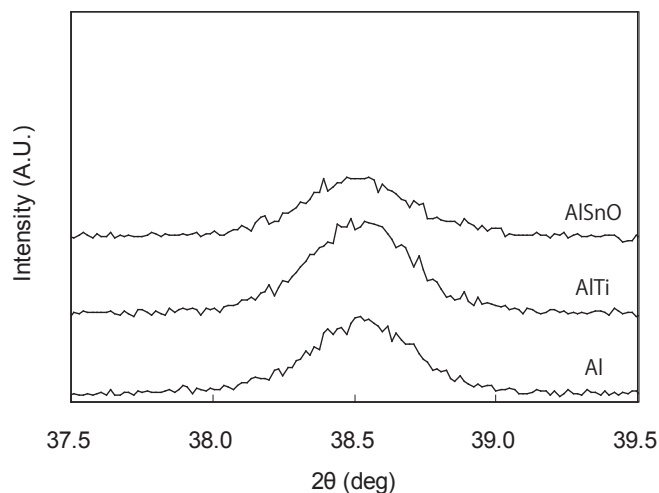


図4 X線回折測定結果

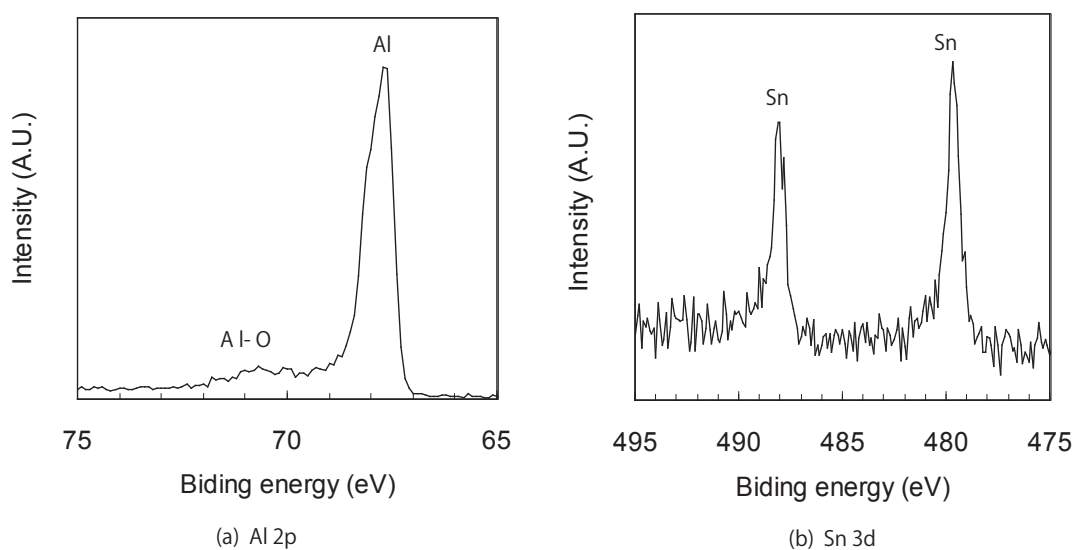


図5 AlSnO薄膜内部の元素の結合状態

膜中の錫の含有量に対する反射率と媒体ノイズの測定結果を示す。錫の含有量が増加すると反射率は低下する傾向があり、錫の最適含有量は約 0.2 at.% であった。次に、組成を最適化したアルミニウム-酸化錫混合ターゲットに対してパラジウムの小片を貼り付ける量を変更し、パラジウム添加量を最適化した。図 7 は薄膜中のパラジウ

ム含有量に対する反射率と媒体ノイズを測定した結果である。錫と同様に、パラジウム含有量が増加すると反射率は低下する傾向があり、パラジウムの最適含有量は約 0.7 at.% であった。また、X 線回折測定結果を図 8 に示す。AlPdSnO 薄膜では、Al(111) 面由来の回折波形のピークシフトは観察されず、応力の発生が抑制されているこ

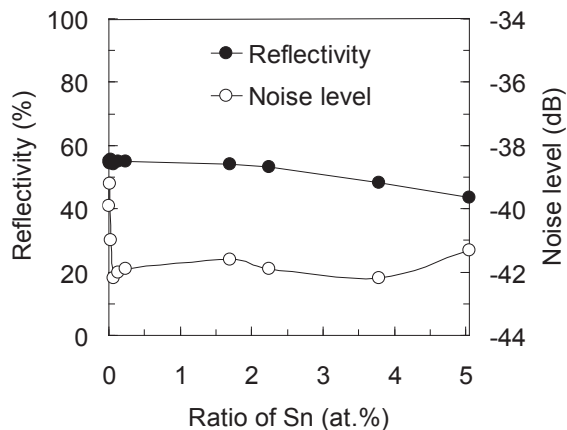


図 6 AlSnO 薄膜の錫 (Sn) 含有量に対する反射率と媒体ノイズ

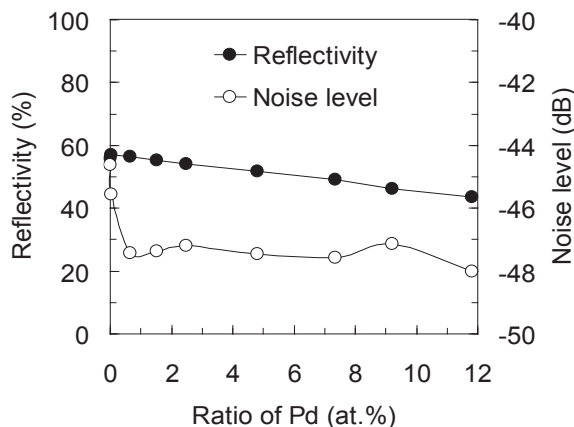


図 7 AlPdSnO 薄膜のパラジウム (Pd) 含有量に対する反射率と媒体ノイズ

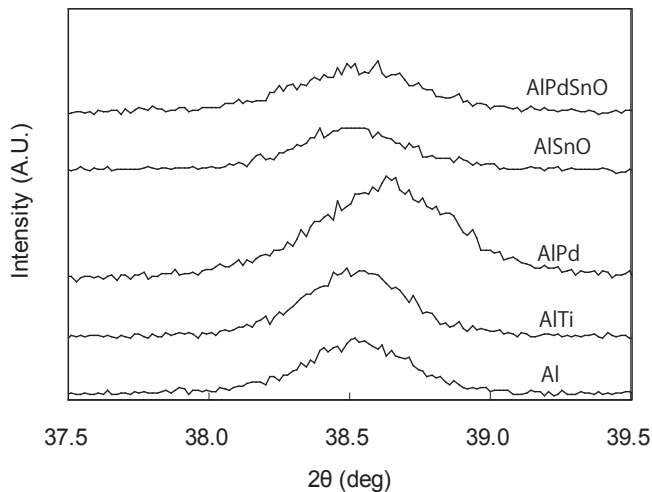


図 8 X 線回折測定結果

とが分かる。

また、パラジウムに替えて白金または金を添加物質とした場合の媒体ノイズを評価した。評価結果を表3に示す。白金や金の場合も媒体ノイズを低下させることが可能であると分かった。特に白金を添加物質とした場合はパラジウムと同等の媒体ノイズを得ることができた。

次に、添加物質による結晶粒子の微細化効果を確認するために、アルミニウム合金薄膜の表面粗さ (Ra) と平均粒子径を測定した。良く研磨されたシリコンウェハの小片にアルミニウム合金薄膜を約 100nm の厚さに形成した。アルミニウム合金薄膜の組成は、0.2 at.% の錫を含む AlSnO, 0.2 at.% の錫と 0.7 at.% のパラジウムを含む AlPdSnO とした。比較対照試料

として、既存のアルミニウム合金である AlTi(Ti0.8 at.%) と粒子径が小さくノイズ特性に優れる銀合金 AgPdCu(Pd1.0 at.%, Cu1.9 at.%) についても同時に測定した。測定には AFM を用いた。実験結果を表4に示す。AlPdSnO 薄膜の表面粗さは AlTi 薄膜の約 1/4 と小さくなっており、AgPdCu 薄膜と同等であった。AlPdSnO 薄膜表面の AFM 観察像を図9に示す。

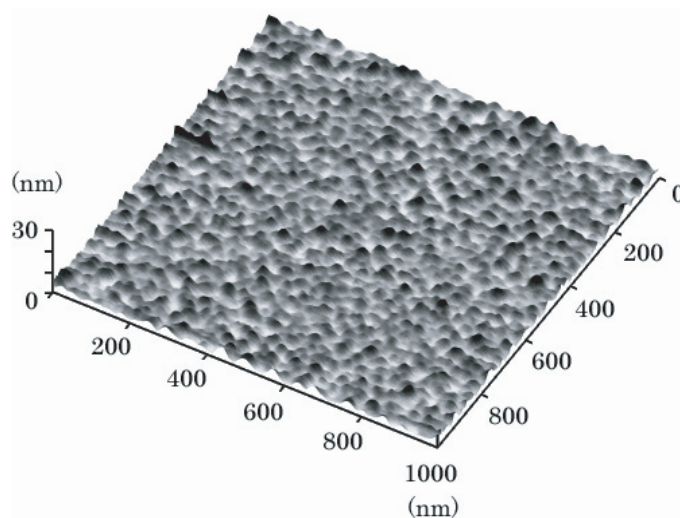
また、シリコンウェハ上に形成した AlPdSnO 薄膜と AlTi 薄膜をイオンリング法を用いて薄くスライスし、薄膜断面を走査型透過電子顕微鏡 (scanning transmission electron microscope) で観察した。断面観察像を図10に示す。結晶が柱状に成長している様子や AlPdSnO 結晶が AlTi 結晶と比較して微細化されていることが分かる。

表3 AlSnO に対して Pd, Pt, Au を添加した場合の媒体ノイズ

Additional element	ratio (at.%)	Noise level (dB)
Pd	0.7	- 47.4
Pt	0.4	- 47.2
Au	1.7	- 46.8

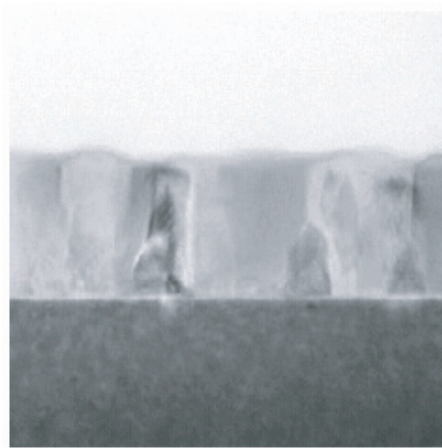
表4 表面粗さと平均粒子径

Alloy	Ra (nm)	Ave. grain size (nm)
AlTi	2.7	104
AlSnO	2.5	124
AlPdSnO	0.7	37
AgPdCu	0.5	46

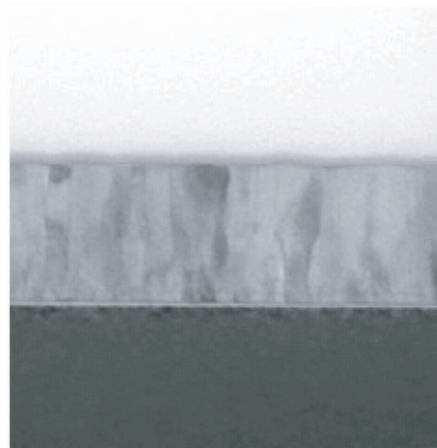


AlPdSnO (Pd 0.7 at.%, Sn 0.2 at.%), Ra 0.7 nm

図9 AlPdSnO 薄膜表面の AFM 観察像



(a) AlTi



(b) AlPdSnO

図 10 AlTi 薄膜と AlPdSnO 薄膜の断面観察像

4. 低ノイズ反射膜を用いた大容量光メモリの記録再生特性

4.1 窒化物系追記型記録媒体

結晶粒子を微細化した効果を確認するために、追記型 Blu-ray Disc 媒体を試作し、記録再生特性を評価した。追記型記録材料としてビスマスーゲルマニウム窒化物 (BiGeN) を用いた⁽¹⁾。

図 11 に試作した追記型ディスクの構成を示す。従来は AgPdCu を反射膜材料として用いていたが、AgPdCu に替えて AlTi と AlPdSnO を用いて比較した。各層ともスパッタリング法を用いて、基板側から順に、反射膜、保護層、記録層、保護層を形成し、次にポリカーボネート樹脂フィルムを紫外線硬化型接着剤によって接着し、カバー層を形成した。各層の厚さは記録特性が良好になるように最適化した。反射膜に AgPdCu を用いた場合は、基板側から順に 100, 10, 12, 24

nm とし、また、反射膜に AlTi あるいは AlPdSnO を用いた場合は基板側から順に 50, 20, 12, 25 nm とした。実験条件を表 1 に示す。記録信号は (1,7) RLL 変調のランダムデジタル信号とし、ビット長が 111.8 nm/bit になるように記録した。このとき直径 12 cm のディスク 1 枚あたりの記録容量は 25 GB である。記録レーザーパルスは 2 値のマルチパルスとした。パルス間は 0.1 mW に固定し、最初のパルス長を 0.656T、その後のマルチパルスを 0.469T とした。ここで T はチャンネルクロック長 (データ転送速度 36 Mbps のとき 15.15 ns) である。記録レーザーパワーはジッタが最良になるように調整した。再生レーザーパワーは 0.35 mW とし、再生信号の SN 比を改善するためにリミットイコライザ⁽¹⁹⁾を用いた。測定結果を表 5 に示す。反射膜材料として AgPdSnO を用いた場合は AgPdCu と同等のジッタが得られることを確認した。

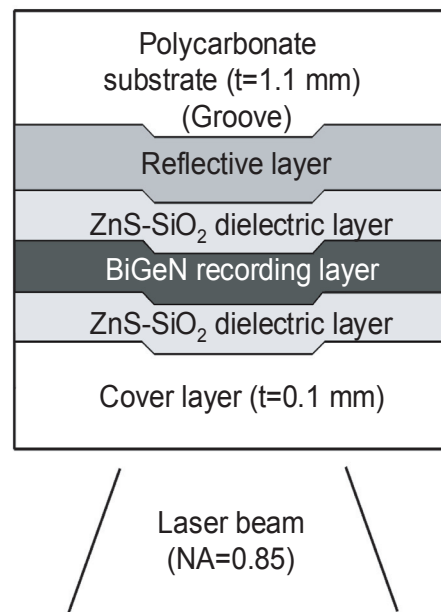


図 11 追記型ディスクの構造

表 5 BiGeN 系追記型ディスクのジッタ

Reflective material	Jitter (%)
AlPdSnO	5.9
AlTi	7.5
AgPdCu	5.9

4.2 再生専用型媒体

次に再生専用型 Blu-ray Disc においても、反射膜の表面粗さの低減が再生特性に影響があるかどうかを調べた。ピット列によって情報を記録したポリカーボ

ネート製の樹脂基板を射出成形法を用いて用意した。最短ピット長は 149 nm, トラックピッチは 320 nm とした。このとき直径 12 cm のディスク 1 枚あたりの記録容量は 25 GB になる。ピット列の上に形成する反射膜材料に AlPdSnO と AlTi を用いて比較を行った。反射膜の厚さは 15 nm とし, カバー層はポリカーボネート樹脂製のフィルムと紫外線硬化型の接着剤を用いて形成した。これらの再生専用型ディスクを再生した結果を表 6 に示す。通常, 再生専用ディスクにおいては, 樹脂基板表面に形成されたピット列の形状ばらつきは, スタンプを作製するマスタリングプロセスや樹脂基板を作製するレプリケーションプロセスによって, ほぼ決定されると考えられるが, AlPdSnO を用いた場合に僅かにジッタが改善されている。この結果は, 再生専用型媒体においても反射膜表面の粗さを少なくすることで媒体ノイズが改善され, ジッタを改善する効果があることを示唆している。

表 6 再生専用型ディスクのジッタ

Reflective material	Jitter (%)
AlPdSnO	5.2
AlTi	5.5

5. まとめ

記録再生特性と環境負荷の両立を目的として新しい反射膜材料の開発を行い, 環境負荷の目安となる PRTR 法の対象にならない物質を用いて, 反射膜を構成する結晶粒子を微細化することにより媒体ノイズを低減した。新規に開発した AlPdSnO 合金は, 従来のアルミニウム合金の欠点であった媒体ノイズが大きく低減されたため, Blu-ray Disc 型の追記型ディスク媒体に用いた場合は, 銀合金 (AgPdCu) と同等の記録再生特性を示し, また, 再生専用型ディスク媒体に適用した場合は, 既存のアルミニウム合金 (AlTi) よりジッタが改善するなど, 記録再生特性と環境負荷を両立する反射膜材料となった。

参考文献

(1)Y. Hosoda, T. Higuchi, N. Shida, T. Imai, T. Iida, K. Kuriyama and F. Yokogawa, "BD-Type Write-Once Disk with Pollutant-Free Material and Starch Substrate", Jpn. J. Appl. Phys., **44**, pp.3587-3590, (2005)
 (2)L. Dhar, A. Hale, H. E. Katz, M. L. Schilling, M. G. Schnoes and F. C. Schilling, "Recording media that exhibit

high dynamic range for digital holographic data storage", Opt. Lett., **24**, pp.487-489, (1999)
 (3)K. Anderson and K. Curtis, "Polytopic multiplexing", Opt. Lett., **29**, pp.1402-1404, (2004)
 (4)H. Horimai, X. Tan and J. Li, "Collinear holography", Appl. Opt., **44**, pp.2575-2579, (2005)
 (5)M. Dubois, X. Shi, C. Erben, K. L. Longley, E. P. Boden and L. Lawrence, "Characterization of microholograms recorded in a thermoplastic medium for three-dimensional optical data storage", Opt. Lett., **30**, pp.1947-1949, (2005)
 (6)R. R. McLeod, A. J. Daiber, M. E. McDonald, T. L. Robertson, T. Slagle, S. L. Sochava and L. Hesselink, "Microholographic multilayer optical disk data storage", Appl. Opt., **44**, pp.3197-3207, (2005)
 (7)M. Shinoda, K. Saito, T. Ishimoto, T. Ito, A. Nakaoki, M. Yamamoto, O. Maeda, T. Hashizu, T. Asano, K. Aga, K. Takagi and M. Tazoe, "High Density Near-Field Optical Disc System", Jpn. J. Appl. Phys., **45**, pp.1321-1324, (2006)
 (8)J. Tominaga, H. Fuji, A. Sato, T. Nakano, T. Fukaya and N. Atoda, "The Near-Field Super-Resolution Properties of an Antimony Thin Film", Jpn. J. Appl. Phys., **37**, L1323-1325, (1998)
 (9)A. Toriumi, S. Kawata and M. Gu, "Reflectionconfocal microscope readout system for three-dimensional photochromic optical data storage", Opt. Lett., **23**, pp.1924-1926, (1998)
 (10)M. Nakano, T. Kooriya, T. Kuragaito, C. Egami, Y. Kawata, M. Tsuchimori and O. Watanabe, "Three-dimensional patterned media for ultrahigh-density optical memory", Appl. Phys. Lett., **85**, pp.176-178, (2004)
 (11)M. S. Akselrod, S. S. Orlov and G. M. Akselrod, "Bit-Wise Volumetric Optical Memory Utilizing Two-Photon Absorption in Aluminum Oxide Medium", Jpn. J. Appl. Phys., **43**, pp.4908-4911, (2004)
 (12)A. N. Shipway, M. Greenwald, N. Jaber, A. M. Litwak and B. Reisman, "A New Medium for Two-Photon Volumetric Data Recording and Playback", Jpn. J. Appl. Phys., **45**, pp.1229-1234, (2006)
 (13)K. Kojima and M. Terao, "Investigation into Recording on Electrochromic Information Layers of Multi-Information-Layer Optical Disk Using Electrical Layer Selection", Jpn. J. Appl. Phys., **43**, pp.7058-7064, (2004)
 (14)Y. Honguh, "Analysis of Retrieval Signal Deterioration Caused by Disk Surface Roughness", Proc. Int. Symp. Optical Memory, Kobe, 1989, Jpn. J. Appl. Phys. **28**, Suppl., 28-3, pp.115-119, (1989)
 (15)Y. Honguh, "Diffraction analysis of optical-disk readout signal deterioration caused by mark-profile fluctuation", Appl. Opt., **33**, pp.857-862, (1994)
 (16)Y. Honguh, "Diffraction analysis of groove noise in

optical disk readout signal" Proc. SPIE 2514, pp.258-266, (1995)

(17)S. Yamamoto, "New theory of aluminum alloys by chemical bond and reaction", J. Jpn. Inst. Light Materials, 56-2, pp.128-135, (2006) (Japanese)

(18)M. Katsumura, H. Nishiwaki, T. Mitsuhashi, M. Okano, T. Iida, A. Kouchiyama and H. Inoue, "High-Density Groove Mastering Using an Electron Beam Recorder and Plasma Etching Process", Jpn. J. Appl. Phys., 41, pp.1698-1703, (2002)

(19)S. Miyanabe, H. Kuribayashi and K. Yamamoto, "New Equalizer to Improve Signal-to-Noise Ratio", Jpn. J. Appl. Phys., 38, pp.1715-1719, (1999)

筆者紹介

樋口 隆信 (ひぐち たかのぶ)

技術開発本部 総合研究所 デバイス研究センター 次世代メモリ技術研究部。相変化型光ディスクの研究開発、高密度マスタリングプロセス技術の研究開発、ブルーレーザ対応追記型・再生専用型光ディスクの研究開発を経て、現在次世代光メモリの研究開発に従事。

細田 康雄 (ほそだ やすお)

技術開発本部 総合研究所 デバイス研究センター 次世代メモリ技術研究部。ブルーレーザ対応追記型光ディスクの研究開発を経て、現在電子線を用いた微細加工に関するプロセスの研究開発に従事。