

ZnO 超解像技術を用いた大容量次世代 Blu-ray Disc

High Density Next-Generation Blu-ray Disc System Using ZnO Super Resolution

高森 信之*¹
Nobuyuki Takamori

山本 真樹*¹
Masaki Yamamoto

森 豪*¹
Goh Mori

田島 秀春*¹
Hideharu Tajima

高橋 明*²
Akira Takahashi

要 旨

次世代録再光ディスクシステムの分野で注目を集めているブルーレイディスク(Blu-ray Disc)をさらに大容量化する技術として、ZnOを用いた超解像ディスク技術を開発した。透明半導体として知られているZnOの光学定数が温度により可逆的に変化することを利用してレーザスポット内にマスクを形成させ、レーザスポットの回折限界以下の微小な記録マークを超解像効果により読み取ることに成功した。これらの特性をブルーレイディスク光学系に適用することにより、高い再生安定性を確保した上で、第1世代ブルーレイディスクの2倍以上の線密度を得る目途を得たので報告する。

We have developed a super resolution optical disc technology by using a zinc-oxide (ZnO) thin film as a high density optical disc system especially suitable for the next-generation Blu-ray Disc system. Applying the thermal change in the reversible optical constant of ZnO, a well known transparent semiconductor material, we can successfully achieve the super-resolution effects which can readout the small mark beyond the optical diffraction limit. In this paper, we describe the super resolution function which has approximately two times higher linear bit density than conventional one and high readout stability of the Blu-ray Disc with a ZnO thin film.

まえがき

光ディスクの分野においては、光学的解像限界を越えた高い記録密度を得るために、いくつかの超解像技術が提案されてきた。これまでに、実用的な超解像光ディスクシステムとしては、光磁気記録の分野で、磁氣的超解像 (MSR) 法が、良く知られている。しかしながら、この方式では光磁気記録領域のみしか超解像効果が得られないため、ROM 領域では記録密度を向上させることができなかった。

光ディスクの最大の特徴であるマスディストリビューションメディアの観点において、再生専用型 (ROM) ディスクは、非常に重要である。従来、ROM ディスクに適用できる超解像技術は、いくつか研究されてきたが、実用性のある再生安定性の高い超解像技術は得られていない^{1) 2)}。

我々は、酸化亜鉛 (ZnO) の薄膜を反射率制御膜として用いることによって再生安定性の高い超解像 ROM 光ディスクを開発したことを報告してきた^{3) ~ 10)}。

今回、本超解像技術の原理および方向性を検討したので報告する。

1. ZnO ディスクの超解像特性

1.1 ディスク構造

ディスク測定は、2つのタイプの青色レーザドライブテストを用いて行った。

1つは、波長408nmの青色レーザ及び対物レンズ開口度 (NA=0.65) で、光学的回折限界は $0.16 \mu\text{m}$ である。もう一方は、“Blu-ray Disc (BD)” と呼ばれている光学ピックアップシステムで、波長407nmの青色レーザ及び0.85-NAで、その光学的解像限界は $0.12 \mu\text{m}$ である。

図1 (a) は、0.65-NA 光学系でのサンプルディスクの断面図を示す。ポリカーボネート基板上にAl反射膜、ZnO反射率制御膜をディスクプロセスでよく使われるRFマグネトロンスパッタ法にて形成した。ディスク測定には、光学収差を最小にするため0.5mm

*¹ 技術本部 デバイス技術研究所 第3研究室

*² 技術本部 デバイス技術研究所

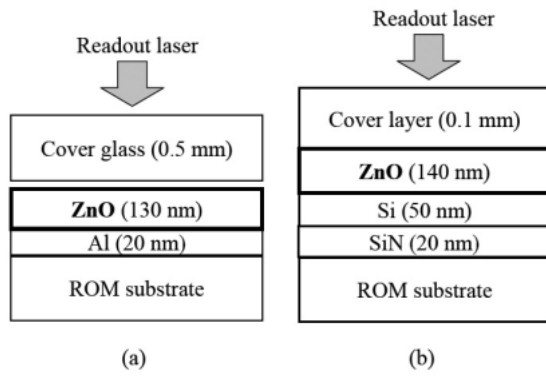


図1 サンプルディスクの基本的な構造
(a) 0.65-NA 光学系用ディスク構造, (b) 0.85-NA 光学系用ディスク構造

Fig. 1 Basic structure of sample disc: (a) was prepared for a 0.65-N.A. optical pickup system and (b) was prepared for a 0.85-N.A. one.

厚カバーガラスを用いた。ZnO超解像効果を確認するための参照用ディスクの構造は、ポリカーボネート基板／Al 反射膜（20nm）である。

図1 (b) は、BD 光学系におけるサンプルディスクの断面構造を示す。ポリカーボネート基板上に SiN, Si, 及び ZnO 膜を形成し、カバー層は、UV 樹脂のスピンコーティングによって形成した。比較用参照ディスクの構造は、ポリカーボネート基板／Al (20nm) /カバー層 (0.1mm) とした。

1・2 静特性

図2 は、ガラス基板に形成した ZnO 膜 (200nm) の光学定数の温度依存性を示す。測定波長は、青色光学ピックアップと同様に、408nm に設定した。図2 に示したように、屈折率および消滅係数それぞれの光学定数は温度により変化し、その変化は可逆的であることを確認した。我々は、この ZnO 薄膜の光学特性の可逆的な変化を反射率制御膜として用い光ディスクの超解像効果に応用した。この ZnO 膜超解像光ディスクには、2つのメリットがある。1つは、製作し易いことである。ZnO 膜材料は、一般的に入手しやすく、安価で、成膜方法も通常の RF マグネトロンスパッタリング法で十分な成膜速度で形成でき、従来の光ディスク製造工程をそのまま使用できる点が挙げられる。もう1つは、ZnO が環境に優しいことである。ROM ディスクは、大量複製大量生産されるため、消費されたあとの廃棄問題を考えると、ROM ディスクは、環境に優しい材料で構成されなければならない。

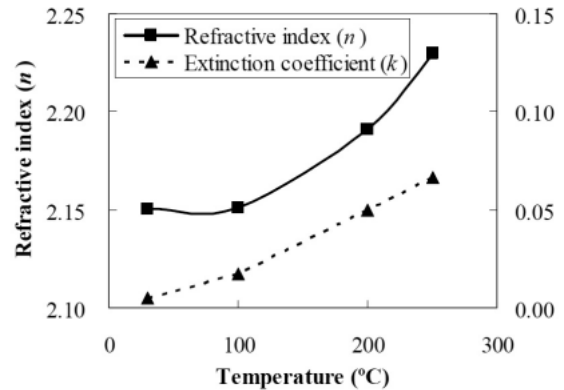


図2 ZnO 膜の 408nm の波長での光学定数温度依存性
Fig. 2 Optical constants dependence on temperature at a wavelength of 408nm for a ZnO film.

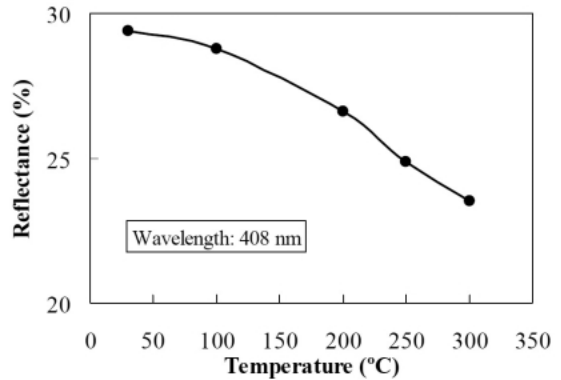


図3 反射率の温度依存性 (ZnO 130nm / Al 20nm / ガラス基板)
Fig. 3 Reflectance dependence on temperature for ZnO/Al/ Glass.

図3 に、ガラス上に成膜した ZnO (130nm) / Al (20nm) 積層膜 (図1 (a) のディスク構造に対応) の反射率の温度依存性測定結果を示す。ZnO 薄膜の厚さを調整し、光学干渉を利用することによってこの温度変化が得られた。図3 に示すように、反射率は、温度上昇と共に減少した。この変化もまた可逆性のあることを確認した。

図4 は、図1 (a) のディスク構造の場合の超解像度読出しメカニズムの概略原理図である。レーザー照射によって、ZnO 膜及び Al 膜は、加熱され、温度プロファイルは、ガウシアン分布に近い形状であると考えられる。しかし、ディスクは回転しているため、高温部分の中心は、ビーム中心部の光強度の高いエリアと異なり、ずれを生じている。このサンプルディスクにおいて、高温領域の反射率は低く、低温領域の反射率は高くなっている。従って、低温領域は、効果的な読み出し開口部として機能し、高温領域は、マスクとして機能する。その結果、実効的な読み出しスポットサ

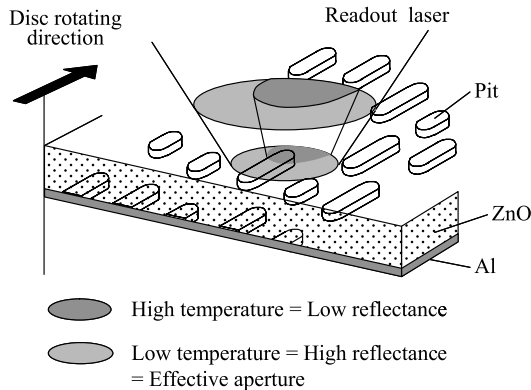


図4 超解像再生原理の概念図

Fig. 4 Schematic diagram of the principle of super resolution readout.

イズは小さく絞られたことになる。これらの効果により、光ピックアップの光学的解像限界より小さいピットサイズのものを読み出し可能となっていると考えられる。

1・3 動特性

まず、NA=0.65の光学系におけるZnOディスクの超解像効果を確認した。

図5は、図1(a)で示したZnOディスクとリファレンスディスク（通常ROMディスク同様Al反射膜のみ形成）における波長408nm、0.65-NA光学系で測定したCNR（信号対雑音比）のピット長依存性を比較して示す。

図5は、Al反射膜のみの通常ROMディスクにZnO膜を付加しただけで、超解像効果が得られることから、ZnO膜が超解像特性に密接に関与していることを示している。リファレンスディスクでは、光学系の回折限界である $0.16\mu\text{m}$ でCNRがゼロとなっているが、ZnOディスクでは回折限界以下の $0.14\mu\text{m}$ でもCNR

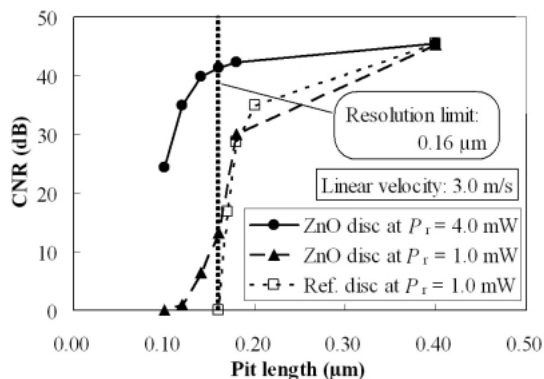


図5 ZnOディスクのCNRピット長依存性

Fig. 5 CNR dependences on pit length for ZnO disc and Al reference disc.

は40dBも得られている。また、その時の再生レーザーパワーは、4.0mWで、再生パワーが1.0mWと低いときはCNRは、ほとんどゼロとなった。CNRのしきい値を40dBとしたとき、もしくはCNRがゼロになるときの最小ピットサイズを比較すると、約2倍の記録密度が得られたことになる。

ROMディスクの実用的な使用を考えると、高い再生パワー感度と高い繰り返し再生安定性が要求される。これらの特性を改善し、両立させるために、我々はZnOディスクにSi膜を付加させることを検討した。これらの評価には、波長405nm、0.65-NAの光学系を用いた。改善ディスクの構造は、カバーガラス0.5mm / ZnO 150nm / Si 100nm / Al 20nm / ROM基板で、ここでは、ZnO / Siディスクと呼ぶ。Si膜を含まない通常のZnO膜のディスクはZnOディスクと呼ぶ。ZnO / Siディスクでは、回折限界以下の $0.14\mu\text{m}$ においてCNRが40dB得られる再生レーザーパワーが3.0mWと、ZnOディスクと比較して1.0mWも下回ることができ、再生パワー感度が改善されることがわかった。感度改善の理由としては、Si膜が光吸収層として働いていることによるものと思われる。ZnO / Siディスクでは、入射レーザービームを効率よく吸収し、ZnO膜に熱を伝えており、そのことにより、Siを含まないZnOディスクに比べてより低い再生レーザーパワーでZnO膜が動作温度に到達することにより、再生パワー感度が向上したものと考えられる。

図6に、ZnO / Siディスクの繰り返し再生安定性試験の結果を示す。この測定において、再生レーザーパワー3.0mWを連続的に照射し、 $0.14\mu\text{m}$ の連続ピット列信号を再生したCNRの値で評価した。比較用として用いたZnOディスクは、同様のCNRが得られる4.0mWの再生パワーで測定した。ZnO / Siディスクの再生安定性は、ZnOディスクより向上し、約 $1.0\times$

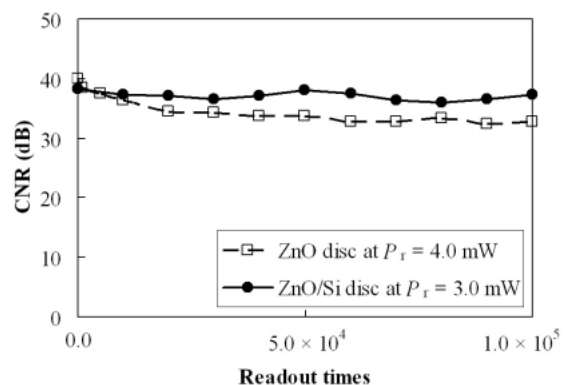


図6 ZnOディスクとZnO / Siディスクの再生安定性
Fig. 6 Readout stability for ZnO disc and ZnO/Si disc.

10⁵回の再生回数で38dBのCNRを保持していた。一方、ZnOディスクにおいては、わずかにCNRの低下が見られた。ZnOディスクでのCNR低下の原因としては、**図2**及び**図3**からも明らかなように繰り返しの熱履歴に対してZnOは非常に熱的に安定であることがわかっており、ZnO自体の劣化ではないと考えられる。十分な確証は得られていないが、おそらく基板の熱変形が起因しているのではないかとと思われる。Si膜を付加することで、より高い再生パワー感度と高い繰り返し再生安定性が得られることがわかった。

1・4 Blu-ray Disc構成ディスクでの超解像特性

ブルーレイディスクの光学のピックアップシステムを用いてのZnO超解像ROMディスクを検討した。

図7に、**図1(b)**(0.85-NA光学系用ディスク構成)の構造におけるZnOディスク(以後、0.85-NA ZnOディスクと呼ぶ)とリファレンスディスクのCNR空間分解能特性を示す。再生パワー感度を向上させるために、Al膜の代わりにSiN膜を断熱層として使った。その理由は、SiNの熱伝導率がAlより低いことを利用し、Siから生成された熱が更に効率よくZnO膜にされ、低い再生レーザーパワーでZnO膜の温度が上昇するように設計したからである。

図7からBD光学系により測定した0.85-NA ZnOディスクにおいても超解像特性が得られることがわかった。再生光ビームの解像限界(0.12 μm)より小さなピットサイズである0.10 μmピットではAl膜リファレンスディスクでは、CNRはほぼゼロであったが、0.85-NA ZnOディスクの高再生パワー(3.0mW)では、30dB以上のCNRが得られ、解像限界も0.06 μmと約2倍の記録密度のものを再生できることがわかった。これは、現在BD光学系で再生されたものの

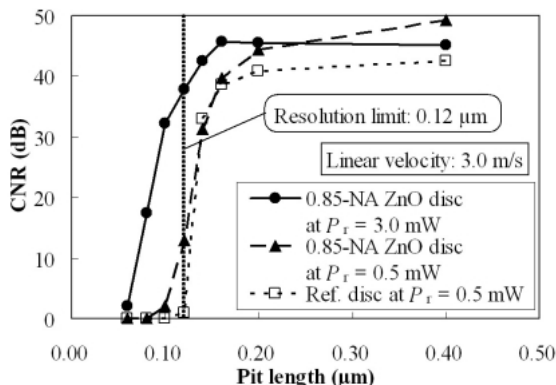


図7 ブルーレイディスク構成超解像ディスクのCNRピット長依存性
Fig. 7 CNR dependence on pit length in BD pick-up system.

中で世界最高の密度が得られたこととなる。

2. 原理検証

このZnO膜を用いた超解像現象の原理解明のために、ZnO膜のバンドギャップに相当する波長付近で光学定数に変化することに注目した。

図8および**図9**に光学定数スペクトルの30℃と200℃での温度変化の様子を示す。それによると、波長405nm付近の青色レーザー波長では、光学定数の温度変化が大きくなっているが、赤色レーザー波長(650nm)では、光学定数の温度変化はほとんど起こっていないことがわかる。この理由としては、ZnOの半導体物性が起因しているものと思われる。すなわち、ZnOは透明半導体であり、室温でのバンドギャップは3.3eV程度であり、波長に換算すると376nm付近となる。温度が200℃に上昇するとバンドギャップは約3.1eV程度、波長にして390nm付近となることにより、青色レーザー波長(405nm)付近でのみ光学定数の温度変化が起こることになる。

これらを実証するために、ZnOディスクを赤色レーザー(波長650nm)と青色レーザー(波長408nm)の光学

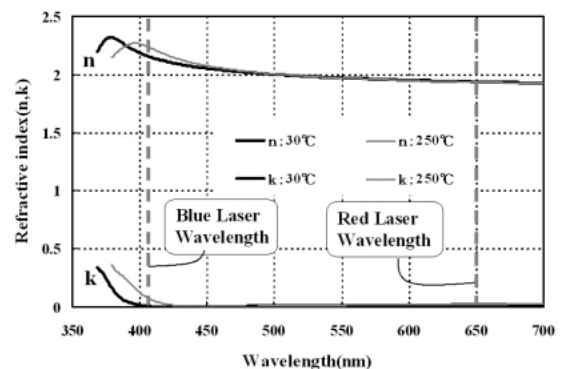


図8 ZnOの光学定数スペクトルの温度変化
Fig. 8 Optical constants spectrum of ZnO film.

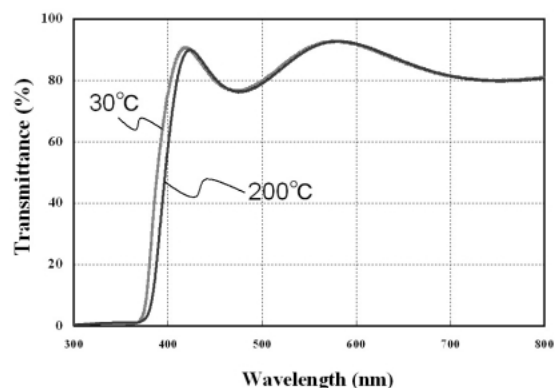


図9 ZnOの透過率スペクトルの温度変化
Fig. 9 Spectral transmittance of ZnO film.

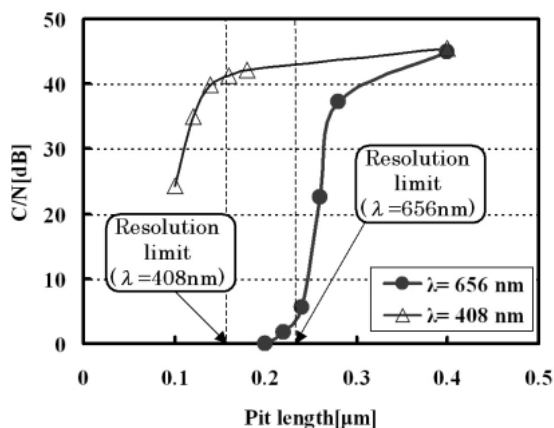


図 10 赤色レーザと青色レーザ光学系での ZnO ディスクの超解像効果の比較

Fig. 10 Super resolution effects of ZnO disc using blue and red optics.

系でそれぞれ測定し、超解像効果の比較を行った。

結果を図 10 に示す。青色レーザでは、図 5 にも示したように、光学系の回折限界以下のサイズのピット長で CNR が得られており、約 2 倍の記録線密度が再生できていることがわかる。一方、赤色レーザ光学系では、回折限界で CNR がほぼゼロになっており、超解像特性をまったく示さないことがわかる。従って、この超解像現象の起源は基本的には、温度によるバンドギャップの可逆的な変化によるものと考えられる。このことは、青色レーザ波長 (408nm) 付近で特にバンドギャップの温度変化による光学定数の変化量が大きくなっており、赤色レーザ波長では光学定数が変化していないこととよく一致している。

さらに、バンドギャップの異なる透明半導体材料を用いて、超解像効果の確認実験を行った。

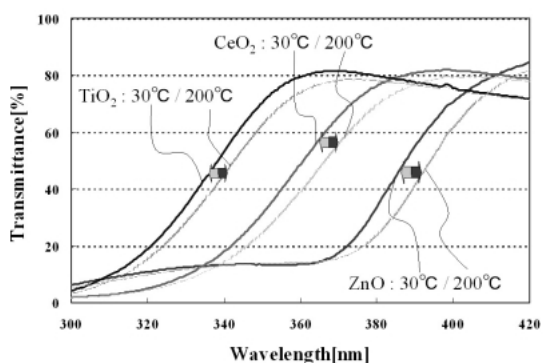


図 11 ZnO, CeO₂, TiO₂ 薄膜の透過率スペクトル温度依存性
Fig. 11 Spectral transmittance of ZnO, CeO₂, TiO₂ film on temperature.

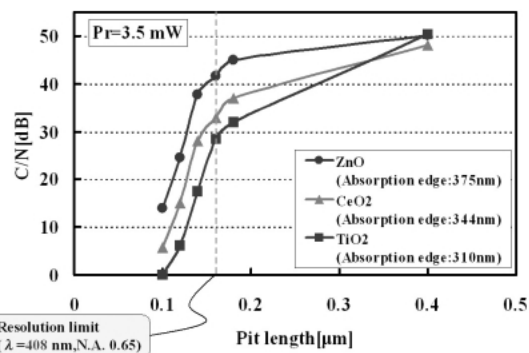


図 12 ZnO, CeO₂, TiO₂ ディスクの超解像特性比較
Fig. 12 Super resolution effects of ZnO, CeO₂, TiO₂ discs.

実験には、ZnO (室温バンドギャップ 3.3eV ; 375nm), CeO₂ (室温バンドギャップ 3.6eV ; 344nm), TiO₂ (室温バンドギャップ 4.0eV ; 310nm) の 3 種類の透明半導体材料を用いた。図 11 に各薄膜の透過率スペクトルの温度依存性を示す。これらのスペクトルから、各薄膜の吸収端波長および温度による吸収端波長の変化量がわかる。青色レーザ波長である 408nm 付近での透過率変化量は、吸収端波長位置が最も青色レーザに近い ZnO 薄膜で最も大きくなることがわかった。

これらの薄膜を Al 反射膜上に形成した ROM ディスクを作製し、青色レーザ光学系で超解像特性を比較測定した結果を図 12 に示す。この結果より、やはり吸収端波長位置が再生光波長に近い ZnO ディスクで最も大きな超解像特性が得られることがわかった。図 11, 図 12 の結果より、透明半導体膜の光学的吸収端位置が再生レーザ光波長を超えない範囲でかつ再生波長に近いほど透過率の温度変化が大きくなり、より大きな超解像効果が得られることがわかった。

むすび

我々は、ZnO 膜を用いることによって高い繰り返し再生安定性と超解像特性を両立する ROM 光ディスクを開発した。超解像現象の原理となる熱により、ZnO 膜の光学定数が可逆的に変化が起ることを確認した。この新しい ZnO 超解像 ROM 光ディスクは、青色レーザ光学系 (波長 408nm レーザ及び 0.65-NA 対物レンズ) において約 2 倍の高い線密度を示した。光学的解像度限界 0.16 μm より小さい 0.14 μm ピット長さで、CNR は約 40 dB で 1.0×10^5 回の高い再生安定性が得られた。さらに、BD 光学系 (波長 407nm レーザ及び 0.85-NA 対物レンズ) においても超解像特性が確

認され、CNRは、解像度限界 $0.12\ \mu\text{m}$ より小さな $0.10\ \mu\text{m}$ ピット長において、33dBが得られた。このことは、ブルーレイディスクの容量が単層で現状25GBであるが、倍容量の50GB得られる可能性があることを示している。

さらに、ZnO薄膜の光学的吸収端波長位置が超解像特性と密接に関係しており、青色レーザー波長より短くかつそれに近い吸収端波長をもつ薄膜が超解像膜に適していることが、これらの検討結果から明らかになった。即ち、ZnO薄膜を用いた超解像現象の原理が透明半導体薄膜の光学的バンドギャップの温度変化に起因していることを示唆するものと思われる。

謝辞

本研究の推進に多大なご協力を頂きました関係各位に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) T. Kikukawa et al., "High-Density Read-Only Memory Disc with Super Resolution Reflective Layer", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 40, pp. 1624-1628 (2001).
- 2) M. Hatakeyama et al., "Practical Properties of Thermochromically Induced Super-Resolution Read-Only Memory Disc (TSR-ROM)", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 41, pp. 1905-1906 (2002).
- 3) 高森他, "反射率制御膜を用いた超解像光ディスク(I)", 第64回秋季応用物理学学会学術講演会講演予稿集, No.3, p.1054 (2003).
- 4) 森他, "反射率制御膜を用いた超解像光ディスク(II)", 第64回秋季応用物理学学会学術講演会講演予稿集, No.3, p.1054 (2003).
- 5) M. Yamamoto et al., "Super Resolution Optical Disc with Reflectance Control Thin Film", International Symposium on Optical Memory 2003 Technical Digest, pp. 144-145 (2003).
- 6) G. Mori et al., "High Density ROM Disc Using ZnO Super Resolution Film with High Readout Stability", Technical Digest of Optical Data Storage 2004, pp. 276-278 (2004).
- 7) M. Yamamoto et al., "Super-Resolution Optical Disc with High Readout Stability Using a Zinc Oxide Thin Film", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 43, No. 7B, pp. 4959-4963 (2004).
- 8) 田島他, "反射率制御膜を用いた超解像光ディスク(III)", 第64回春季応用物理学学会学術講演会講演予稿集, No.3, p.1282 (2004).
- 9) 田島他, "反射率制御膜を用いた超解像光ディスク(IV)", 第64回秋季応用物理学学会学術講演会講演予稿集, No.3, p.1035 (2004).
- 10) N. Takamori et al., "Energy Gap Induced Super Resolution (EG-SR) Optical Disc using ZnO Thin Film", International Symposium on Optical Memory 2004 Technical Digest, pp. 142-143 (2004).

(2004年9月24日受理)