

超解像光ディスク技術の最近の進展

中 井 賢 也

Technology Progress of Super Resolution Optical Disk

Kenya NAKAI

Super-resolution optical disk technology enables to read or write information recording marks which length is shorter than resolution limit by introducing a stack of thin films possessing an optically nonlinear property in its optical disk media, and is one of promising candidates of large capacity optical memory technologies for a post-Blu-ray Disc (BD) system. Here, as one of recent progress topics, an experimental demonstration of a successful and seamless playback of a high-definition video content from a super-resolution near-field structure (super-RENS) read-only-memory (ROM) disk with 50 Gbyte data capacity per layer using In-Sb thin film is described. Moreover, a study to keep a wide disk-tilt margin approximately same to that of BD system and a preliminary study to achieve super-resolution readout at high data transfer rate at relatively low disk rotating speed, and other technologies to enlarge recording capacity are introduced.

Key words: high density recording optical disk, super resolution, Super-RENS, resolution limit, InSb, playback system

光で微小な記録マークを読み出す場合の解像限界は、光の波長が λ 、集光レンズの開口数 (numerical aperture) が NA であるとき、以下の式で与えられる。

$$\text{解像限界} \cong \frac{\lambda}{4 NA}$$

この解像限界が存在するために、従来の光ディスクシステムでは、これよりも小さいサイズの記録マークを検出することは不可能となる。この解像限界を超える再生技術が、超解像技術である。光ディスク媒体に設けられた薄膜構造によって、この解像限界以下の微小な記録マークの読み出しを可能とする。

従来の BD (Blu-ray Disc), DVD (digital versatile disk), CD (compact disk) の光ディスクでは、光源となる半導体レーザーの赤外 ($\lambda=780$ nm) から紫外領域 ($\lambda=405$ nm) への短波長化と、集光レンズの高 NA 化を実現することで高密度化を行ってきたが、さらなる半導体レーザーの短波長化は現時点では見込めず、また対物レンズの高 NA 化もレンズのワーキングディスタンス不足から、光ディスク媒

体との衝突問題など実用上の課題が残る状況にある。こうしたなか、超解像方式は、従来の DVD や BD の半導体レーザーと対物レンズを用いてさらに解像力を高くできる利点から、BD に続く大容量化技術のひとつとして注目されている。

Super-RENS (super resolution near-field structure) とよばれる超解像方式は、その代表的なものである。Super-RENS は、1998 年に旧産業技術融合領域研究所 (現在の独立行政法人産業技術総合研究所 (以下、産総研) の旧近接場光応用工学研究センター) にて発案された技術¹⁾ であり、以来、国内外の多くの企業や研究機関で超解像効果の向上や再生原理に踏み込んだ研究が数多く行われてきた。

Super-RENS は、図 1 に示すような保護層 / 超解像機能層 / 保護層を基本とした 3 層構造を介して微小な記録マークを読み出す構造をなす。超解像機能層が照射レーザー光の強度に対して非線形な光学特性 (屈折率 n と消光係数 k の変化) を有することから、読み出し (再生) 光スポット内のレーザー光強度が大きい領域に開口ができ、そこに励

三菱電機(株)先端技術総合研究所 (〒617-8550 長岡京市馬場岡所 1 番地) Nakai.Kenya@dy.MitsubishiElectric.co.jp

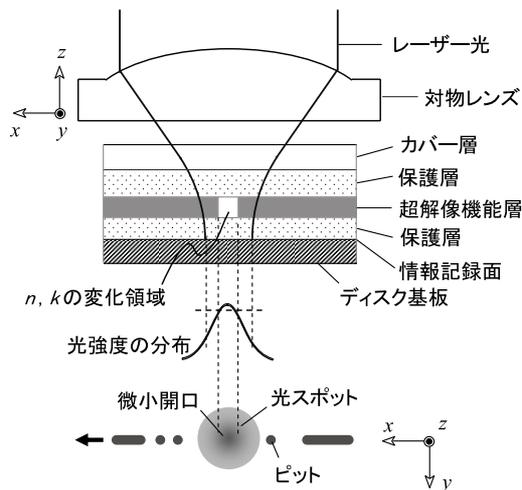


図1 超解像再生機構の概略図。

起される局在光（近接場光）を利用して再生分解能を高めるものである²⁾。超解像機能層にはSbやTeを含有する材料がおもに用いられ、従来からDVDなどの記録メディアの記録膜材料としてよく知られるAgInSbTeやGeSbTeなどの相変化材料はその代表例である。上記の超解像3層構造に加え、記録層として貴金属酸化物AgO_xまたはPtO_xの層を追加した記録型Super-RENSディスクが開発され^{3,4)}、AgInSbTeやGeSbTeは記録膜としてではなくそれ自身が超解像機能材料として機能することが示されている²⁾。

上記で述べた非線形な光学特性、すなわち超解像再生過程での超解像機能層の屈折率 n と消光係数 k の急激な変化は相変化材料の相転移に起因し、その際、固相—液相（一次相転移）または固相—固相（二次相転移）の相転移現象が起こるとされる^{5,6)}。とりわけGe₂Sb₂Te₅材料には、融解なしに構造変化に伴うFlip-Flop型の相転移モードが存在し、その際に n, k が大きく変化するという原理が提案されており⁶⁾、Super-RENSディスクでの超解像効果の起源という報告もある^{5,6)}。また一方で、AgInSbTe材料の融解またはサーモフレクタンズ現象による反射率変化がその起源であるとの報告もある⁷⁾。いずれの起源を想定した場合も、材料の屈折率 n と消光係数 k が照射光のパワーに依存して大きな変化が発生したことによって、超解像層を通して集光スポット径内に局所的な読み出し光が生じ、再生スポットの回折限界を超えた記録マークの再生が可能となる。

Super-RENSが火付け役となり、超解像効果を有するさまざまな材料について研究が進んだ。昨今では再生専用型のROM (read-only memory) メディアの研究事例が多く、照射光の吸収熱によるバンドギャップの変化が起源とされ

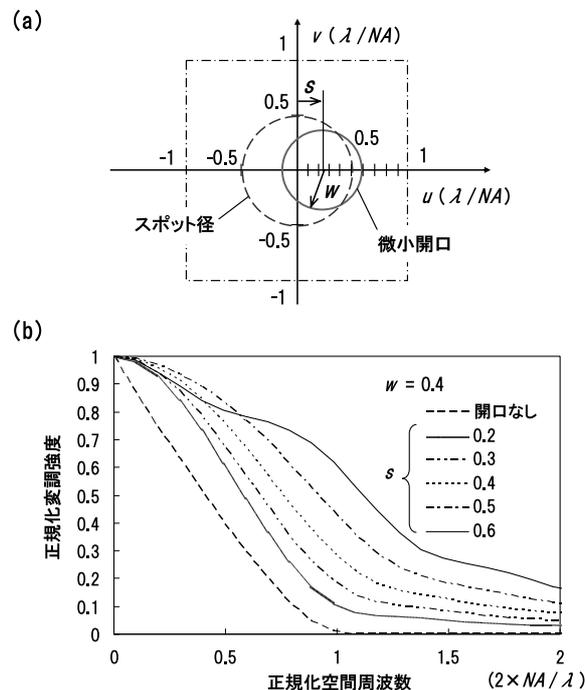


図2 微小開口モデルの再生光学応答MTF特性。(a) 開口モデル、(b) 微小開口による再生光学応答 MTF 特性。

るZnO⁸⁾や、照射光の吸収による体積変化が起源とされる有機色素C₃₂H₁₈N₈⁹⁾、また半導体中のキャリア密度の変化が起源とされるInSb¹⁰⁾などが報告された。これらのROMディスクでは、当初CNR (carrier to noise ratio; 搬送波対雑音比) は40 dB以上が確認されていたものの、実際のランダムデータの再生性能は10⁻³オーダーと十分ではなかったが¹¹⁾、2009年に三菱電機・産総研・フランス原子力庁研究所(フランスCEA-Leti)・韓国サムスン電子の共同研究グループは、BDの2倍の記録容量に相当する単層50 GB (ギガバイト) のSuper-RENS-ROMディスクから高精細(ハイビジョン)映像コンテンツをリアルタイムに再生できることをはじめて実証し、次世代向け映像記録メディアとしての実現可能性を高めた¹²⁾。

本稿は、筆者らが開発した単層50 GB ROMディスクと、BDと同様の光学系(波長405 nmとNA 0.85)を用いた超解像光ディスク映像再生システムとその映像再生実験を中心とした最近の技術進展、ならびにさらなる飛躍が期待される超解像再生技術について述べる。

1. 開口による超解像効果

図2は、開口による再生光学応答MTF (modulation transfer function) 特性である。例えば、一次相転移による超解像効果はこのモデルに近い。よって、第三代とよばれるSuper-RENS⁶⁾のように、近接場光の増強効果などが伴うとされる場合は、ここでは除外して考える。図2

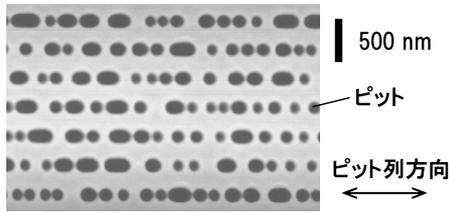


図3 開発した単層 50 GB 超解像ディスクの ROM 基板の AFM 画像。

(a) のような再生光スポット内の円形開口を仮定した部分コヒーレント伝達関数 (PCTF: partially coherent transfer function) から算出される¹³⁾。ここで、 w は微小開口の半径、 s は微小円形開口のスポット中心からのシフト (スポット径 λ/NA で正規化) である。 w を 0.4 に固定したときのシフト s に対する特性変化を示している。 s が大きくなる (開口位置が集光スポットの中心からずれる) ほど、高い空間周波数まで再生解像度が得られる。これは、開口がシフトしていると実効的な読み出しスポットの片側が急峻なプロファイルになるためと考えられる。

2. 単層 50 GB-ROM ディスクの開発と再生信号

筆者らは、超解像ディスクの再生性能改善とこれを用いた映像再生システムの構築を目指し、Super-RENS-ROM ディスクの開発を行った。ROM ディスクに記録されるデータピット長を従来の BD ディスクに対して半分とし、記録線密度 (データトラック方向の記録密度) を 2 倍に高めている。このときの最短ピット長は 75 nm、またトラックピッチは BD と同じ 320 nm としており、120 mm 径の光ディスクの単層あたりの記録容量は BD (25 GB) の 2 倍の 50 GB となる。

この ROM ディスクでは、図 1 で示した超解像機能層に化合物半導体 InSb を使い、1.1 mm 厚のポリカーボネート材からなる ROM 基板と 0.1 mm 厚のカバー層との間に 5 層の超解像積層構造 ZnS-SiO₂(35 nm)/ZrO₂(15 nm)/InSb(20 nm)/ZrO₂(15 nm)/ZnS-SiO₂(35 nm) を構成した。積層部はマグネトロンスパッター法で蒸着した。ZnS-SiO₂ は図 1 の保護層に相当し、ここではさらに保護層と超解像機能層との間に ZrO₂ を干渉層として挿入している。ZrO₂ は一般に融点や硬度が高い性質をもつ材料であることから、照射光の吸収によって高温状態になる InSb が保護層 ZnS-SiO₂ へ広がるのを抑える役目になると考えられ、連続再生時の耐久性を高める効果が期待できる。再生性能指標であるビットエラーレート (bER: bit error rate) が 3×10^{-4} 以下である再生サイクル数は、ZrO₂ 層なしの場合 1,000 サイクル程度であるのに対し、45,000 サイクル程度まで大幅な改

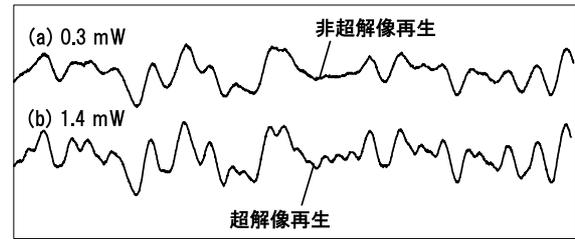
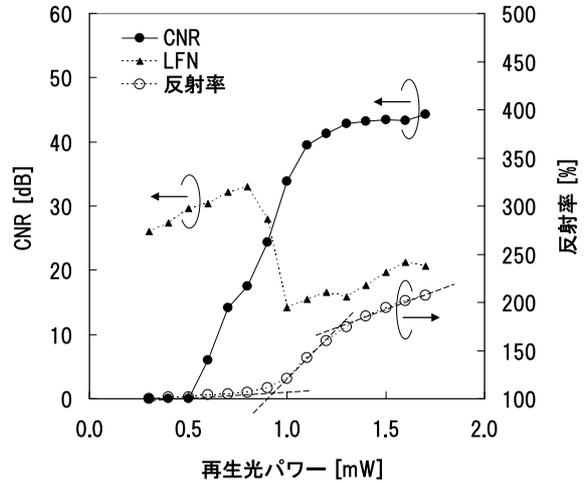


図4 ランダムデータ再生信号波形。



※LFN: 2 MHzでのスペクトル強度比@線速度2.46 m/s

図5 再生光パワーに対する 75 nm 長ピットの搬送波対雑音比 (CNR)、低域ノイズ (LFN)、反射率の変化。

善ができる¹⁴⁾。

図3は、開発したROM基板のAFM (atomic force microscope) 像である。このROM基板は、あらかじめ情報データであるピットを凸凹形状に形成した原盤を製作した後、射出成型によって原盤のピット形状を 1.1 mm 厚のポリカーボネート基板上に転写して作製する。そのピット面側に、先に述べた Super-RENS の 5 層の積層構造を蒸着する。また、ROM 基板は、超解像機能層を介した再生光学応答を含んだ再生信号において良好な信号性能が得られるように最適化を行った。図4に、作製した単層 50 GB の Super-RENS ROM ディスクの 1-7 変調方式で変調されたランダムデータの再生信号の波形を示す。図4 (a), (b) はそれぞれ再生光パワーを低パワー ($P_r=0.3$ mW)、高パワー ($P_r=1.4$ mW) にして再生した場合である。BD の光学系では解像限界は 119 nm にあるので、低い再生光パワーでは 2T ピット (75 nm) と 3T ピット (112.5 nm) の変調成分が観測できないが、高い再生光パワーでは再生分解能が高くなり、回折限界よりも短いピットの信号成分が波形からも観測できる。

次に、再生光パワーに対する超解像再生特性を測定した。図5は、ピット長が 75 nm の単一ピット列を再生した

表1 Super-RENS-ROM ディスクと映像再生システム仕様.

再生倍速	SRD 1X (SRD 2X)
データ転送レート (Mbps)	36 (72)
線速度 (m/s)	2.46 (4.92)
波長 (nm)	405
対物レンズ開口数	0.85
最短ピット長 (nm)	75
トラックピッチ (nm)	320
ディスク容量 (GB/層)	50
PRML 検出方式	PRML 1221/PRML 12221
変調方式	1-7 RLL
ビデオコーデック	H.264/AVC (H.264/AVC Multiplexed)
音声コーデック	AC-3
ピクセル数	1920×1080 HD (1920×1080 HD×4ch.)
フレームレート (fps)	30

際の、再生光パワーに対する CNR、反射率と低域ノイズ LFN (low frequency noise) の変化を示したものである。超解像効果が発現する再生光パワーの閾値が 0.5~0.6 mW にあり、再生光パワーの増加に伴って CNR が増大していく非線形な特性が観測される。ここで用いた試験サンプルでは、1.4 mW で 43 dB 程度と高い CNR が得られた。

また、再生信号強度の(時間)平均値レベルと再生光パワーの比率から求められる反射率を調べると、0.9 mW 付近と、CNR 値が 40 dB 以上の安定領域に差し掛かる 1.2 mW 付近で変曲点がみられる。InSb の超解像ディスクでは再生光パワーに対して反射率が増加する傾向をもつことも特徴のひとつであり、AgInSbTe を用いた超解像ディスクの場合とは異なっている²⁾。

また、0.8~1.0 mW の範囲で、CNR 特性とともに LFN が急激に変化しており、InSb の光学特性の転移が再生光パワーに対する非線形な変化に現れている。

3. 超解像ディスク再生システムと映像再生実験

Super-RENS ディスクは次世代の高精細映像や長時間の映像コンテンツを 1 枚に収めることができる大容量記録媒体として期待されるが、その実用性を示すため、筆者らは Super-RENS ROM ディスクから映像コンテンツをリアルタイムに再生させる映像再生システムの開発を行った¹²⁾。以下に、この映像再生システムと映像再生実験について述べる。

表1は、Super-RENS ROM ディスクと映像再生システムの仕様をまとめたものである。光ピックアップは、BD と同様に波長 405 nm のレーザー光と NA 0.85 の対物レンズを用いている。また、信号処理においては、12 タップの線形デジタルフィルターと、BD でも用いられる PRML

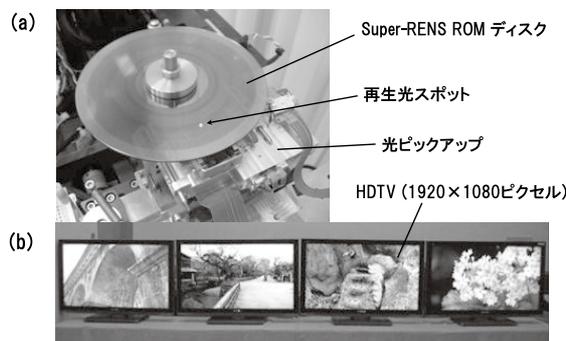


図6 4チャンネル映像コンテンツ同時再生システムの概観。(a) Super-RENS-ROM ディスクを再生する光ピックアップ、(b) 1920×1080 HD 映像を4画面分同時再生した様子。

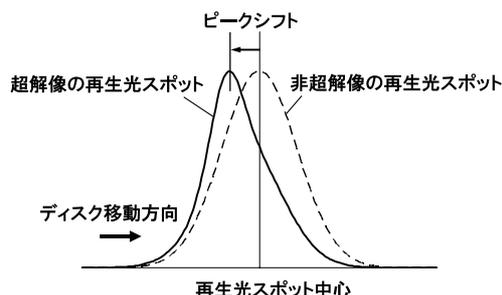


図7 ディスク回転によりピークシフトした、実効的な超解像再生光スポットプロファイル例。

(partial response maximum likelihood) 1221 または 12221 を使用した。

BD の標準データ転送レートである 36 Mbps、およびその 2 倍速再生に相当するデータ転送レート 72 Mbps で実験を行った。72 Mbps での再生検証のために、ビデオコーデックは H.264 とし、4 チャンルのハイビジョン映像データ (16 Mbps/チャンネル) をひとつのストリームに多重化したデータストリームを準備した。

図6 (a) は、三菱電機で行った映像コンテンツ再生システムの概観の一部である。図6 (b) は、実際に 72 Mbps の転送レートで 4 チャンネル同時再生を行った様子である。ここで行った実験では、上で述べた 4 チャンルのハイビジョン映像を同時再生するものであり、映像に途切れが発生せず、シームレスで安定な再生を確認した。このシステムは、デジタルシネマ (4096×2160 画素) と同じサイズの映像を 1 枚の超解像ディスクから再生したことに相当する¹⁵⁾。また、このときに用いたディスクサンプルでは、36 Mbps、72 Mbps の各データ転送レートにてビットエラーレート 4×10^{-5} 、 3.0×10^{-4} と、良好な再生性能が得られている。再生パワーは、それぞれ 1.8 mW、2.4 mW であった¹²⁾。

また、この再生実験では、次の知見も得られた。一般的

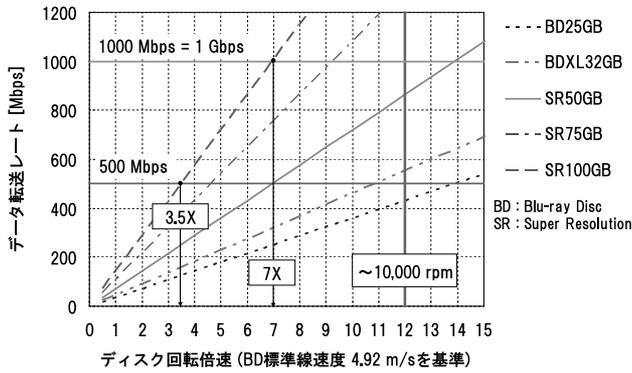


図8 ディスク回転倍速と各種ディスクの転送レート比較。

に、回転するディスク上では熱分布が再生光スポットの後方にシフトするため、超解像機能層の透過率または反射率を考慮した実効的なスポットプロファイルは、例えば図7に示したような前後非対称となることが報告されている^{16,17}。このため、超解像ディスクの再生信号は、超解像ピット（ピット長が解像限界以下）と非超解像ピット（ピット長が解像限界以上）の再生信号に位相差が生じることが想定される。これに対し、位相差を補正するように一方の信号に遅延を与える再生信号処理方法も提案されている¹⁸。また、ピットの長さ自身が吸収熱の拡散に影響して読み出し開口の形成に影響するとの報告もあり、記録マーク長ごとにPRMLの特性を動的に変化させる非線形信号処理の適用が提案されている¹⁷。

しかしながら、筆者らが行ったInSbのSuper-RENSディスク再生実験では、BDなどで使用されるのと比較的近い線形信号処理のみでも 10^{-5} 台の良好なbERが得られており、再生光スポットの変形に伴う再生信号の遅延補正や、記録マーク長ごとの特別な非線形信号処理は必要ではなく、懸念されていた上記の課題は50 GBディスクでは無視できるレベルであることがわかった。

4. 再生データの高転送レート化

本章では、再生データの高転送レート化について述べる。前章の映像再生の実証実験で述べたように、現在、データ転送レート72 Mbpsまで達成したところにある。次世代高精細映像に対応するためには、さらに高転送レートに再生することが期待されているが、例えば目標データ転送レートを500 Mbpsと想定する場合、BDやBDXL（容量を128 GBまで拡大した記録可能多層Blu-ray Discの規格）では記録線密度が低いため、ディスクを12 cm径の光ディスクの機械的限界10,000 rpm近くのBD 12X (59.04 m/s)にまで高速に回転させる必要がある（図8）。よって、ディスク回転数を抑えるためにも線密度を大きくする必要があ

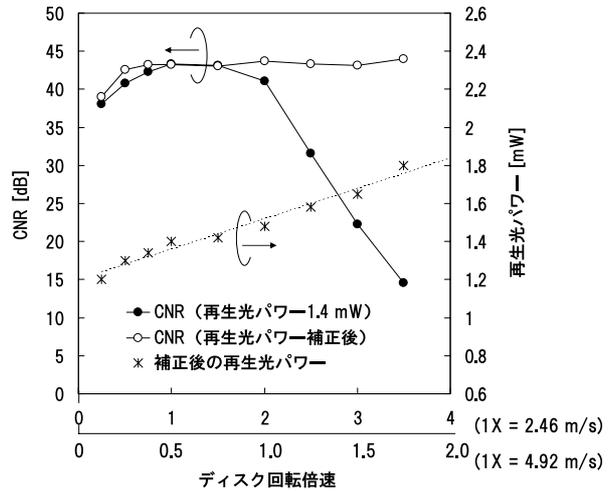


図9 ディスク回転倍速と再生信号 CNR。

り、この点においても超解像ディスク方式はメリットがある。

そこで、高いデータ転送レートの再生を行う場合、ディスク回転倍速と超解像効果の関係が重要となる。再生光パワーを固定値してディスク回転倍速を大きくすると、単位面積あたりの超解像機能層へ注入される光パワーが比例的に減少するので、超解像読み出し性能に影響を及ぼす。図9は、ディスク回転倍速を横軸に、超解像再生 CNR 値をプロットしたものである。ここで、単一パターンピットの長さは75 nmである。

BD 0.5X (2.46 m/s) 再生時の再生光パワーは1.4 mWであり、CNRは43 dBである。1.4 mWのままでは、ディスク回転倍速を大きくするに従ってCNRは減少する。BD 1X (4.92 m/s)より高速にすると、急激にCNRが低下する。逆に、ディスク回転を小さくした場合にも、CNRは緩やかに低下する。そこで、再生光パワーをディスク回転倍速ごとに補正していく、例えば、BD 1.75X (8.61 m/s)では再生光パワーをBD 1X (4.92 m/s)の約1.3倍に大きくすることで、BD 1X (4.92 m/s)再生時のCNR以上が得られる。補正後の再生光パワーの傾向から、BD 2X (9.84 m/s)までは2 mW以下で40 dB以上のCNRが確保できるものと推測できる。ディスク回転倍速に合わせて適切な光の照射パワーを注入すれば、ディスク回転倍速に関係なく超解像機能層の読み出し開口を良好な状態に保持できるものと考えられる。今後はさらに、この2倍に相当するBD 3.5X (17.22 m/s)での再生性能の確保を目指す必要がある。線密度をBDの4倍まで高めたとき、ディスク回転倍速は3.5Xで500 Mbpsを達成できる。

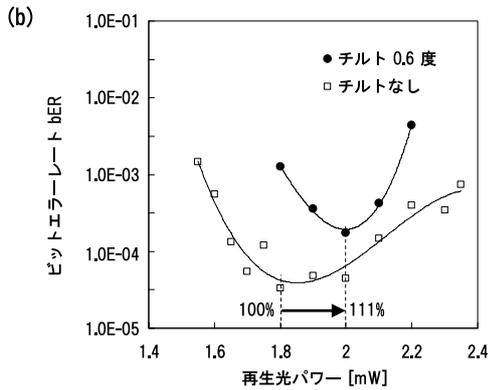
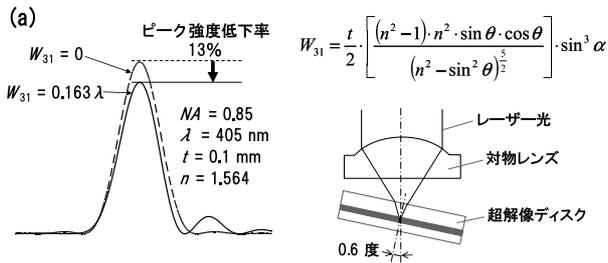


図10 ディスクチルト発生時における、再生光スポットのピーク強度と再生性能との関係。(a) ディスクチルトと再生スポットプロファイル、(b) ディスクチルトによる再生パワーマージン特性の変化(□: ディスクチルトなし、●: ディスクチルト0.6度)。

5. BD システムとの互換性を高める

超解像ディスクは、BD との光学系の互換性というのが最大のメリットである。しかしながら筆者らの検討では、ディスクチルトマージンについてはBD に比べ0.15度ほど狭い傾向にあった¹²⁾。この点について、以下の検討から、ディスクチルト(以下、チルト)による特性劣化が、集光スポットのピークパワーの低下に伴うものであることが明らかとなった¹⁹⁾。図10は、チルトがない状態(□)とラジアル方向に0.6度のチルトを与えた状態(●)のそれぞれについて、再生光パワーを変化させてビットエラーレートを計測した結果である。ビットエラーレートは、チルトなしのとき1.8 mWで最小となるのに対して、0.6度のチルトが発生しているときは2.0 mWで最小となる。0.6度のチルトを仮定したときのコマ収差量の計算値から、集光スポットのピーク強度は約13%低下する。この低下分を補正するように、再生光パワーを1.8 mW から2.0 mW に大きくすると、0.6度のチルト時のビットエラーレートが最小となる。すなわち、チルトマージンは従来の±0.45度から±0.6度まで拡大する。この程度までチルトマージンが確保できれば、BD とのシステム互換が図れる。上記検証では再生光パワーをディスクチルトに応じて補正しているが、これに限らず、例えばカバー層の厚みをBD の0.1 mm より小さく設定することも有効であり、再生光パワー

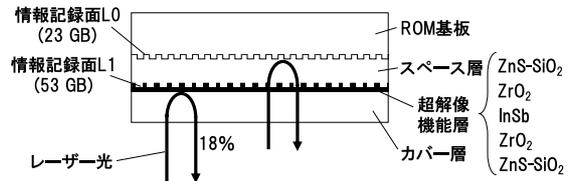


図11 L1層が超解像再生層とした76 GB容量のハイブリッド型超解像二層ディスク。

を制御することなくチルトマージンを拡大できる。

6. 多層超解像ディスクによる大容量化

1層あたりの高密度化とあわせて多層化を導入すれば、層数倍に大容量化が図れるため、本方式のメリットがさらに大きくなる。フランスCEA-Letiにより、InSbのSuperRENS-ROMディスクの二層化が進められている¹⁴⁾。第1のステップとして、図11に示すようなL0層をBD-ROM(23 GB)、L1層を超解像ROM(53 GB)で構成したハイブリッド型の二層ディスクを開発した。L1層は、超解像効果を発揮させるだけの光の吸収を確保しつつ、透過率の確保が要求される点で設計の難しさがある。これは、記録メディアに要求される設計思想と似ている。半透明となるL1層を、再生評価では再生光パワー1.9 mWにてビットエラーレート 10^{-5} オーダーと良好な特性を得ている。また、4万サイクル以上の再生耐久性も確認されている。第2のステップとして、2層とも超解像再生層にできれば、100 GB容量の大容量化が期待できる。

7. 超解像ディスク技術の今後の可能性

本稿では、InSbを超解像層に適用した再生専用型ディスクを用いて検討した内容を中心に、最近の進展について解説した。そのなかで述べたように、メディアのみならず再生システム全体として進展がみられ、さらなる記録密度の向上へと進める段階となっている。SuperRENSの記録型ディスクでは、BDの4倍密に相当する37.5 nmの単一マーク再生で40 dB近くのCNRが検出できるとの報告²¹⁾があることから、超解像技術が本来もちうる再生分解能は十分に高いと考えられる。また、本稿でも紹介した超解像ディスクの二層化技術のほか、トラックピッチの狭小化によるディスク半径方向の高密度化検討も行われている²⁰⁾。以上の技術動向から、将来的には1枚あたりの記録容量250 GB以上、転送レート500 Mbpsも現実的な目標ターゲットとなりつつある。

スーパーハイビジョン放送やデジタルシネマ映像のほか、多視点映像などの次世代大容量映像コンテンツを取ることが可能な安価な配布媒体として、超解像ディスクが

大きな役割を担うものと期待する。

本稿の一部に記載した内容は、産業技術総合研究所の旧近接場光応用工学開発センターの富永淳二氏、中野隆志氏、島隆之氏、フランス原子力庁研究所 CEA-Leti の Bérangère Hyot 氏、Bernard André 氏、Ludovic Poupinet 氏、韓国サムスン電子株式会社の Jooho Kim 氏、Inoh Hwang 氏、Yongwoon Lee 氏、Hui Zhao 氏、三菱電機株式会社先端技術総合研究所の竹下伸夫氏、篠田昌久氏、大牧正幸氏とともに達成した成果をまとめたものである。ここにご協力への感謝の意を表す。

文 献

- 1) J. Tominaga, T. Nakano and N. Atoda: "An approach for recording and readout beyond the diffraction limit with an Sb thin film," *Appl. Phys. Lett.*, **73** (1998) 2078-2080.
- 2) 島 隆之: "Super-RENS", 次世代光メモリとシステム技術 (シーエムシー出版, 2009) pp. 152-153.
- 3) T. Kikukawa, A. Tachibana, H. Fuji and J. Tominaga: "Recording and readout mechanisms of super-resolution near-field structure disc with silver-oxide layer," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **42** (2003) 1038-1039.
- 4) T. Kikukawa, T. Nakano, T. Shima and J. Tominaga: "Rigid bubble pit formation and huge signal enhancement in super-resolution near-field structure disc with platinum-oxide layer," *Appl. Phys. Lett.*, **81** (2002) 4697-4699.
- 5) J. Tominaga, T. Shima, M. Kuwahara, T. Fukuya, A. Kolobov and T. Nakano: "Ferroelectric catastrophe: Beyond nanometer-scale optical resolution," *Nanotechnology*, **15** (2004) 411-415.
- 6) 富永淳二: "超解像近接場構造 Super-RENS 技術による超高密度近接場光メモリ", 電子情報通信学会誌, **89** (2006) 1000-1008.
- 7) M. Kuwahara, T. Shima, A. Kolobov and J. Tominaga: "Thermal origin of readout mechanism of light-scattering super-resolution near-field structure disc," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **43** (2004) L8-L10.
- 8) G. Mori, M. Yamamoto, H. Tajima, N. Takamori and A. Takahashi: "Energy-gap-induced super-resolution (EG-SR) optical disc using ZnO interference film," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **44** (2005) 3627-3630.
- 9) T. Shima, Y. Yamakawa, T. Nakano, J. Kim and J. Tominaga: "Metal-free phthalocyanine layer prepared on read-only-memory disc for super-resolution readout," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **45** (2006) L1007-L1009.
- 10) B. Hyot, F. Laulagnet, O. Lemonnier and A. Fargeix: "Super-resolution ROM disc with a semi-conductive InSb active layer," *Conference of International Symposium of Optical Memory (ISOM) Technical Digest*, Mo-B-04 (2006).
- 11) G. Pilard, L. Pacearescu, H. Holzemann and C. Féry: "Comparison of a semiconductor and a phase-change material for application in a super-resolution ROM disk," *Joint Conference of International Symposium of Optical Memory (ISOM) and Optical Data Storage (ODS) Technical Digest*, ThC06 TD05-58 (2008).
- 12) K. Nakai, M. Ohmaki, N. Takeshita, M. Shinoda, I. Hwang, Y. Lee, H. Zhao, J. Kim, B. Hyot, B. André, L. Poupinet, T. Shima, T. Nakano and J. Tominaga: "First playback of high-definition video contents from super-resolution near-field structure optical disc," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **49** (2010) 08KE02.
- 13) A. Fukumoto and S. Kubota: "Superresolution of optical disks using a small aperture," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **31** (1992) 529-533.
- 14) B. Hyot, S. Olivier, F. Laulagnet, M. F. Armand and B. André: "High capacity SuperRENS-ROM disc with InSb active layer: Toward 76 GB hybrid dual level," *Conference of International Symposium of Optical Memory (ISOM) Technical Digest*, Mo-D-06 (2009).
- 15) M. Ohmaki, K. Nakai, N. Takeshita, M. Shinoda, I. Hwang, Y. Lee, H. Zhao, J. Kim, B. Hyot, B. André, L. Poupinet, T. Shima, T. Nakano and J. Tominaga: "Next generation optical disc system with Super-RENS ROM disc," *Conference of Optical Data Storage (ODS) Technical Digest*, 7730-72 (2010).
- 16) T. Nakano, E. Mashimo, T. Shima, Y. Yamakawa and J. Tominaga: "Readout power dependence of signal distribution observed in Fourier plane of focus spot," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **44** (2005) 3350-3352.
- 17) R. Kasahara, T. Ogata, T. Kawasaki, H. Miura and K. Yokoi: "Decision feedback partial response maximum likelihood for super-resolution media," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **46** (2007) 3878-3881.
- 18) 峯宮浩行: "超解像光ディスク向けシミュレーションおよび信号処理技術", 平成19年度第5回光ディスク懇談会資料 (光産業技術振興協会).
- 19) 中井賢也, 大牧正幸, 竹下伸夫, B. Hyot, B. André, L. Poupinet, 島 隆之, 中野隆志, 富永淳二: "単層 50 GB 光超解像 ROM ディスクの再生特性", *Optics and Photonics Japan (OPJ) 講演予稿集*, 8aE1 56-57 (2010).
- 20) M. Hepper, G. Pilard, X. Chen and C. Féry: "Optical channel characterization for an InSb-based super-resolution disc system," *Conference of Optical Data Storage (ODS) Technical Digest*, 7730-26 (2010).
- 21) T. Kikukawa, N. Fukuzawa and T. Kobayashi: "Properties of super-resolution near-field structure with platinum-oxide layer in Blu-ray Disc system," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **44** (2005) 3596-3597.

(2011年6月22日受理)