新技術は光データストレージ容量の密度を上げ続けることができるのか？

ゲイル・オバートン

光データストレージの容量は、ブルーレイの容量を超えて増大しており、ホログラフィック、近接場光、さらにはHAMR（heat [laser]-assisted magnetic recording）までもが、実現に向けて現実味を帯びつつある。しかし、いずれの次世代製品も、実用化するには技術やコスト上の問題を解決する必要がある。

ペンウェル社（PennWell）傘下の米ストラテジーズ・アンリミテッド社（Strategies Unlimited）の予測によると、約76億ドル規模とされる2012年のレーザ市場のうち、市場全体の10%以上に相当する7億8500万ドル近くが、光データストレージレーザの売上高であるという[1]。しかし全般的には、光データストレージ市場におけるレーザダイオードの売上高（販売先は主に日本企業）は、2012年以降減少し続けると予測されている。部品価格の低下、市場の成熟、消費者や企業が光学系以外のフラッシュドライブや「クラウド」データストレージを選択し始めていることがその理由である。2011年以降、780 nmのCD（compact disc）と650nmのDVD（digital video disc）の各レーザダイオードの売上高が減少の一途をたどる見込みである一方で、405nmのブルーレイディスク（BD）レーザダイオードの売上高は、堅調なペースで増加し続けると予測されている。

光データストレージレーザの売上高は2015年まで減少し続けると予測されているにもかかわらず、ホログラフィックデータストレージ、3次元光ストレージ、HAMRクラウドといった新しい技術によって、同市場の展望は大きく覆される可能性がある。光メモリや光データストレージの容量は、多様なフォトニクス／光工学による記録手段の採用によって、1平方インチあたり1テラビットを超えるレベルにまで増大している。このようなバルク型光学素子とレーザを用いたハイブリッド型の手法や、ナノリソグラフィに基づくパターンドメディアなど、近接場光や超解像技術を用いた手法が今後、光データストレージネットワークにおいて広く採用されるであろうことは間違いない。しかし、これらの次世代プラットフォームのいずれかを実用化するには、技術やコスト上の問題を解決する必要がある。

ますます増大するストレージ容量

光データストレージの容量は、波長（と記録フィーチャサイズ）の減少に伴って急激に増加している。CDには約700 Mバイト、DVDには5Gバイト近くのデータを記録することができる。業界団体ブルーレイディスクアソシエーション（Blu-ray Disc Association、www.blu-raydisc.com）によると、単層のBDの記録容量が25Gバイトであるのに対し、2層のBD（ディスクの片面に2つの光層）は50Gバイトを記録可能であるという。また、複数のメーカーによって

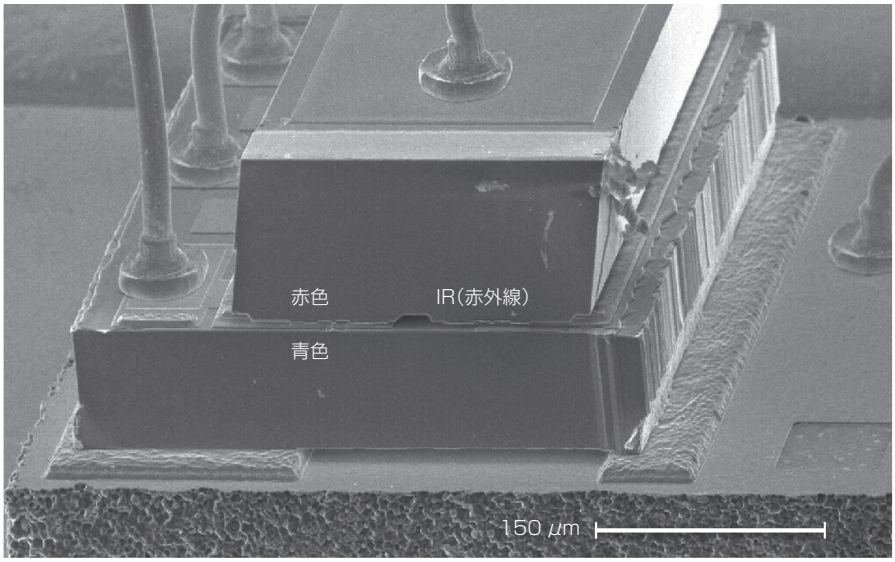

図1　ブルーレイ光データストレージシステムは通常、CDやDVDシステムとの下位互換性を有する。つまり、このソニー製スタックダイ構造の走査型電子顕微鏡（SEM）写真が示すように、405 nmの青色レーザだけでなく、780 nm（CD）と650 nm（DVD）のレーザにも対応する。複数の波長は、ダイ表面の写真に示された位置から放射される。（提供：ヨール・デベロップメント社〔Yole Developpement〕とシステム・プラス・コンサルティング社〔System Plus Consulting〕）

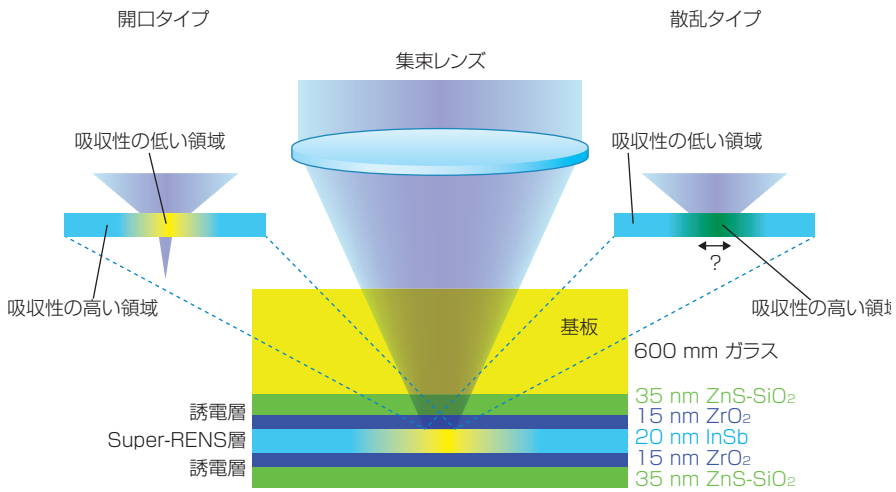

図2　Super-RENS（Super-REsolution Near-field Structure：超解像近接場構造）構成では、405nmの照射によって、超解像層に集光スポットの面積よりも小さい熱誘導領域を作成し、サンプルの光パラメータ（誘電率）を一時的に変更する。特定の材料の場合、熱誘導領域（図中で左側の黄色部分）は外側の領域（青色部分）よりも吸収性が低く、光開口部を形成する。アンチモン化インジウム（InSb）のサンプルの場合、熱誘導領域（図中で右側の緑色部分）は外側の領域よりも吸収性が高くなり、光データストレージとして使用可能な光散乱体を形成する（提供：デルフト工科大学とCEA-Leti）

現在、3層と4層のBDXL技術が提供されており、それぞれ100 Gバイトと128Gバイトのストレージ容量をサポートする。

では、光ディスクによる保存可能期間はどの程度だろうか？ この期間については幅が非常に広く、CDで約5～10年（表面に傷がつかない場合）、BDでは最大50年間と、パナソニックの50Gバイトブルーレイディスクである「Long Life Dual Layer」の製品仕様には記されている[2]。

ディスクベースの光ストレージはすべて、同じ技術的原理に基づいている。レーザダイオードが、回転ディスクの1つまたは複数のポリマー層（通常はポリカーボネート）にピット（へこみ）を（中心から外側に向けて）作成し、それがレーザによって1または0として読み出され、バイナリデータコードとして解釈され、音声/映像としてディスクプレーヤーへと送信される。ブルーレイプレーヤーは通常、CDやDVDプレーヤーとの下位互換性がある。この下位互換性の実現には、例えば、ソニーのスタックダイ、5ピン、3波レーザダイオード技術である「SLD6562TL」などが使用される（**図1**）[3]。

光データストレージの専門家で、米ジ・アドベント・グループ社（The ADVENT Group）のプレジデント兼マネジメントプリンシパルを務めるリチャード・G・ゼック氏（Richard G. Zech）は、2012年1月に米ネバダ州ラスベガスで開催されたIEEE ICCEカンファンレスでの自身の講演において、ブルーレイとその各種派生製品が将来の光ストレージの主流になると予測した[4]。ホログラフィック手法や3次元手法は、短期的には実用化にこぎつくことはまずないと同氏は述べた。残念なことにゼック氏は、ブルーレイでさえデータストレージ容量の理論的な限界に達してしまっていると指摘している。波長405nm、一般的な開口数0.85（従来型の対物レンズを使用した場合）であることから、ピットの垂直方向の間隔（トラックピッチと呼ばれる）は320nm程度となり、単層ストレージ容量は1平方インチあたり25または18.1Gバイトが限界となる。

しかし近い将来、近接場光や複数層記録方式など、ブルーレイのプラットフォームとその120mmのディスクを使用したストレージ容量を拡大するための手段がいくつか登場するとゼック氏は予測している。またその先には、（技術が成熟して価格が低下すれば）紫外線（UV）やさらにはX線ディスクが登場する可能性もある。ナノレーザや開口部が非常に小さいレーザと、ナノフォトニクスの進歩によって実現されるパターンドメディア、プラズモニクス、さらには、遠紫外線およびX線のスポット生成を実現する光子ふるいによって、これらの技術が実現される。

従来のブルーレイを超える容量

ブルーレイを超える光データストレージ容量を実現するための、最も手っ取り早く実現可能で、コスト効果の高い方法の1つは、同じ青色レーザを近接場構成で利用することである。つまり、ソリッドイマージョンレンズ（SIL：solid immersion lens）やエバネセント波といったフォトニクスの「仕組み」を利用して、従来の光学部品の回折の限界や固定のスポットサイズといった問題を解決する。

オランダのデルフト工科大学（Delft University of Technology）とCEA-Leti（フランス原子力・代替エネルギー庁の付属機関である電子情報技術研究所）のチームは最近、近接場光技術を利用することで、スポットサイズを25%減少して100nmにすることに成功した。405nmのレーザ源を使用して、熱誘導の近接場光散乱体をアンチモン化インジウム（InSb）の光ディスク上に配置することにより、単層で46Gバイトのデ

ータストレージ容量を実現した（**図2**）[5]。ただし現時点ではまだ、消費者や産業向けの光データストレージとして実用化されている近接場光技術は存在しない。

ブルーレイ技術を拡張するもう1つの方法は、多層記録方式である。DMD（digital multilayer disk:デジタル多層ディスク）はその1つで、以前はFMS（fluorescent multilayer storage:蛍光多層ストレージ）と呼ばれていた。DMDでは、直径0.5μmの蛍光体ピットを含む基板が10～50枚積層される[6]。レーザが基板を読み取るときには、異なる波長で蛍光が放射されるため、読み/書きビーム間で干渉は生じない。この原理によってFMSには、最大1テラバイトのデータを100層のDVDサイズのディスクに記録できる可能性がある。また、FMSドライブはDVDディスクを読み取ることができるため、これを開発していたコンステレーション3D社（Constellation 3D）は、実用化に向けて大きな期待を抱いていた。残念ながら同技術はその後、D-データ社（D-Data Inc.）に買収されたが、同社も現在は廃業しているようである。

最も多くの層を採用するという点において技術的にリードしているのはソニーで、非線形の光吸収とピコ秒レーザを使用して30層の光データストレージを開発している。しかし、こちらについても、4層のBDXLを超える多層技術を実装した商用の光データストレージシステムは存在しない（また、部品コストが大幅に低下しない限り、その規模のストレージシステムが実現される見込みもない）[7]。

当然ながら、ブルーレイを405nmのレーザダイオードからUVダイオードへと移行すれば、さらなるデータストレージ容量の増加が可能である。波長が短くなればスポットサイズが小さくなり、各種フィーチャが小さくなり、ストレージ容量は大きくなる。しかし、商用提供されている350nm帯域におけるUVレーザダイオードは現在、およそ40ドルもする（http://ledmuseum.candlepower.us/leduv.htm参照）。405nmのBDダイオードの2～10ドルという価格（価格は出力レベルによって異なる）と比較すると4～20倍も高く、したがってまだ、商用実装に向けて十分なコスト効果が達成できているとはいえない。

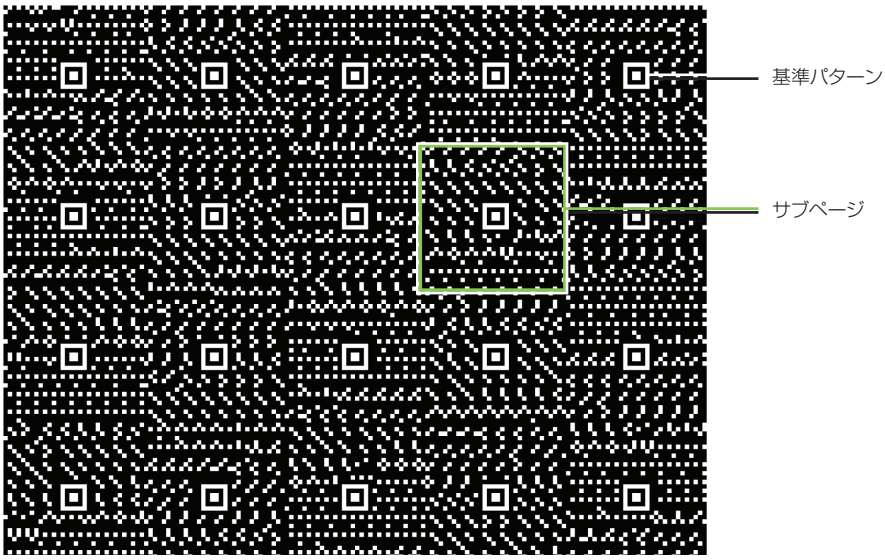

図3　ホログラフィック光データストレージ手法とは異なり、リップマン干渉手法では、鏡を使用することによって、画像光線と参照光線をそれぞれ別個に用意する必要性をなくしている。画像光線は記録媒体（ハロゲン化銀ゼラチン）内で画像光線そのものと干渉し、複雑なブラッグパターンを生成する。これがCCDセンサーによって復号化される。光線を少し移動させるか、波長源を追加して信号を多重化すると、記録媒体内に複数のデータページ（左）が作成される。この例では、5×4のサブページが並んでおり、各サブページの中心には基準パターンがある。（提供：パリ第11大学）

ホログラフィの登場はいつ？

米アリゾナ大学（University of Arizona）で6月に開催された2012 Optical Data Storage（ODS）Workshopにおいて、仏シャルル・ファブリー光学研究所（Laboratoire Charles Fabry de l'Institut d'Optique）のジャイルス・ポリア氏（Gilles Pauliat）は「High Capacity Data Storage Inspired from Lippmann Interference Photography」（リップマン干渉写真撮影技術を応用した高容量データストレージ）について発表した。ホログラフィック手法に代わる同手法では、データ情報を伝送する画像光線が、鏡によるその反射光線と干渉するため、外部の参照光線が不要である。

多くの体積記録型や3次元のデータストレージ手法では、2つの後方励起光線に着目してデータのビットを記録するとポリア氏は述べる。しかし、ページ指向の手法ならば、ストレージ容量をさらに増大できる可能性がある。この手法では、データページを画像光線上にインプリントし、画像光線を参照光線と干渉させることによって、画像光線をボリューム内にシーケンシャルに記録する。角度、位相、または波長の多重化を適用することによって、複数のデータページをボリュームに記録することができる[8]。

リップマン型アーキテクチャでは、入力画像光線が記録媒体上を通過し、

鏡によって反射する。入力光線と反射光線は干渉し、複雑なブラッグ構造を記録材料に記録する（**図3**）。記録後、鏡が取り除かれ、ブラッグ構造が白色光によって照射されて、記録画像が元の波長スペクトルで回折される。データストレージ用には、異なる波長における画像が、通常はシーケンシャルに記録および取得され、異なるデータセットに対応する（ポリア氏のデモでは、532nmと475nmの2つの波長が用いられた）。ポリア氏が示したリップマン手法は、ディスクあたり最大で数テラバイトのデータ記録容量を実現すると予測されている。

Laser Focus World誌は2012年2月号で、米アクセス・オプティカル・ネットワークス社（Access Optical Networks:AON）が開発した体積記録型の水晶メディアにおけるホログラフィックデータストレージ技術に関する記事を掲載した。AON社の共同創設者でプレジデントを務めるグレン・グラッドニー（Glenn Gladney）氏は、「ホログラフィックデータストレージには、今後10年間で密度とデータ転送速度の両方を1000倍増加させる能力がある」と述べている。「AON社は、1750万ドルの資本を投入して立ち上げた進行中のプログラムの2012年秋の完了に伴う売上高を、今後18カ月以内に、コンパクトでコスト効果の高い光データストレージソリューションにおける、商用提供されている通信製品を利用したMEMSベースの部品と長波長レーザの最適化のために投入する」と同氏は述べた。

以上のような技術進歩や商業的展望があるにもかかわらず、商用のホログラフィックデータストレージは存在しない。2007年にプレスリリースで、「世界初の商用ホログラフィックストレージ製品」として独自のビットストレージ技術である「Tapestry 300R」（5.25インチのディスク上に300Gバイトのデータを160Mビット/秒の転送速度で記録）を発表した米インフェーズ・テクノロジーズ社（InPhase Technologies）でさえも、2010年終わりに連邦倒産法第11章の適用を申請した。幸い、インフェーズ社の資産は最近、hボールト社（hVault、http://hvault.com）に買収され、同社は300 Gバイトのディスク製品を発売する計画である。同社のアーカイブストレージシステムは、最大2～8個のドライブと540個のディスクスロットを搭載可能で、数テラバイトを50年間保存可能なデータストレージを実現する。

近く実現が期待されるHAMR

HAMRは、一般的には「光データストレージ」手法としては分類されないが、磁気データストレージ市場へと販売される赤外線レーザダイオード（780nmまたは870nm）の個数を大幅に増加させる可能性を秘めている。

ブルーレイが光学的な限界に達したように、磁気データ記録技術も「超常磁性」限界に達している。超常磁性限界とは、磁性粒子のサイズが製造可能な最小値である約25nmに達し、データの記録を可能とするための”1”と”0”の符号化に相当する、粒子の磁性を容易にスイッチングする能力が制約される状態のことである。赤外線レーザダイオードは、HAMRを可能にした。HAMRとは、簡単に言えば、フォトニクス手法によって回折の限界を克服したのと同様に、基本的に超常磁性限界を引き上げることによって、磁性状態の「容易な」スイッチングを可能にし、既存の磁気メディア内のデータストレージ容量を増大するものである。

米シーゲート社（Seagate）は2012年3月、HAMR技術を採用して1平方インチあたり1テラバイトの光ストレージ密度を実現したと発表した。しかし、シーゲート社のプレスリリースには、HAMR技術は「（略）2010年代の間の登場とともに、今日のハードドライブのストレージ容量を2倍にし、その後の10年間で最大60テラバイトという驚異的な容量を持つ3.5インチのハードドライブを生み出すことが期待される」と記されていた。やや先の話で、期待高まる新製品投入計画であるとはいえない。

当然ながら、X線、ナノフォトニクス、原子レベルのデータストレージはまだきわめて初期の段階にあるため、これらについてはまた、Laser Focus Worldの「Photonic Frontiers」の将来の記事で、ジェフ・ヘクト（Jeff Hecht）に議論してもらうことにしたいと思う。

参考文献

(1) T. Hausken, Strategies Unlimited, The Worldwide Market for Lasers: Market Review and Forecast 2012, F ifth edition（January 2012）; http://bit.ly/NAiUJN.
(2) Panasonic Long Life Dual Layer 50GB Blu-ray Disc product information; www.sell.com/2C4SN4.
(3) Report, "LED: Sony Triple Wavelength Laser Diode for PS3 Blu-ray Disc Player," iMicroNews online; http://bit.ly/UhJKVf.
(4) R.G. Zech, "The Future of Optical Data Storage," pres. at IEEE ICCE Conf. 2012, Las Vegas, NV（Jan. 13-16, 2012）; http://slidesha.re/PEdrOT.
(5) A.C. Assafrao, Opt. Exp., 20, 9, 10426-10437（2012）.
(6) Lascon Storage web site, "Digital Multilayer Disk（DMD）"（2012）; http://bit.ly/S5NlrP.
(7) S. Tashiro et al., "Volumetric Optical Recording with Void Marks Using an All-Semiconductor Picosecond Laser," Japanese J. Appl. Phys., 50, 09MF038（2011）.
(8) K. Contreras and G. Pauliat, Appl. Opt., 50, 30, 5816-5823（2011）.

LFWJ