

マスタリング技術

高 森 信 之

Mastering Technology

Nobuyuki TAKAMORI

Optical memory system had been attempted to increase its areal density. Progress of the recording density of an optical memory was equivalent to a history of the mastering technology development. As for high density mastering in recent years, heat mode mastering and the electron beam mastering technology has been developed remarkably. In addition, to develop the next generation optical memory, the combining technology of the SIL (solid immersion lens) lithography, the liquid immersion lithography and the resolution enhancement technology is expected for the promising candidate technology to get the higher in-plane density.

Key words: optical memory, mastering technology, heat mode mastering, electron beam mastering, SIL, liquid immersion, resolution enhancement

光ディスクは今までに CD (compact disk), MO (magneto-optical disk), DVD (digital versatile disk) など、さまざまな規格が提案され、かつ実用化されてきた。さらに、次世代の光ディスクとして、BD (Blu-ray Disc) や HD DVD (high definition DVD) などが規格化されてきている。CD, DVD, HD DVD, BD それぞれの片面当たりの記録容量は、680 MB, 4.7 GB, 15 GB, 25 GB であり、ROM の容量が規格普及の鍵となってきた。それぞれの ROM ディスクの寸法でいうと、CD はトラックピッチ $1.6 \mu\text{m}$ 、最小ピット長が $0.89 \mu\text{m}$ で記録されており、DVD ではトラックピッチ $0.74 \mu\text{m}$ 、最小ピット長 $0.40 \mu\text{m}$ 、HD DVD ではトラックピッチ $0.40 \mu\text{m}$ 、最小ピット長 $0.204 \mu\text{m}$ 、BD ではトラックピッチ $0.32 \mu\text{m}$ 、最小ピット長 $0.149 \mu\text{m}$ まで微細化されている。

このように、光ディスクの記録容量はピットの大きさ(密度)に大きくかかわっており、大容量化を図るために微細なピットを形成することが必要である。

図1は一般的な光ディスクの作製方法であり、フォトレジストにレーザー光を照射し、その後露光部を現像除去す

るフォトリソグラフィーの手法が用いられている。

再生専用光ディスクの記録容量は、マスター原盤に形成されたピットの大きさとトラックピッチで決まる。そのため、高密度にピットを形成するマスタリング技術の重要性が増しており、微小パターンング技術が次世代の高密度光ディスクの容量を決定している。

光ディスクのマスター原盤作製のためのパターンニングは、複数の長さを有するピット列を構成するために、回転テーブル上のマスター原盤にレーザー光を集光して照射しながら、半径方向に走査することによって、連続的にピット列を形成している。ピット密度を高めるためには露光するレーザー光の集光スポット径(ビーム径)を小さくする必要から、レーザー光の短波長化が進められ、現在は波長 $247\sim 266 \text{ nm}$ の深紫外領域のレーザー光を用いる検討が進められている。

波長 λ のレーザー光を開口径 NA のレンズで集光させた場合のビーム径は $\kappa \cdot \lambda / NA$ で決まり、 257 nm のレーザー光を用い、 κ を 0.5 とした場合(最小分解能)でも約 140 nm となる。すなわち、それ以下のピットを形成する

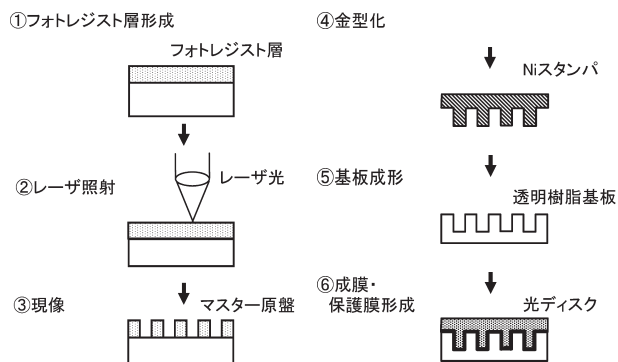


図1 光ディスク製造プロセス。①～③ マスタリング：レーザー光をフォトレジストに照射し、現像液によって露光部分または未露光部分を選択的に除去し、所定のピット形状を形成したマスター原盤を作製。④スタンパー化：ニッケルなどの金属でこのパターンを転写金型を作製。⑤射出成形：樹脂材料を金型に抽入し、表面形状を樹脂に転写して光ディスク基板を作製。⑥成膜：ディスク基板に記録膜、反射膜などを成膜し、必要に応じて保護膜を形成。

ことは困難であり、さらに短波長化を進めると、短波長の光を通す材料が少ないなどの課題がある。また、ピットの微細化を進めるために、電子ビーム露光は有望な技術であるが、従来のレーザーを用いたマスタリング技術と比較すると、装置のコストが高価であり、さらに1枚のディスク原盤作製に時間がかかり、光ディスクのコストアップという課題がある。このため、比較的安価なレーザーを用いた新規マスタリング技術の開発が盛んに行われている。

ここでは、レーザー光の短波長化予測、ヒートモードによるパターン形成方法、新規露光方法など微小マークのマスタリングについて紹介する。

1. レーザー光の短波長化

これまでのマスタリングは、フォトンモードでの露光現像プロセスであったため、微細化はマスタリング用レーザー光の波長と対物レンズのNAで決まるビーム径に依存していた。光ディスクのこれまでの高密度化の進展は、NAが理論限界の1に限りなく近づいていることより、おもにレーザーの短波長化による高解像度化の歴史であった。CDでは、0.89 mmのピット形成のためArガスレーザー（波長456 nm）を、DVDでは、0.40 μm のピット形成のためKrガスレーザー（波長351 nm）を主としてそれぞれ用いていた。その後、青色レーザーを用いたBDでは、0.149 μm のピット形成が必要なため、さまざまな露光方法が試されているが、通常フォトレジストを用いた従来の延長線上での露光を考えると、より短波長の深紫外レーザー（波長266 nm）が用いられる例がある¹⁾。

これ以降、光メモリー用に用いられる可能性のあるマ

スタリング用レーザー光としては、半導体DRAM (dynamic random-access memory) 用に開発されているものが応用される可能性がある。具体的には、KrFレーザー（波長248 nm）、ArFレーザー（波長193 nm）、F₂レーザー（波長157 nm）があり、さらには、EUV極紫外線レーザー（波長13.5 nm）も国家プロジェクト体制で開発されている。しかし、EUVは光学系のレンズ、ミラー等に波長起因の制限があることやレーザーの実用性（低ノイズ化や安定性）に問題があることから、実用化には時間がかかるとみられている。

また、それらのレーザーに合わせた有機レジストの開発も必要になり、ノボラック型、化学増幅型、ポリマー型それぞれに、解像度、感度、表面粗さ、エッジラフネス、パターンアスペクト比、均一性の課題を解決する必要がある。

2. ヒートモード形成方式

しかし、近年ヒートモードマスタリングとよばれる方式の開発により、マスタリングレーザーのビーム径より小さな微細パターンを得るアプローチが増えてきている。ヒートモードマスタリングとは、ビームスポットの中心部の高温領域と照射される反応層の熱特性の関係から反応層内に温度分布を生じさせ、その高温部において反応層の熱的な変形や変質等が起こり、ある反応温度を設定することにより、フォトンモードよりも高密度なパターンを形成できる技術のことである。

これまでにヒートモードマスタリングの発表例が数多く提案されてきている。それぞれの仕組みは原理や材料等に依存して異なっている。ヒートモードマスタリングを光ディスクの実用的なマスタリングに適用した先駆けとして、BD-ROMのマスタリングに使用されているphase transition mastering (PTM) があげられる²⁾。PTMでは、温度による無機材料である遷移金属酸化物の結晶化特性の変化を利用して微細パターン作製を実現している。図2に示すようなPTMマスタリング装置は波長405 nmの青紫色半導体レーザーダイオードとNA=0.95の対物レンズから構成されるため、装置が低コストである。安価な半導体レーザーと従来の光学系とでBD-ROMサイズのマスタリングが行える製造装置を量産ベースで実用化されている点では、産業上最も進んでいるといえる。

日立からは、やはり無機材料である相変化材料のGeSbTeを反応層として用いたphase change etching (PCE)方式の発表がなされた³⁾。これも相変化材料の結晶質と非晶質領域を温度コントロールして高温部のみのエッチング

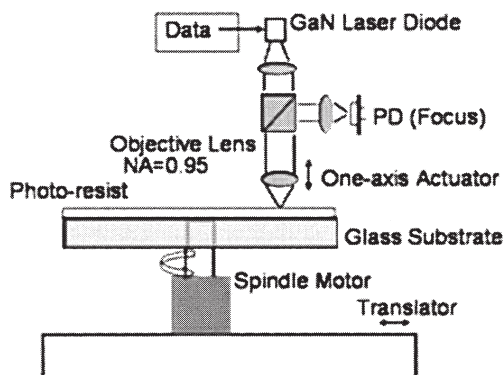


図2 PTM マスタリング装置.

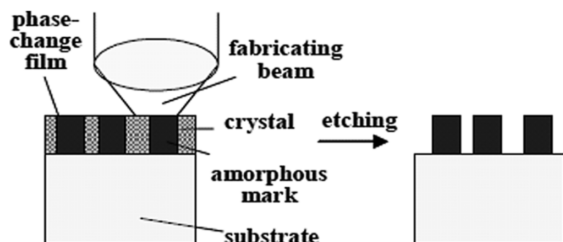


図3 PCE マスタリング概念図.

を行い除去することにより、微細なパターンを得るというものである。断面図を図3に示す。

シャープからは、機能材料の熱分解を利用した微細加工において、熱により樹脂層に直接パターンを形成するTDM (thermal direct mastering) 方式により、ピット形状の樹脂材料に対する依存性が示された⁴⁾。深紫外レーザー光学系 (波長 257 nm, $NA=0.9$) を用いて、反応層の材料として poly-hydroxy-styrene (PHS) 樹脂と無機カバー層を用い、40 nm のピット列を作製している。PHS 樹脂/無機カバー層は、円形ピットやランダムパターンの形成に適しており、一方ノボラック樹脂/無機カバー層は、高線速度の単一パターン形成に適している。このようなピット形状の違いについては、樹脂のガラス転移点と熱分解温度との温度差に起因している。ノボラック樹脂のほうが上記温度差が大きいため、ピット形成時にピット周囲に比較的広い溶融領域が存在することとなり、直後のピット形成によって、ピット形状が影響を受けやすくなる。高線密度の単一パターンは、高密度磁気媒体として期待されているパターンドメディア等に応用できる可能性がある。図4に説明図を示す。

これらの発表は光源波長こそ違うものの、従来型フィールド光学系 (対物レンズの $NA < 1.0$) での記録である。ヒートモード記録では、原理的には SIL (solid immersion lens), 短波長レーザー, 液浸露光技術との組み合わせ

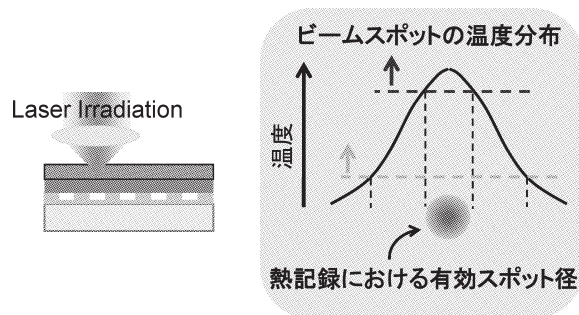


図4 TDM マスタリング説明図.

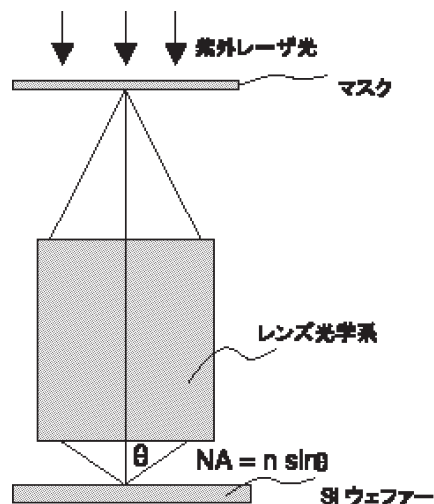


図5 一括露光装置.

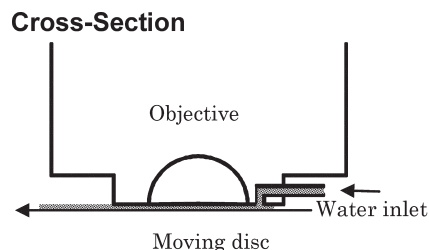
せも可能であり、より微細なパターン作製に向けて今後の検討も期待される。

3. 新規露光方式

半導体産業の微細加工技術の進展の中で生まれた新規露光方式として、超解像露光方式、液浸露光方式、ニアフィールド露光方式、近接場露光方式が挙げられる。

超解像露光方式は、resolution enhancement technology (RET) とよばれており、その代表的なものが位相シフト法である。これは、マスクパターンの隣同士の間隔を180度シフトさせ、電場の強度分布を二分することでリソグラフィーの解像度を2倍に向上させる方法である。位相シフト法は、繰り返しパターンへの適用に限られ、ランダムパターンへの適用は困難であるが、光源の波長は問わないので、種々の短波長レーザーをもつ露光装置に適用でき汎用性が高い。ただし、光ディスクに用いる場合には、図5で示す半導体で用いられるような一括露光方式とセットで導入する必要がある。

液浸露光とは、図6に示すように、通常の露光において



Bottom view

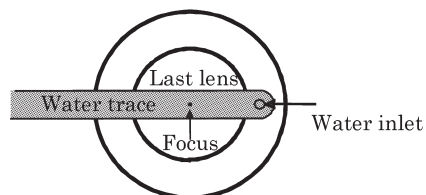


図6 液浸露光装置。

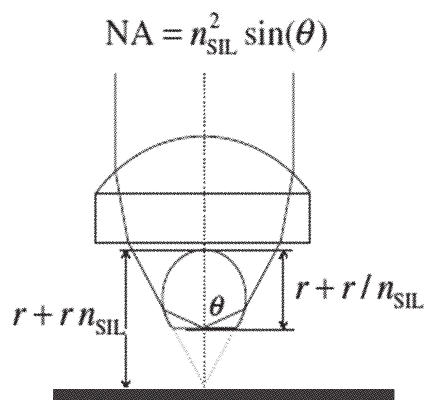


図7 ニアフィールド露光方式対物レンズ。

露光対象マスター原盤とレンズの間に空気層があるが、この部分に水などの高屈折率液を導入することで、露光時の解像度を向上し、またフォーカスマージンを拡大する露光技術である。入れる液体の屈折率を上げることで、露光時の開口度 (NA) が大きくとれ、解像度を上げることができる。フィリップス等で光ディスク用に検討している⁵⁾。

ニアフィールド露光方式は、ソニー等で検討されており、図7に示す対物レンズとして非球面レンズと超半球レンズ (SIL) を組み合わせた集光系を用いることにより、トータル1以上の高 NA を実現しており、高分解能露光を実現している⁶⁾。

近接場プローブ露光方式では、図8に示す金属ナノ探針をもつ近接場プローブを用いて近接場光を発生させ、可視光で高速に微小なピット形成を可能とする技術を、日立などで検討している⁷⁾。

パイオニア、ソニー等では、電子ビームを用いた露光装置の検討が行われており、一般的には、光マスタリングに

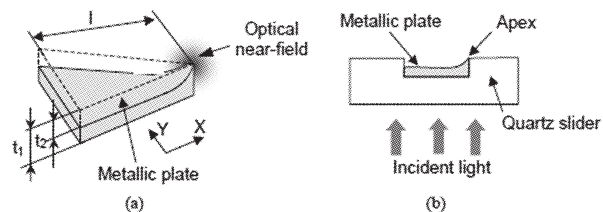


図8 近接場プローブ露光用プローブ。(a) 鳥瞰図、(b) 断面図。

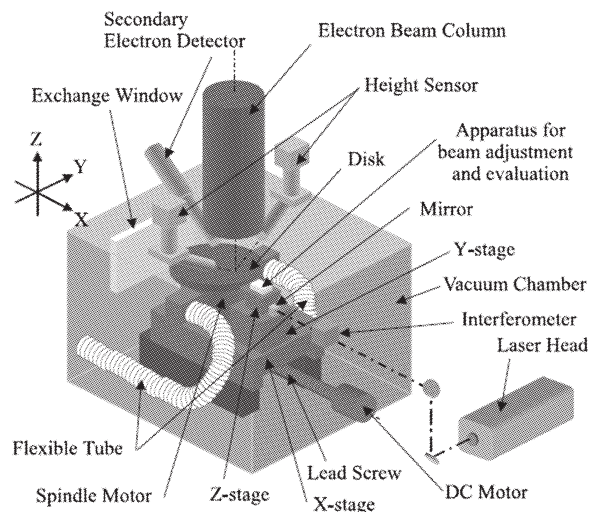


図9 電子ビーム露光装置。

対して高精細描画が優位点であるが、感度が低く生産性に乏しいという欠点がある。その問題点を解決するために、パイオニアでは、リターディング法を応用して、電子ビーム露光のスループット向上検討を行っている⁸⁾。記録ビームの大電流化、レジストの高感度化、電子ビームの低エネルギー化等により、記録感度の向上効果が期待できる。図9に装置構成を示す。

次世代光メモリーの高密度化は、今後ますます進展していくものと思われ、それに対応する微細化技術として新規露光方式を含む光学マスタリング技術、ヒートモードマスタリング技術、電子ビーム露光技術等が開発されていくであろう。特に、ヒートモードマスタリング、短波長レーザーと新規露光方式は組み合わせが可能であるため、より高解像度のマスタリングの検討に期待が集まる。これらの新規微細パターン形成技術の実用化には、開発初期段階からプロセスの再現性や安定性といったフィージビリティの検証が必要とされてきている。光学マスタリング技術においては、短波長化光源の開発とともに、周辺の光学系 (ミラー、レンズ、変調器等) の短波長対応設計、パワー不足対応、経時安定性、過渡応答性、人体への影響等が課題と

なる。ヒートモードマスタリング技術に関しては、材料熱物性の安定性、原盤材料構成の最適化、記録補償方式の開発等が課題となる。新規露光方式においては、超解像方式でのパワーロス、液浸露光方式における装置の大型化、ニアフィールド露光・近接場露光におけるワーキングディスタンスなどに解決すべき課題があると思われる。レジスト材料とのマッチング、パターンのマクロおよびミクロな精度や再現性、量産性を含めたトータルのプロセス確立が早期に実現されることが期待されている。

文 献

- 1) M. Takeda, M. Furuki, T. Ishimoto, K. Kondo, M. Yamamoto and S. Kubota: "Deep UV mastering with a write compensation technique realizing over 20 GB/layer capacity disc," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **39** (2000) 797-799.
- 2) A. Kouchiyama, K. Aratani, Y. Takemoto, T. Nakano, S. Kai, K. Osato and K. Nakagawa: "High-resolution blue-laser mastering using an inorganic photoresist," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **42** (2003) 769-771.
- 3) T. Shintani, Y. Anzai, H. Minemura, H. Miyamoto and J. Ushiyama: "Nanosize fabrication using etching of phase-change recording films," *Appl. Phys. Lett.*, **85** (2004) 639-641.
- 4) T. Sakai, I. Nakano, M. Shimo, N. Takamori and A. Takahashi: "Thermal direct mastering using deep UV laser," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **45** (2006) 1407-1409.
- 5) H. Santen and J. H. M. Neijzen: "Deep-UV liquid immersion mastering of high density optical discs," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **42** (2003) 1110-1112.
- 6) S. Imanishi, M. Takeda, M. Yamamoto, N. Mukai, K. Takagi and T. Kono: "Near-field recording with a 266 nm laser for disc mastering process," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **42** (2003) 1105-1109.
- 7) T. Matsumoto, Y. Anzai, T. Shintani, K. Nakamura and T. Nishida: "Writing 40-nm marks using a beaked metallic plate near-field optical probe," *Technical Digest of ISOM/ODS 2005*, ThA3 (2005).
- 8) M. Kobayashi, H. Kitahara, Y. Kojima, Y. Wada, M. Katsumura and T. Iida: "Application of retarding technology to electron beam recorder," *Technical Digest of Optical Data Storage 2006*, TuA2 (2006).

(2007年12月5日受理)