

## 論文の内容の要旨

論文題目 超微細ビーム露光技術を応用した光ディスク  
原盤マスタリングの研究

氏名 武田 実

1982年に発売されたCD(Compact Disc)から始まる光ディスクシステム(デジタル信号記録方式)は、1996年に録容量4.7GBのDVD(Digital Versatile Disc)が規格化され、現在デジタルAV機器の市場において最大の活況期を迎えている。DVDはSD(Standard Definition)品質の動画像と音声を2時間以上記録出来るデジタルAV用パッケージメディアだが、2003年には記録容量25GBでデジタル・ハイビジョン(HDTV)放送を2時間以上記録出来る、Blu-ray Disc規格が日欧韓の9社で纏められ、ソニーから初のハイビジョン用ディスクレコーダーが発売された。Blu-ray Discは、画期的発明である波長405nmのBlue-LD(Laser Diode)と、NA(開口数)を実用限界である0.85まで高めた対物レンズから成るピックアップ技術をはじめとする、光ディスク高密度化の要素技術が結実して実現されたシステムである。

光ディスクの高密度化は、光学ピックアップのレーザー短波長化、高NA化による光スポット径の縮小化、フォーカス、トラッキング等の高精度サーボ技術、記録再生信号を高効率で誤り無くデジタル化する信号処理技術などのドライブ(プレイヤー)サイドとともに、光ディスク基板上に微細なピット、グループを形成する技術、記録書換用の相変化膜等を成膜する技術などのメディアサイドが、車の両輪となって推進されてきた。このメディアサイドの主幹技術としてのマスタリング技術は、デジタル情報のキャリアであるピット、またはトラッキング用ガイドグループなどの微細構造が形成された、プラスチック製光ディスクを大量複製するためのマスタースタンパー(金型)を作製するプロセス技術である。

マスタースタンパーの基となるマスター原盤は、レーザービーム・レコーダー(LBR; Laser Beam Recorder)、またはカッティング装置と呼ばれるレーザー集光ビームを用いたレジスト露光(描画)装置を適用し、半導体製造と同様の感光性レジストを用いたリソグラフィプロセスにより作製される。従来のCD、DVD用のマスタリングにおいては、記録用レーザー光源に主にガス(イオン)レーザーが適用され、高NA(0.8~0.9)の対物レンズで集光し、レジストが塗布されたマスター原盤上に、スパイラル状に配列された微細なピットパターンを形成していた。この情報ピットの解像限界は、記録用レーザーの波長が短い程高くなるが、青色から近紫外域に発振線を持つAr、Krのガスレーザーでは、実用的パワーが得られる最短波長は351nmに留まり、また対物レンズのNAも0.95程度が最大であり、CDサイズでは15GB容量に対応する0.25 $\mu$ m程度のピットサイズの記録が限界とみられていた。

この限界を突破するため、DeepUV(遠紫外線)波長で発振するレーザーの開発が進められたが、1992年ソニーでNd:YAGレーザー(波長1064nm)の第4高調波である266nm波長において、100mW

とカッティング装置として実用的なレーザー出力の達成に成功した。この方式の DeepUV レーザーは従来のアーク放電型ガス(イオン)レーザーのように大量の冷却水が不要で、全固体で構成することが可能であり、超精密な機構制御系を駆動するカッティング装置への適用において、冷却水による振動を完全に抑制出来ることが大きなメリットとなる。

筆者は 1993 年からこの 266nm レーザーのアプリケーション開発に関わり、最初に半導体露光装置への応用として、DeepUV ステツパー光源への適用を試みた。400mW 出力の 266nm レーザーを用い、レーザー光のスペックルを除去、有効露光エリアで照射密度を均一化する照明光学系、ウェハー上にマスクパターンを縮小投影する対物レンズ、精密 XYX ステージなどから構成されるステツパー型露光実験機を開発した。この DeepUV ステツパー実験機により最小  $0.26 \mu\text{m}$  のライン&スペースパターンの解像性能を確認し、266nm レーザーのステツパー光源としての適用可能性に目処をつけた。

次に DVD の次世代を担う高密度光ディスクの開発に携わり、全固体 266nm レーザーのカッティング装置への適用検討を行った。Figure 1 にカッティング装置の光学系構成を示す。光学系は、266nm 波長に対応する光学デバイス、材料を選定評価し構築したが、高 NA(0.9)の対物レンズが最大の開発要素であった。266nm レーザーは発振波長幅が狭いためレンズ材の波長分散による色収差を考慮することなく、単一硝材で対物レンズを構成出来る。しかし当初光学メーカーにより試作された 0.9NA の合成石英製多群レンズは球面、コマ収差などが大きく、集光ビームを回折限界以下に絞れなかった。その後レンズ評価用のレーザー干渉計が開発されたことなどで、レンズの精確な評価、そのフィードバックによる改良設計、製作が可能になり、並行して検討を進めてきた DeepUV 対応マスタリングプロセスと組合せ、 $0.2 \mu\text{m}$  以下のピットパターンの解像を確認した。そして 266nm レーザーを適用したカッティング装置と対応する DeepUV マスタリング技術により、CD サイズで 20GB 以上容量に対応する高密度記録が可能なることを初めて示した。Figure 2 には、CD、DVD と 20GB 記録密度に対応する ROM のピットサイズと、対応する再生用光学ピックアップの集光スポットサイズ同一縮尺で比較した模式図と、実際にディスク上に形成されたピットパターンの SEM イメージを同一倍率で示す。記録密度では、CD から DVD で約 5 倍、DVD から 20GB 密度で約 4.5 倍の向上である。

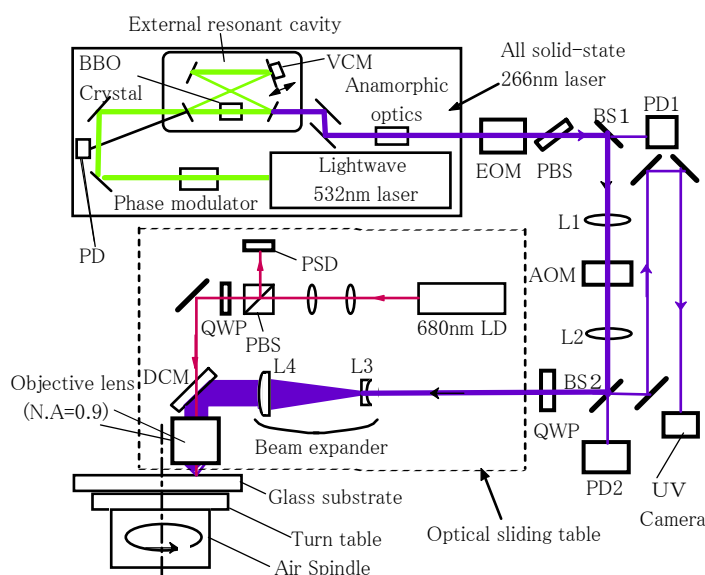


Figure. 1 Schematic figure of 266nm laser recording optics

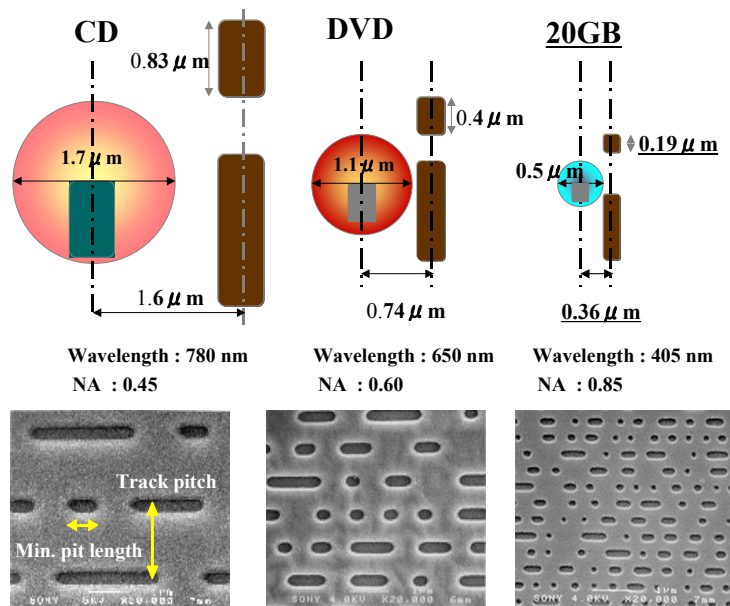


Figure. 2 Comparison of readout spot size and pit patterns of CD, DVD and 20GB density disc

本技術は、その後装置及びプロセスの安定性、信頼性向上など実用化検討が進み、先述した Blu-ray規格に準拠した 25GB 記録容量の RW タイプ(記録再生書換型)ディスク基板の生産に導入され、トラックピッチ  $0.32 \mu\text{m}$  のトラッキング用ガイドグループが形成されたマスタースタンパー製造に適用されている。

先述したディスク世代間での 4~5 倍の高密度トレンドを延長すると、Blu-ray Disc の次の世代では記録容量で 100~125GB が待望され、ROM のピットサイズでは 100nm を切るナノテクノロジー領域に突入する。このようなナノスケール微細加工は、DeepUV マスタリングでは到底実現困難で、電子ビームを適用したマスタリング技術の導入を考えた。この技術については、1990 年代前半からパイオニア社が先駆的研究を行い、真空チャンバー中にレジストマスター原盤、及び原盤を回転移動する機構系を設置し、レジスト露光する方式の電子ビームカッティング装置について学会等で発表を行っていた。

筆者は 2000 年に、このような真空チャンバー中でレジスト原盤を露光する方式とは全く異なり、大気中において原盤を回転移動し、電子ビーム露光される近傍のみ局所的に高真空に保持する方式である、局所真空方式電子ビームカッティング装置の開発に着手した。本装置の構成図を Figure 3 に示す。

独自開発された差動排気ヘッドと呼ぶエア浮上パッドを電子鏡筒(カラム)下端に取付け、原盤上で約  $10 \mu\text{m}$  程度のギャップを保って浮上させ、一方で電子カラムから出射される集束電子ビームの近傍においては、真空ポンプによりギャップ部分を排気する。ビームが原盤に照射されるパスの部分に  $10^{-3}\text{Pa}$  以下のビーム散乱が無視出来る真空度に保持することで、数 10nm の集束電子ビーム露光を大気中で可能にした。スピンドル、スライド等精密機構系を従来のレーザービーム・カッティング装置と同様に大気中に設置出来るため、原盤の高速回転と高精度駆動を両立して実現可能である。

また本装置の EB カラムは、TFE タイプで最大加速電圧 15KV の電子銃を用い、電子ビーム露光装置としては比較的低い加速電圧と、適切な電子光学系パラメータの設定、原盤の高速、高精度回転、及び高感度の化学増幅系レジストの適用により、パターン解像力を保持しながら、従来方式に比較して、飛躍的に高い生産性の電子線マスタリングを実現した。

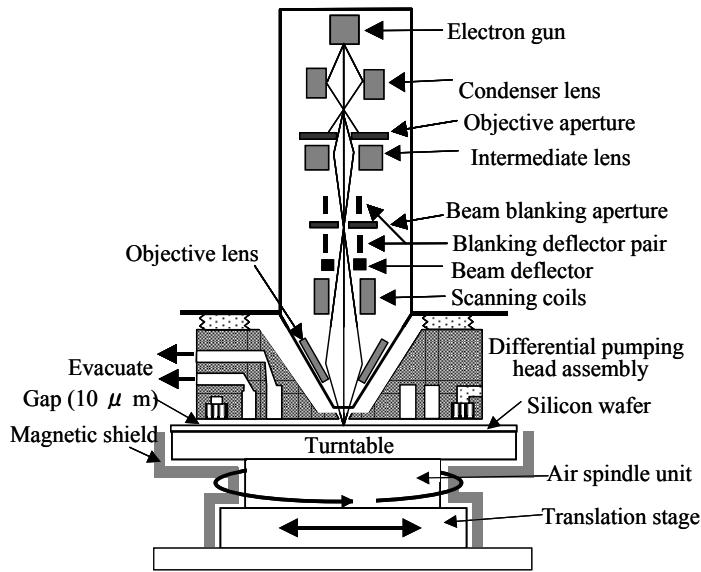
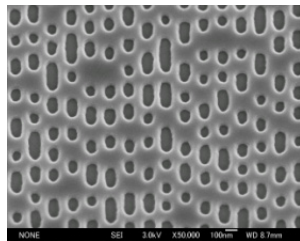
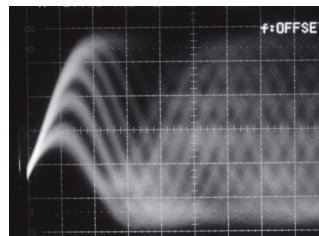


Figure. 3 Electron beam recorder with localized vacuum method

この新方式電子ビームカッティング装置と、適合するマスタリングプロセスの開発を進めた結果、2003年にCDサイズ100GB相当密度のROMピットパターン(トラックピッチ160nm、最短ピット長87nm)を形成、波長405nmでNAを2.05に向上させた近接場光学方式のピックアップにより信号再生を初めて実現した。Figure 4に100GB密度のピットパターンと再生アイパターンを示す。



100GB pit pattern  
(70Gbit/in<sup>2</sup>:EFM Plus)  
Track pitch=160nm  
Min. pit length=87nm



Eye pattern of RF signal  
Readout near-field optics  
 $\lambda=405\text{nm}$   
NA=2.05

Figure. 4 100GB density pit pattern and readout signal using a near field optical pickup

当初の検討に用いたディスクは、8インチ・シリコン基板上にエッチングで形成されたピットを有するシリコン製ディスクであり、近接場光学ピックアップにより数10nmのギャップを介してダイレクトに表面再生された。現在は100GB超記録容量光ディスクの実用化を目指し、従来と同様のプラスチック製成形ディスクを電子ビームマスタリングの適用により製作し、近接場光学ピックアップで記録再生する検討が続けられている。