

## レーザー光学素子技術とその応用



實野 孝久\*

## Recent progress in laser optics and its applications

Key Words : Laser damage, optical coating, diffraction gratings, short pulse laser

## はじめに

本稿を執筆する機会を頂いたので、大阪大学レーザーエネルギー学研究中心(以下、センターと略す)で開発している特殊な光学技術の紹介をさせて頂きたい。センターは昨年(2004)の4月まで、レーザー核融合研究センターという名称であったが、その名が示すように大型ガラスレーザーを用いて慣性核融合実験を行うことを主な研究課題とする組織であった。そのため、センターでは10kJを越える大型の固体レーザーについての多くの基礎的な技術開発を行って来た。核融合実験用レーザー装置<sup>1)2)</sup>は繰り返し時間が数時間に1回と非常に遅いけれども、そのピークパワーは1ペタワット(Petawatt: PW=10<sup>15</sup>W)に達し<sup>3)</sup>、そのエネルギーも10kJを越える値である。ピークパワーのみならず1PWに達する装置は幾つか世界に存在するが、10kJという大きなエネルギーを持つ高ピークパワーレーザーはこれまでに建設されていない。この高エネルギー・高ピークパワーのレーザー開発がセンターの現在の大きな開発課題である。また、センターでは極端紫外線露光(EUV)用の高繰り返し・高エネルギー固体レーザーの開発も進められており、半導体レーザー(LD)励起の固体レーザーで出力5kWを目指している<sup>4)</sup>。

本稿では著者が関わっている高エネルギーガラスレーザーのための要素光学技術とその応用について

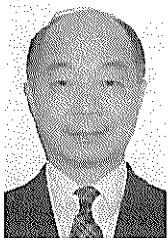
紹介する。

## 高出力レーザー用光学素子

核融合用レーザーでは、高いエネルギーを出すことが必要であるため、活性媒質の量が大きくなることと、後で述べるレーザー損傷の問題からビームの直径は大きくなり、ビーム本数も多くなる。従ってこのような大型レーザーでは、大きな口径でレーザー損傷耐力の高い光学素子を準備することが要素技術の基本となる。特に大口径と高耐力を同時に達成しないといけない点に高出力レーザー技術の困難さがあると言える。以下にレーザー損傷の機構と高耐力化、波面制御技術を中心に、最近のレーザー光学素子技術のトピックスを述べる。

## レーザー耐力

光学素子にレーザー光が当たると、素子の表面や内部でレーザー光の電界や熱によって物質の破壊が発生する<sup>5)6)</sup>。このレーザー損傷の最小発生強度は損傷閾値<sup>7)</sup>(damage threshold: DT)と呼ばれ、レーザー用光学素子の重要な性能指数となっている。レーザーによる破壊は、ガラスや結晶などの内部で生じる内部損傷が物質固有の物性値で決まるのに対し、表面では研磨状態や不純物などの影響を受けるため、内部損傷に対して1/2~1/3の値となっている。また、通常の光学素子はほとんどがその表面に光学薄膜をコートすることにより反射率を制御しており、高反射膜や反射防止膜、偏光子(ポラライザー)などとして使われている。これらの光学薄膜では、コーティングの性能により大きく損傷耐力が異なっており、レーザー装置における脆弱な部分となっている。従って、従来からコーティングの高耐力化は重要課題であり、数多くの研究開発が行われてきた。これらの努力の結果、高反射膜では標準的な20J/cm<sup>2</sup>(1ns)



\* Takahisa JITSUNO  
1948年4月生  
1981年甲南大学理学部自然科学研究科博士後期課程修了  
現在、大阪大学レーザーエネルギー学研究中心、助教授、理学博士、レーザー光学、レーザー物理学  
TEL 06-6879-8768  
FAX 06-6877-4799  
E-Mail jitsuno@ile.osaka-u.ac.jp

を越えて100 J/cm<sup>2</sup>に達する成果も報告されている<sup>8)</sup>。しかし、大型の光学素子では欠陥等が存在する確率が増えるため、あまり高い値は期待できない。

そこで最近では、たとえ損傷が入っても、その損傷が広がらなければ光学素子として使用できることから、functional damage threshold(FDT)という概念が米国のLaurence Livermore国立研究所などで導入されている<sup>9)</sup>。従来の損傷耐力(DT)は、レーザー光のパルスを試料の場所を変えながら当てた場合(One-on-One)に損傷が入るレーザー光のエネルギー密度を言うが、実際のレーザー装置では微細な損傷が入ってもその損傷がその後のレーザー光の照射により成長しなければ、光学素子は使用し続けることができる。これまでの観測でも通常の損傷を発生した部分に少し強度を上げてレーザー光を照射しても損傷が成長しない領域が存在していた。さらに強度を上げるとある値(FDT)から損傷が成長を始めることが確認されている。そのため、試料に損傷発生後もレーザーを照射し、その損傷が成長し始めるFDTを計測した。その結果を図1に示す。FDTは通常のDTの約1.5~2倍の強度に達しており、FDT以下では小さい損傷が発生してもそのまま使用が継続できることが判明した。FDTを越えると損傷は拡大し、装置での使用は出来なくなる。実際の装置使用を考えた場合、このFDTという概念は

実用的と言えるが、その実態は良く判っていない。このFDTの物理的な意味を解明するため、レーザー光の強度を同一点で徐々に上げる照射法を採用した。これはR-on-Oneと呼ばれる照射法で<sup>10)</sup>、このような照射法を用いることにより試料内の不純物が徐々に蒸発し、損傷耐力が向上することが知られていた。実際の照射でもR-on-Oneでは確かにFDTまで損傷が生じず、その後は照射に従って拡大することが判明した。この現象でFDTは説明できるかに見えたが、さらに実験を続けた結果、R-on-Oneで照射しても従来のDTで損傷する試料が見いだされた。この場合でも損傷の成長はFDTを越えてから起こるため、DTにおける損傷は膜の構造的な欠陥に起因していると考えられる。従来から膜形成の初期に基板表面に付着した粒子状物質をコアとし、積層膜の形成中に凸レンズ状の構造が生じることが知られていた<sup>11)</sup>。このような構造ではレーザー光は基板近辺に集光され、一定の強度で破壊を生じる。レーザーの強度がDTを少し上回った場合にはこの構造による破壊でレンズ構造がくさびのように取れることが知られており<sup>11)</sup>、その後はFDTに達するまで損傷は成長しない。実験により観測した2つの例は各々不純物による損傷と構造欠陥による損傷を示していると考えるところまでき説明できる。これらの研究により、膜の損傷閾値についての理解が深まった。

照射フルエンス

ショットごとのサイトの様子

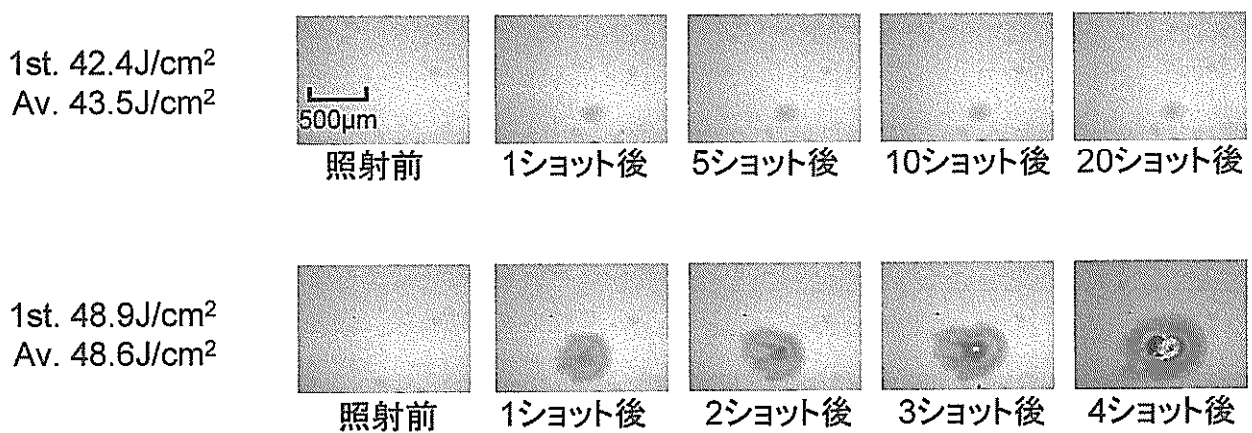


図1 レーザー損傷の多重ショットによる成長  
パルス幅3.8nsのレーザー光を損傷閾値(DT)28.2 J/cm<sup>2</sup>のミラーに照射。  
FDT(43.2 J/cm<sup>2</sup>)を超えると損傷は成長する。

コーティング

これまでセンターでは小型の蒸着装置を使用し、蒸着膜の性能向上を図ってきた。その結果、通常の蒸着薄膜についてはほぼ実用に耐える損傷耐力や光学特性のレベルに達しているが、今後の超短パルスレーザーに多用される大型反射鏡や回折格子では、使用環境が真空中となるため、特別の配慮が必要となる。一般的に、蒸着で作成した光学薄膜は柱状構造をとり<sup>12)</sup>、空気中の水分を吸着しやすい。成膜時は真空中であるため、蒸着装置から取り出した直後から大気中の水分との反応で経時変化を起こし、数週間程度の時間で屈折率などの光学特性や膜応力などが変化する。これまでの光学薄膜はこのような大気中での使用を前提としてきたため、真空中に長期に置かれると膜内の水分が抜けるため、膜の応力(主に張力)が増加する傾向にあった。張力が50MPaを越えると膜に亀裂が入る可能性が生じるため、膜応力を許容範囲に保つ必要がある。この膜応力は使用条件と基板材料、蒸着物質、蒸着条件によってさまざまに変化するが、これまでは主にBK-7などの光学ガラスに大気中での使用に耐えるような成膜が行われてきた。その一例を図2に示す。しかし、大型レーザー装置のパルス圧縮に使用する光学素子は真空中で使用する必要がある。また、最近、パルス圧縮用の回折格子では、わずかな基板の伸び縮みでも回折角が大きく変化することが判明し、線膨張係数

の大きい光学ガラスが使用に適さないことが明らかとなった。従って、このような条件下では線膨張係数の小さい石英ガラス等が適しているが、石英基板では真空中で膜応力が大きくなることが知られており、成膜条件を最適化する必要が生じた。これまでに、膜応力は蒸着条件だけではなく、成膜法によっても大きく変化することが判っている。特に蒸着中に加速したイオンビームを照射するイオンアシスト成膜(Ion Assist Deposition : IAD)では膜密度が上がり、応力が圧縮側に傾くことが知られている。このため、真空中で使用する石英基板に対してはIADを使用する必要があるが、IADでは膜密度が上がるために膜内にわずかでも不純物を含む場合、それらがレーザー光で蒸発する時に周りの膜を破壊してしまう。従来の蒸着膜の場合には膜が多孔性であったために、レーザー光の照射条件によっては膜の破壊を生じることなく不純物が蒸発により除去された。しかし、IAD膜では膜密度が高いために不純物の蒸発が起こると膜構造の破壊が生じることが知られていた。従って、IADを行う場合のイオンビーム電流を制御して、膜応力を小さくすると共に膜密度を上げすぎないようにして成膜する必要がある。また、イオン銃に使用するフィラメントやグリッドの金属が不純物として紛れ込むのを防止する必要があり、特殊な高周波励起のイオン源を使用するなどの工夫が必要である。このような工夫により大型の基板に、小さい応力の損傷耐力の高いコーティングを作成できると考えられる。

波面制御

大型のレーザー装置では、数百におよぶ光学素子が使用されるため、各々の素子を注意して製造しても、積算するとそれなりの波面収差を含んでしまう。従って、良好な集光特性を得るためには、個々の素子の波面収差を厳しく管理する必要があるが、大型光学素子ではその価格が跳ね上がることになる。従って、現実的な解決策としては、装置の要所に可変形ミラーや反射型位相変調器などの波面を補正する光学素子を挿入し、収差が大きくなる前に補正を行う必要がある。しかし、この波面補正には注意を要する点が幾つかある。

- 1) 波面補正素子が高価であること。
- 2) 補正できる収差の次数に制約があること。

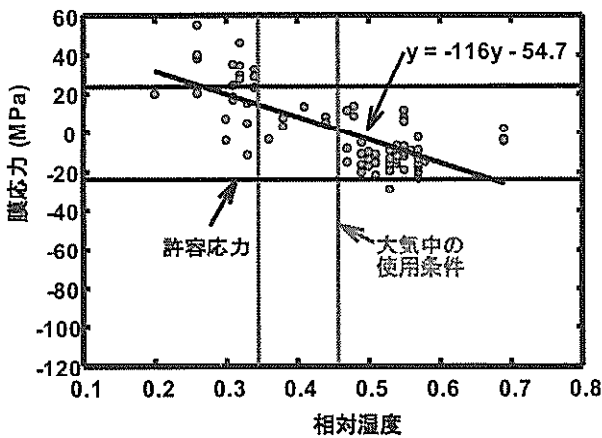


図2 電子ビーム蒸着で作成した膜応力の湿度による変化。基板：BK-7 (米国 Vacuum Process Technology 社データ)

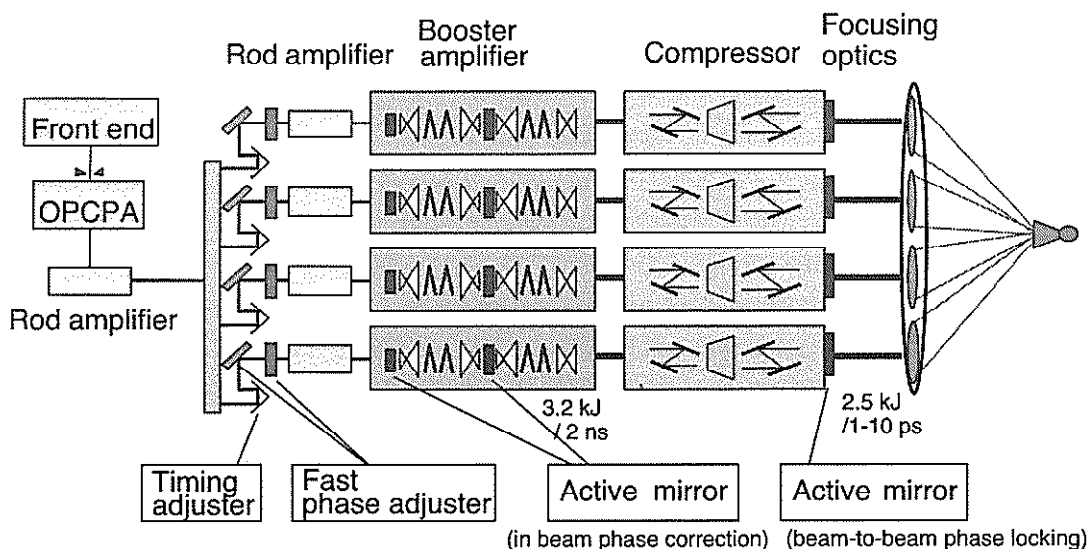


図3 高速点火用レーザーの機器構成

- 3) 波面の補正を行う駆動機構に固有の誤差と時間的な変化を生じること。
- 4) 補正すべき収差源とそれを補正する波面補正素子および波面計測系の観測面が結像共役面になければ正確な補正が困難であること。

特に最後の課題は正確な補正には必須である。また、価格の安い小口径の補正素子で後段部のビーム径の大きい部分の収差を補正しようとする、上流部ではビーム径の拡大率だけ波面の傾きが大きくなり、上流部に大きな収差を生じて装置にレーザー損傷を生じる可能性があるため注意を要する。

現在建設を進めている高速点火実験用レーザー装置では予算計画によって整備していくが最終的には各ビームに3枚の変形ミラーと、ビーム間の相対位相差を補正するための高速駆動が可能な Tip-tilt-Pistonミラーを上流部に設置する計画である<sup>13)</sup>。図3に装置の構成図を示す。このミラーは各ビームの指向性の変化や相互の位相変化を補正するため、ミラーのピストン位置や傾きを数十Hzで制御することを目指しており、分離した4本のビームをあたかも1つのビームとなるように絞り込むビーム結合を行うことに使用される。

### 回折格子

高速点火実験では従来の核融合爆縮に加え、燃料の温度を上げて核融合反応を促進するために、燃料

が圧縮された時点でパルス幅の短い高速点火ビームを打ち込み、圧縮コアの温度を上げることを行う。このため、10 kJ程度の高エネルギーでps程度のパルス幅を持った追加熱ビームを、正確なタイミングと集光状態で打ち込む必要がある。しかし、このような高いピークのレーザー光は増幅器の中で非線形現象を起こして伝搬できない。この問題を回避するため、増幅されるレーザー光のパルス幅を回折格子の波長分散特性を用い、波長に従った遅れ時間を与え、パルス幅を伸長してから増幅するChirped Pulse Amplification(CPA)方式が採用されている<sup>14)</sup>。増幅された時間的に波長がスイープしていくレーザー光を、大型の回折格子を用いてパルス幅伸長時と逆の光路長差を付けることで元の短いパルス幅で高いエネルギーのレーザー光を得ることが出来る。このパルス圧縮には90 cmを越えるような大型の回折格子を2枚組み合わせ、10 nmの相互位置精度で組み合わせることで約2mの回折格子を形成する予定である。この組み合わせ実験はすでに小型の装置で実証されているが、大型装置ではこれから実験する必要がある。

このパルス圧縮に使用される回折格子にはいくつか特殊な高い性能が求められている。まず、この回折格子には短いパルス幅で高いピークパワーの光が当たるため、回折格子は高いレーザー損傷耐力を持たなければならない。これまでに報告されている耐

力は1psのレーザー光(波長1.05  $\mu\text{m}$ )に対して3J/cm<sup>2</sup>であるが、最近では5J/cm<sup>2</sup>という例も報告されている。次にこの回折格子は真空中で使用されるため、基板表面に積層される誘電体反射膜の応力が大きくなる傾向があり、これに対応した成膜を行う必要がある。膜応力が圧縮の場合は膜の剥離が、引っ張りにはクラックが発生する。また、回折光子の刻線密度が僅かに(0.5ppm)異なっているだけでも、レーザー光の回折角は敏感に変化するため、圧縮したレーザー光の集光パターンがばらばらになるという大きな問題がある<sup>15)</sup>。この対策としては回折格子の溝を書き込む方法を改善すると共に、基板として線膨張の小さい石英を使用する。回折格子の露光方式にも新機軸を導入する必要がある。これまでの大口径ビームの直接露光法では空気の圧力や温度、湿度の変化があるため、大気屈折率が変化して書き込み用のレーザー光の波長が変化し、干渉縞の間隔がわずかに変化していた。また、露光用レーザーの縦モード変動による波長変化もあり、0.5ppm(1740本/mmに対して1740.001本/mm)以下の刻線密度の再現性が得られなかった。この刻線密度の差は非常にわずかであるが、レーザー光を回折する角度が70°程度と大きく、回折角は刻線密度に比例するため、このようなわずかな差でも2  $\mu\text{rad}$ 程度の回折角の誤差を生じ、複数回の反射で10  $\mu\text{rad}$ 程度の角度差を

生じる<sup>15)</sup>。レーザー光を集光するミラーの焦点距離が4mであるため、集光点では40  $\mu\text{m}$ 程度のずれとなり、回折限界を大きく越えて集光スポットが分離してしまう。この課題を克服するには組み合わせる回折格子の角度を調整し、回折光の出射角が等しくなるようにすることが可能である。しかし、センターでは使用する回折格子の数を半減させるために、同じ回折格子に反対方向からレーザー光を入射する2方向入射方式を採用しており、角度補正の方向が逆になるため、この角度補正法が使用できない。この様子を図4に示す。従って、回折格子の刻線密度を

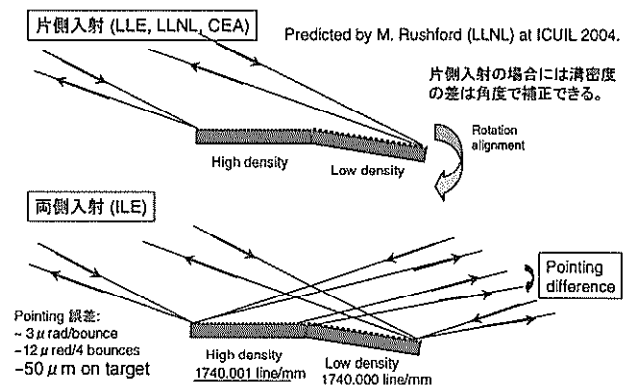


図4 回折格子の刻線密度の僅かな差(0.5ppm)がビームに大きな影響を与える。

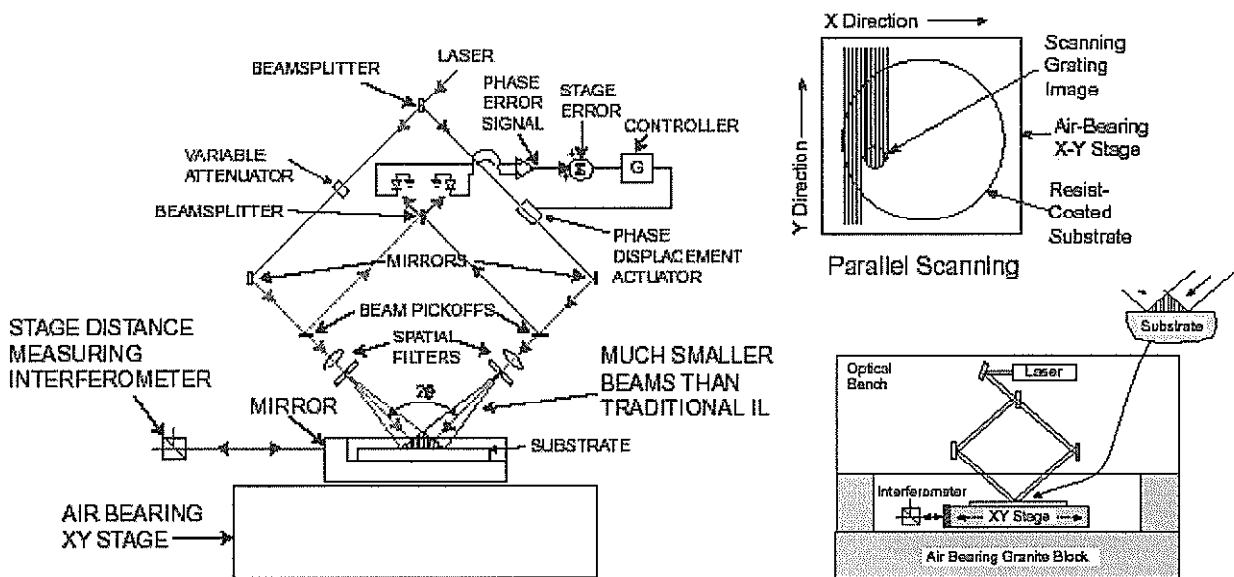


図5 MITで開発されたナノルーラーによる精密回折格子の作成法

上記の1/10以下になるように高精度化することが求められる。この要求は従来であれば不可能と言える再現性であった。

このように非常に差し迫った状況下ではあったが、幸いにもマサチューセッツ工科大学(MIT)のDr. M. Schattenburgが独創的なナノルーラーと呼ばれる回折格子露光法を考案しており<sup>16)</sup>、また、幸いにも今回のプロジェクトの一部を担っている米国の蒸着機メーカーのVPT(Vacuum Process Technology)社がこの新しい露光法を用いて大型高精度回折格子を製作する新企業を設立したいとの意向であったため、彼らと密接に協力して開発を進めることにした。この新しい露光法では従来の大口径の露光ビームに替え、直径1mm程度の小口径のビームを干渉させ、大型基板をステージに載せて移動させながら露光する。ナノルーラーの原理図を図5に示す。この時ステージの位置を高精度の干渉計で測定してその位置誤差をnmの精度で読み取り、書き込む干渉ビームの位相をリアルタイムで補正する。この補正もある程度の誤差を含むが、実際の書き込みは10回程度の重ね書きとなるため、実測で3nm程度の溝の位置精度が出せている。これまでは30cm程度の薄いウエファーに露光していたが、現在長さ100cmを越えるステージを準備しており、大型回折格子の製作に着手しつつある。この新しい露光法では、刻線密度の精度はステージの位置の読み取り精度(公称値0.3nm)で決まるため、従来より1桁高い刻線密度の再現性(0.05ppm)が得られる。作成された回折格子の写真を図6に示す。この方式の採用により、長さ90cmを越える大型石英基板に高精度回折格子を作成できる見通しができた。1年以内に試作品が

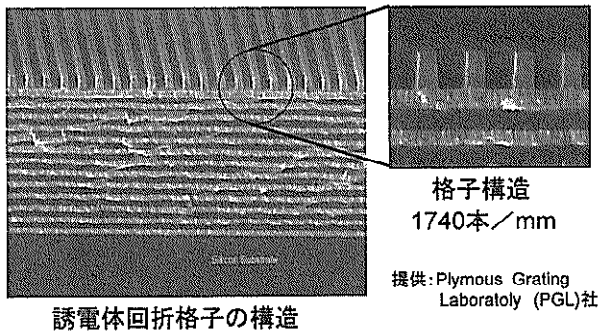


図6 ナノルーラーで作成された回折格子の構造

出来上がる予定である。

### その他の応用

現在までセンターでは上に述べたような高度な光学素子技術を開発してきたが、これらは形を変えると産業機器にも広く使用できる。たとえば、半導体レーザー(以下LDと略す)は電気・光変換効率が50%以上という非常に高い効率でレーザー光を発生するが、その出力光の波面が悪いために精密に絞込めなかった。波面計測と制御の技術を用いれば、LDを精密に集光し、単一モードで1W程度の出力でも金属加工が可能となるような安価な装置が作成できる。特にセンターでは短波長紫外線レーザーを用いて光学樹脂の表面をnmの精度で除去するレーザーアブレーション整形と呼ばれる技術を開発しており<sup>17)</sup>、これによって高精度に波面を制御したLDを開発しており、数ミクロン程度の微細加工に適用する予定である<sup>18)</sup>。この他、レーザー光の波面測定的应用から、単一モード光ファイバーにコリメータレンズを精度良く取り付けることが簡単に出来るため、部品の精度を大幅に落とせるので非常に安価なファイバーコネクタを開発できると考えられる<sup>19)</sup>。いずれ、センターを起源とするLD微細加工機やファイバーコリメータ/コネクタが世の中に普及することになれば幸いである。

### おわりに

センターで開発しているレーザー用光学素子技術は、高いエネルギーと短いパルスという特殊な用途に対応したものであるが、基盤となる技術は他の多くのレーザーの用途や一般産業用光学機器にも援用可能であり、高精度かつ高耐力の光学素子の製造技術や波面の計測・制御技術は幅広い波及効果を持つと言える。このような技術を多くの分野に普及することも、センターの重要な役割であると考えていることを述べ、この稿を終える。

### 参考文献

- 1) J. J. Duderstadt and G. A. Moses; "Inertial Confinement Fusion", John Wiley & Sons (1982) 219.
- 2) 山中千代衛; レーザー研究11(1983)586.
- 3) Y. Kitagawa, H. Fujita, R. Kodama,

- H. Yoshida, S. Matsuo, T. Jitsuno, T. Kawasaki, H. Kitamura, T. Kanabe, S. Sakabe, K. Shigemori, N. Miyanaga, and Y. Izawa *IEEE J. of Quantum Electron.*, **40** (2004) 281.
- 4) 中塚正大, 藤田尚徳, 吉田英治, 椿本孝治, 藤本 靖, 本越伸二, レーザー研究 **32**(2004)763.
  - 5) W.H.Lowdermilk and D.Milam, *IEEE J. Quantum Electron.* **QE-17** (1981) 1888.
  - 6) T. W. Walker, A. H. Guenther and P.E.Nielsen, *IEEE J. Quantum Electron.* **QE-17** (1981) 2041.
  - 7) ISO 11254, ISO 11254-2
  - 8) J. Dijon, B.Rafin, C.Pelle, J.Hue, G.Ravel, and B.Andere, *Laser-Induced Damage in Optical Materials 1999*, Proc. SPIE Vol.3902 (2000) 158.
  - 9) F. R. Genin, C. J. Stolz, M. R. Kozlowski, *Laser-Induced Damage in Optical Materials 1999*, Proc. SPIE Vol.2966 (1997) 273.
  - 10) M. E. Frink, J. W. Arenberg, D. W. Mordant, S.C.Seitel, M.T.Babb, E.A.Tepo, *Appl. Phys. Lett.* **51** (1987) 415.
  - 11) M.C.Staggs, M.Balooch, M.R.Kozlowski, W.J.Siekhaas, *Laser-Induced Damage in Optical Materials 1991*, Proc. SPIE Vol.1624 (1992) 375.
  - 12) K.H.Guenther ; *Appl. Opt.*, **23**(1984)3806.
  - 13) T. Jitsuno et al., *International Conference on Ultra-high Intensity Lasers (ICUIL 2004)*, Lake Tahoe, CA, Oct. 3-7, (2004).
  - 14) D.Strickland and G.Mourou, *Opt. Comm.* **56** (1985) 219.
  - 15) M.C.Rushford, et al., *International Conference on Ultra-high Intensity Lasers (ICUIL 2004)*, Lake Tahoe, CA, Oct. 3-7, (2004).
  - 16) M. H. Lim, J. Ferrera, K. P. Pipe and H. I. Smith, *J. Vac. Sci. Technol. B* **17** (1999) 2703.
  - 17) T. Jitsuno, K. Tokumura, N. Nakashima and M. Nakatsuka, *Appl. Optics*, **38** (1999) 3338.
  - 18) T. Jitsuno, K. Tokumura, K. Kazama, *Laser Precision Manufacturing (LPM) 2003*, Munchen, Germany, June 21-24, (2003).
  - 19) T. Jitsuno, K. Tokumura, *Optical Fiber Conference (OFC) 2004*, Los Angeles, CA, Feb. 22-27, (2004).

