

超短パルスレーザーを用いた高いアスペクト比加工の研究

米田研究室 吉田 侃生

1. はじめに

超短パルスレーザーは現在産業面において半導体の製造過程や透明物質の内部加工など様々な加工に用いられている。それは超短パルスレーザーが持つパルスの時間幅の短さと高いピーク強度が加工において多くのことを可能にしている。

時間幅の短さは加工部周辺に熱によるひび割れなどが発生しない加工や高速現象の観測を行うことができ、高いピーク強度は中心の強度の高い部分を用いた波長以下の微細加工や多光子吸収等の非線形現象による透明物質内部への加工などに応用されている。

透明物質内部の加工は、集光点のみで加工を行うには集光点以外では物質を破壊せず、集光点のみで破壊する必要がある。これらを実現するにはパルスの時間幅の制御と波面の制御が必要である。超短パルスレーザーの増幅器内では高いエネルギーはレーザー媒質に光学的な歪みを生じ[1]光学素子などにより収差が生じてしまうため波面に歪みが生じてしまう。また加工対象であるガラス自体の屈折率により収差がでてしまうためそれらを考慮しなければ、球面収差を持った波面は集光時に集光点を大きくしてしまうため加工精度を低下させてしまう。また超短パルスレーザーのパルス幅は分子の振動周期と同程度であるため、それを利用することで光と物質の相互作用を制御することが可能である。[2]しかし光と物質の相互作用は複雑で、加工に最適な波形は未だ多くの場合知られていない。そしてこの時間的、空間的位相の加工における互いの関係も知られていない。

前述した時間的、空間的位相のどちらかをそれぞれ最適化させたパラメータを組み合わせることで最適な加工条件になるかもわからないため同時に最適化を行うことができるシステムが必要であると考えた。

そこで本研究では超短パルスレーザーの光の時間的、空間的な位相制御を行い非線形加工における最適化を目標とした。本論文ではパルス圧縮用回折格子の間隔を制御した分散制御や直径の異なる分散制御板を用いたビームの径方向による時間的位相の最適化、形状可変ミラーを用いた空間波面制御システムによるベッセルビーム加工最適化を行った。

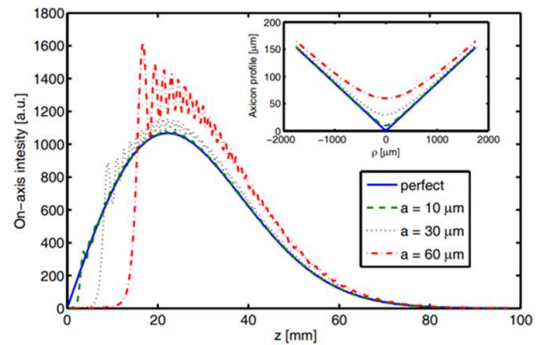


図 1 アキシコンレンズのエラーによるベッセルビーム強度分布の変化[2]

2. 分散制御実験

実験には RegA9000 を使用した。このレーザーは 250kHz パルス幅 300fs 平均出力 500mW で運転することができる。

はじめにコンプレッサーのグレーティング間隔を変化させガラス内部の自己位相変調による発光の変化を調べた。

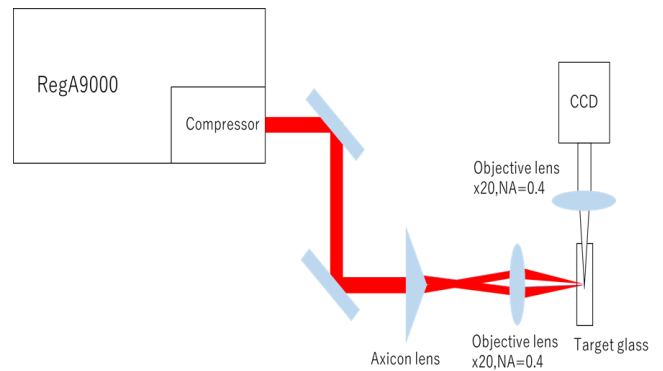


図 2 実験セットアップ

ベッセルビームを 20 倍、NA=0.4 の長作動距離対物レンズで側面研磨されたスライドガラス内部に集光し、側面から CCD を使用して SPM を観測した。

以下に最適に圧縮された状態と回折格子間隔を 0.5mm 広げ分散量 $\cdot 2000\text{fs}^2$ のネガティブチャープを与えた状態での SPM の発光強度と長さをプロットしたグラフを示す。

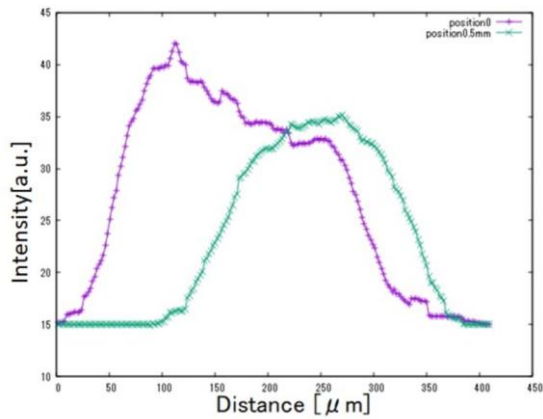


図 3 SPM の強度変化

この結果からネガティブチャープを与えると SPM の発光は後方にシフトしていることがわかる。またチャープを与えていない SPM の発光強度はガウシアンビームをベッセルビームに変換した際の強度の特徴を持っており入射側で最も強く発光しそこから徐々に強度が低くなっている。アスペクト比の高い加工を行う際には一様な強度の集光が求められていることからやはり操作なしではテーパのかかった穴になることが簡単に予想できる。

次にネガティブチャープを与えた SPM では中心の強度が高い山なりの強度分布となった。これはネガティブチャープによってガラス内部の浅い領域では非線形効果が弱く発光がなくなり、より内部へ入射したパルスがガラスの材料分散を受け後方で圧縮され SPM が発光しているものだと考えることができる。この状態の SPM を見るとチャープを与えていない SPM に比べ強度がフラットになりより求めているものに近づいているが長さとしては短くなっているため一様な分散制御のみではアスペクト比の向上は難しいことが分かった。

3. 径方向分散制御板を用いた分散制御

一様な分散制御では SPM の延長が難しいことからビームの径方向での分散制御システムを構築した。そこで直径の異なる AR ウィンドウを組み合わせた径方向分散制御システムを作成した。厚さ 1mm の AR ウィンドウを株式会社大興製作所の協力によって直径 2mm、3mm、4mm の円盤として切り出しそれを重ね合わせビームの径方向で異なる分散を与えることができる。AR ウィンドウの基盤は BK7 であるため波長 800nm に対して $GVD=44.651\text{fs}^2/\text{mm}$ の分散を与えることができる。

このウィンドウをアキシコンレンズの直前に挿入し SPM の発光を調べた。

表 1 与える分散量

ビーム直径	GDD[fs ²]
~2mm	178.604
2mm~3mm	133.953
3mm~4mm	89.302
4mm~	44.651

実験の結果を以下に示す。

チャープを与えていない青の実線で示されている SPM では入射直後に非常に高い強度があることがわかるがこれは画像を撮影するまでに即座に加工が完了するほど十分な強度があり、改質によって光が散乱し強く見えている。

AR ウィンドウを挿入した状態ではそうでない場合と比較し入射直後と中盤あたりではわずかに強度が低くなっていることがわかるが 500μm 付近では強度が高くなっていることがわかる。これはネガティブチャープが 500μm 付近では集光に対してチャープのない状態より適していることが分かった。

SPM 強度のフラットさを評価するためにピーク強度の 80% でラインを引いたのが灰色と黄色の実線だが AR ウィンドウを挿入した状態では約 12μm 後方へシフトしたことが確認できた。

本システムでは AR ウィンドウが BK7 で製造されているため 1mm あたり $44.651\text{fs}^2/\text{mm}$ しか分散値を与えることができないがより高分散を持つ透明物質をガラス基板として使用することができればより大きな変化をつけることができ、SPM をより長くすることができると考えられる。

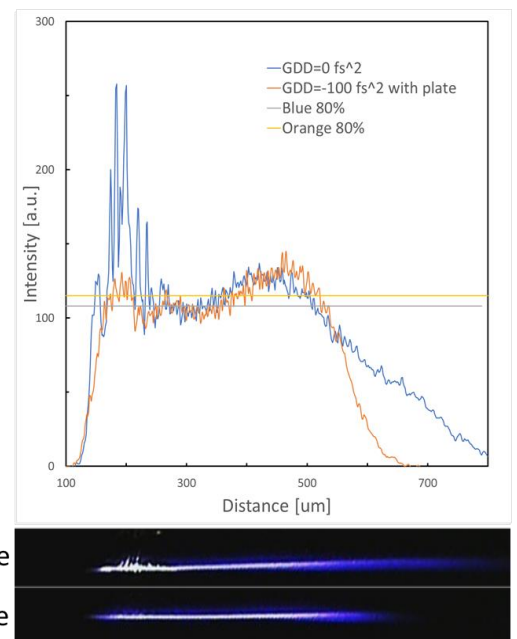


図 4 分散制御板による SPM 発光強度

4. S-NPH3 を用いた分散制御板

径方向の分散制御ではBK7を使用した1mmあたりで与えられる分散値GVDが小さいため高分散ガラスを採用した。株式会社オハラの協力により高分散ガラスS-NPH3を提供していただいた。初めにこの高分散ガラスの800nmでの屈折率及びGVDをMATLABを用いて計算した。

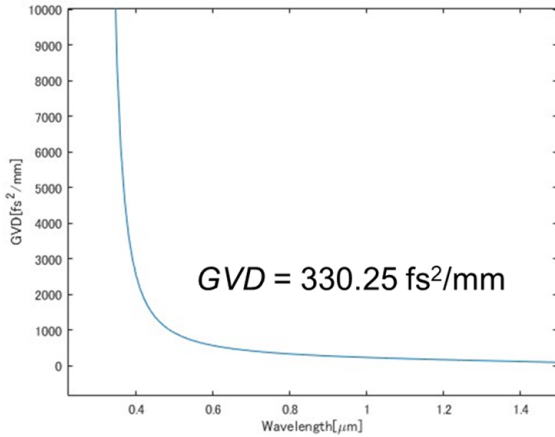


図 5 波長における群速度分散変化

計算した波長における屈折率と群速度分散の関係をそれぞれグラフにプロットした。

これにより波長800nmでは屈折率が $n=1.9245$ 、群速度分散は $GVD=330.25\text{fs}^2/\text{mm}$ と求めることができた。群速度分散についてはBK7の7倍強の値となりより多くの分散を与えることが考えられる。

オートコリレーターの前方にサンプルを置き透過後のパルス幅を計測した。計測は16回の平均値を取っている。以下の表に厚さごとのパルス幅をまとめた。

表 2 S-NPH3 透過後のパルス幅

サンプルの合計 厚さ[mm]	GDD[fs ²]	パルス幅[fs]
2	660	200
4	990	200
6	1320	200
8	1650	206
10	1980	206

結果として最大10mmのS-NPH3を透過してもパルス幅は6fsしか伸びることがなかった。オートコリレーターの分解能は6fsなので6fs以下の変化は測定できなかった。

5. 筐体内部コンプレッサーの課題

これまでの実験では筐体内部の回折格子が載るステージにステップモーターをつけそれを操作し分散を与えSPMを測定してきた。

しかしこの内部のステージを変化させる方法では回

折格子間隔を変えるとアライメントも元の軸から外れてしまい、アキシコンレンズや対物レンズへの入射角度も変化しSPMに影響が出る可能性があることが分かった。これによりコンプレッサー直後からのアライメントが外れるためアキシコンレンズまでビーム径の操作などを行い伝搬距離が長くなればより大きくアキシコンレンズや対物レンズへの入射角度が変わってしまう。

その確認としてアキシコンレンズの直前のミラー角度を 0.03° 傾けた場合のSPMを比較した。傾けたミラーからはアキシコンレンズまで50mm、対物レンズまでは400mmの距離がある。対物レンズでは0.24mm中心から外れた位置にビームが来る計算になった。

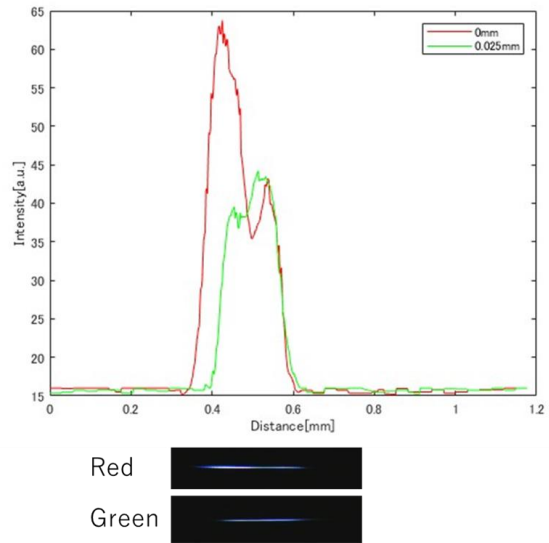


図 6 対物レンズ入射角度の違いによるSPM発光強度

赤の実線が対物レンズに垂直に入射した状態のSPMを示し、緑の実線が傾けて入射した状態のSPMの発光強度を示す。分散値を変更していないにもかかわらず明らかに発光強度が変化していることがわかる。対物レンズへの入射角度が垂直からわずかにでもずれるとSPM前方の強度がなくなり短くなり全体のピーク強度も小さくなる、図35で測定したSPMの変化に近いことが起こることが確認できた。

よって現状のコンプレッサーでは与える分散が変化すると対物レンズへの入射角度による収差の影響でSPMの発光も変化し、分散が与える影響を測定することができないことが分かった。

6. 分散制御に必要な分散量の計算

はじめに今回のパルス幅200fsでは分散値を与えた場合パルス幅がどのように変化するか計算を行った。

中心波長 $\omega = 0$ の周りでテーラー展開すると

$$\delta\phi(\omega) = \delta\phi(0) + D_1\omega + \frac{D_2}{2!}\omega^2 + \frac{D_3}{3!}\omega^3 + \dots \quad (6)$$

このときの D_2 は群速度分散GDDでありこのパルスがガウス型 $A(t) = A_0 e^{-at^2}$ である場合パルス幅 Δt

$$\Delta t = \sqrt{\frac{2\ln 2}{a}} \quad (7)$$

で表されるため、分散を受けたパルス幅 Δt_1 は

$$\Delta t_1 = \Delta t \sqrt{1 + \left(4\ln 2 \frac{D_2}{\Delta t^2}\right)^2} \quad (8)$$

として計算することができる。

以下のグラフにパルス幅 200fs のパルスが GDD-10000fs²から10000fs²まで分散を受けたときに出力されるパルス幅をプロットした。

±10000fs²を与えたとしても 40fs しかパルス幅が延長していないことが分かる。

分散制御板では2種類の透明媒質で作られた分散制御板を挿入したが、それぞれ1mmの厚さで挿入した場合のパルス幅を以下の表にまとめた。

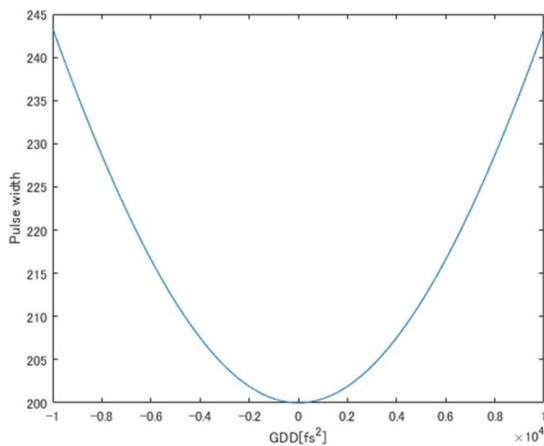


図 7 200fs のパルス幅が分散を受けた場合の出力パルス幅

表 3 透明媒質 1mm 透過後のパルス幅

	GDD[fs ²]	パルス幅[fs]
BK7	44.651	200.0010
S-NPH3	330.25	200.0524

表 3 から分かるように分散制御板を 1mm 挟むだけではたとえ S-NPH3 のような高分散ガラスを用いても 200fs 程度のパルス幅ではほとんど影響を与えることができないことが計算から確認することができた。

今回は 200fs のレーザーを使用しているが現在では非線形圧縮を用いて簡単に 50fs 以下の超短パルスを作り出

すことができ、レーザー加工においても高い非線形効果を得るためにはパルス幅の短いレーザーを選択することは容易に想像できる。ではどの程度のパルス幅からレンズなど透明媒質の透過による分散を考慮しなければいけないか計算を行った。図 3 25 は S-NPH3 を 1mm 透過した場合のパルス幅変化を横軸に入力パルス幅、縦軸に出力パルス幅を示している。

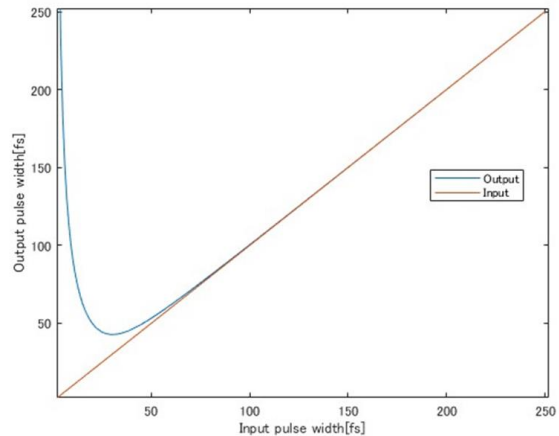


図 8 S-NPH3 厚さ 1mm を挿入した場合のパルス幅の変化

このグラフからも今回の 200fs 程度のパルス幅では変わらないことがわかり、約 50fs 付近から入力パルス幅と出力パルス幅に違いが出はじめ 30fs より短くなったあたりで急激に出力パルス幅が伸びていることが計算から確認できた。

現在 50fs 以下のパルス幅を持つ超短パルスレーザーは容易に手に入れることができ、今回のような非線形効果を用いた透明媒質への加工ではパルス幅の短いものがより高い非線形効果を起こすため選択されることが多い。そのような短いパルス幅では確かにレンズなど透過系の光学素子はパルス幅を長くしてしまうため反射系の光学素子で構成させるが、分散制御のこれまでの実験で用いた全体に負の分散をあらかじめ与えることや、径方向の分散性制御によって透過系の光学素子を使ったセットアップの構築も可能であると考えられる。

7. 波面制御実験セットアップ

波長 800nm, 250kHz, 高繰り返し, パルス幅 200fs, 平均出力 0.5W 以上のスペックの超短波パルスレーザーを用いて実験を行った。空間波面の制御には形状可変ミラー(DM)を採用した。形状可変ミラーは矩形 DM と自作したメンブレン型 DM の 2 種を使用した。形状可変ミラーで変化した波面は 4f 光学系によってイメージリレーをしてアキシコンレンズまで伝搬する。アキシコンレンズには頂角 179° のものを使用し、集光用の対物レンズには低パルスエネルギーでも加工ができるように NA=0.5 の長作動対物レンズでガラス内部に集光した。

対物レンズとアキシコンレンズの間隔によってNAが変化するため対物レンズは1軸ステージにのせ間隔調整ができるようにした。

本実験においてガラス内部の集光を確認するためにガラス内に集光時自己位相変調により発生する白色光SPM[3]の長さを指標とした。これにより波面状態を変化させた場合でもSEMを利用せずにリアルタイムでどのようにベッセルビームが集光しているか確認することができる。

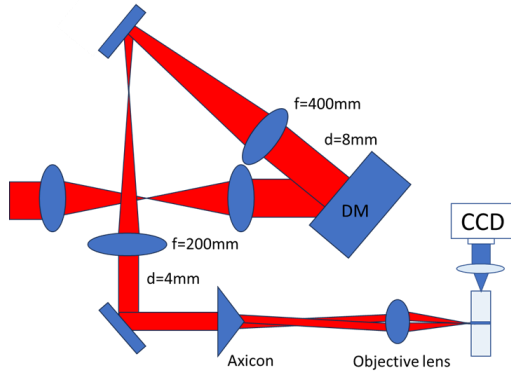


図2 実験セットアップ

8. 矩形DMによるSPM測定

はじめに矩形DMを使用して波面制御によるSPM発光の変化について調べた。ミラーの形状を変化させずに集光した場合には分割されたベッセルビームが確認された。これはアキシコンレンズのエラーや高NA対物レンズの球面収差によってガラス内部では自己干渉効果が発生していない部分が存在していると考えている。また分割されたベッセルビームの入射側はアキシコンレンズ入射前のガウシアンビームの外側が発生させ、ベッセルビーム後方側は内側のビームが発生させていることがわかった。

そこでビームの中心のみを形状可変ミラーを最大 $2.7\mu\text{m}$ 変化させ凸面にして集光すると1本に再結合したSPMイメージを得ることができた。

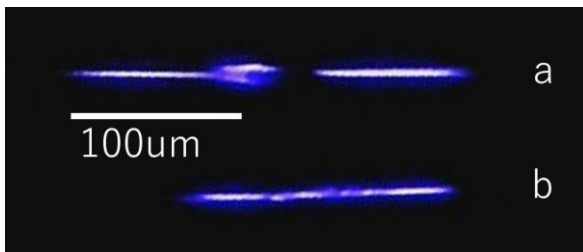


図3 SPMイメージ

(a)分裂したSPM,(b)DMを使用して再結合したSPM

9. メンブレン型DM

矩形DMでは中心対称であるベッセルビームにおいて適していないためDMの可変部分が円形になるよう

なメンブレン型DMを開発した。このDMは直径5mmの穴の空いた合成石英基盤に $500\mu\text{m}$ まで研磨された誘電体ミラーを貼り付けて作成した。穴の空いた面に水圧ポンプによって最大10barまで圧力をかけることでミラー表面をわずかに変形させることができる。

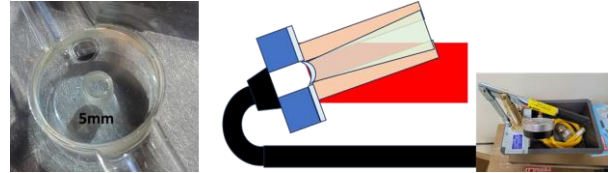


図4 メンブレン型DMとその構成図

10. メンブレン型DMによるSPM測定

はじめに圧力ごとのビームパターンを撮影した。ニアフィールドをアキシコンレンズの地点にてCCDカメラで撮影し、ファーフィールドをさらに30cm遠くにビームを飛ばした地点で同様に撮影した。ニアフィールドでは圧力ごとに大きな変化は確認できなかったがファーフィールドでは圧力が大きくなるとリング状のパターンになることがわかった。これはDM可変部と接着部の境目で圧力がかかると凹面のように変形しリング状に集光しているためだと考えられる。

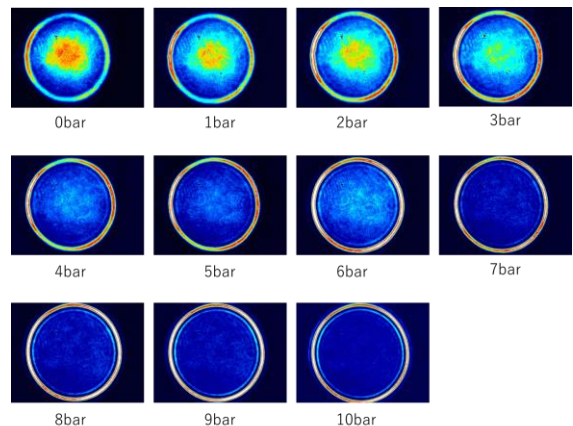


図5 圧力によるファーフィールドパターンの変化

このように変化したパターンを持つビームでベッセルビームを発生させ集光した場合2barでは矩形DMより長く $160\mu\text{m}$ にも達し、発光強度も安定したSPMを得ることができた。



図6 メンブレン型DMによる再結合したSPM

11. 高速加工実験

繰り返し周波数250kHzにもなるとピエゾアクチュエータやステッピングモーターではシングルショットの加工は難しいため高速なステージを選択が必要になった。そこで高速回転するモーターにガラスを取り付ける

ことで 500mm/s 以上でターゲットを高速で動かすことが可能になりシングルショット加工の加工表面の画像を取得することに成功した。

この実験では低パルスエネルギーでも加工がしやすいように株式会社オハラ様より提供していただいた特殊なバンドギャップを持つガラスを使用して加工実験を行った。

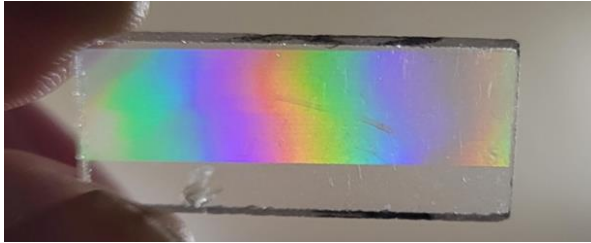


図 9 加工したガラス

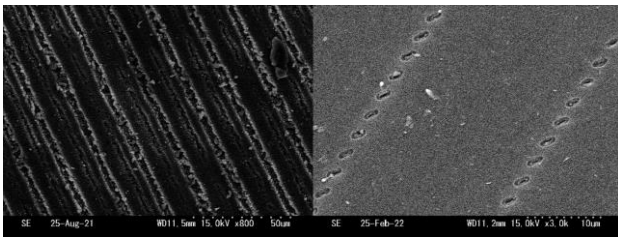


図 7 加工表面の SEM 画像

左, ステッピングモーター使用時 右, 高速モーター使用時

また高速ステージを利用しなければシングルショット加工イメージが取れないと考えていたが SEM で表面をよく観察すると穴径と同じ間隔でナノホールが表面に空いていることが確認出来た。

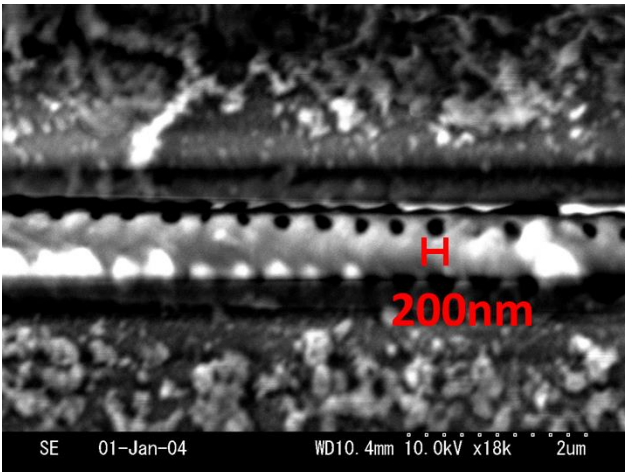


図 10 精密ナノホール連続加工

最後にガラスを切断し断面を SEM で見て高アスペクト加工を確認した。

切断方法がナノホールに対して非常にアバウトであ

るため穴の軸と切断軸がずれていると考えられ高アスペクト加工穴の全容を確認することはできなかったがその一部を撮影することに成功した。画像では長さ 70 μm 程度の加工痕が見え穴径は 50nm 程度であることがわかった。この結果によりアスペクト比は 1400 にも到達したことが確認できた。もし SPM 発光長と同じ 160 μm の穴が空いていたとしたらアスペクト比は 3200 を超えたことになるため正確に測定できる切断法を考える必要がある。

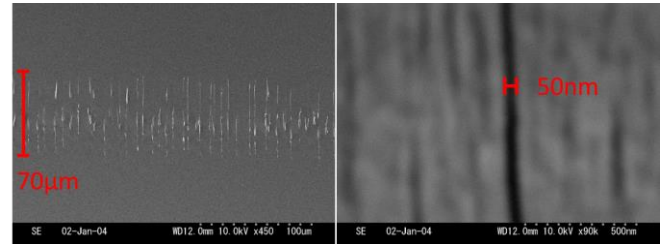


図 11 切断面の SEM 画像

左, 高アスペクト加工全景 右, 高アスペクト加工穴径

12. まとめ

メンブレン型 DM を開発しミラー表面形状を凸型とすることで 160 μm もの長く安定した SPM の発生を確認できた。ベッセルビーム加工においては通常のガウシアンビームではなく、ファーフィールドにおいてリング状になるようなビームパターンが適していることが分かった。

加工に適したガラスを使用し高速加工でもアスペクト比 1000 を達成し、アスペクト比 3000 を超える可能性を示すことができた。

今後の展望としてはさらなる低パルスエネルギー、高繰り返し化のための材料側からのアプローチが必要だと考えている。

参考文献

- [1] 電子ビームリソグラフィを用いた 3 次元ナノ加工 山崎 謙治 生津 英夫 NTT 物性科学基礎研究所 NTT 技術ジャーナル(2006).
- [2] [8] Oto Brzobohatý, Tomáš Čížmár, and Pavel Zemánek, "High quality quasi-Bessel beam generated by round-tip axicon," Opt. Express 16, 12688-12700 (2008)
- [3] Astronomical Adaptive Optics François Rigaut Publications of the Astronomical Society of the Pacific, Volume 127, Number 958 (2015)