ベッセルビームによる金属材料への微細溝加工

松岡 芳彦, 平澤 誠一

(独)産業技術総合研究所 先進製造プロセス研究部門 (〒305-8564 茨城県つくば市並木1-2-1 産総研東)

Micro Grooving of Metallic Material Using a Bessel Beam

Yoshihiko MATSUOKA and Makoto HIRASAWA

Advanced Manufacturing Research Institute, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST),
Tsukuba East, 1-2-1 Namiki, Tsukuba, Ibaraki 305-8564

(Received September 1, 2006)

A Bessel beam is suitable for laser micro fabrication because it possesses both a small focal spot on the order of microns and a deep focal depth on the order of centimeters. In the case of laser micro grooving in stainless steel using a Bessel beam, suitable processing conditions were investigated. The results were compared with the results of micro grooving using a focused beam with a convex lens. In the grooving with the Bessel beam, it was possible to increase the groove depth while the groove width was kept almost constant. On the other hand, in the grooving with the focused beam, both the groove depth and the groove width increased when the irradiation energy was increased. A micro groove with an aspect ratio of about 5 and a width of about 2 μm was produced in a 10 μm thick stainless steel foil using a Bessel beam.

Key Words: Laser micro grooving, Aspect ratio, Axicon, Bessel beam, Laser ablation

1. はじめに

小型化・軽量化と高機能化の両立した進展が求められる各種携帯機器の製造において、十数ミクロンを下回るサイズの微細加工技術の重要性がますます高まっている。我々は、接触を伴う従来型の機械加工技術のこの領域への適用が困難であることを予測し、非接触で実施できるレーザー加工の適用を検討してきている。

可視光レーザーを凸レンズで集光したスポットを用いて加工を行う場合、焦点深度がスポットサイズと同程度と浅くなってしまうなど、実際の微細加工への適用には解決すべき課題がある。我々は従来の凸レンズ集光スポットの微細加工への適用の課題が、ベッセルビームを用いることで解決できることを見出し、研究を行っている。可視光レーザーとアクシコンから生成されるベッセルビームは、微小集光スポットサイズと深い焦点深度を両立しており、この特性が微細加工に適していることを明らかにし^{1,2)}、ナノ秒パルスNd:YAGレーザーの第2高調波または第4高調波を光源として生成したベッセルビームを用いて、マイクロメートルサイズのドリル加工がワークディスタンスの精密制御なしに実施できることを報告してきている³⁻⁵⁾。

マイクロドリル加工に並んで重要な基本加工に、微細溝加工がある。レーザーアブレーションによる溝状の加工については、AlN(厚さ175 μm)へのアスペクト比17のスリット加工や AlN(厚さ0.75 mm)の精密切断、CVDダイア

モンド(厚さ0.5 mm)やCu(厚さ1 mm)、タンタル(厚さ80 μm)の切断などの報告がある⁶⁻⁸⁾。しかしながらこれらはいずれもドリル加工結果を中心とした報告における例示であり、詳細が記述されていない。本報では、ベッセルビームを用いたステンレススチールへの微細溝加工における基本的パラメーターの影響を調査し、凸レンズ集光ビームを用いた微細溝加工と比較検討した結果を報告する。

2. 実験

実験に用いた加工光学系を、Fig. 1に示す。パルス発振Nd:YAGレーザー(パルス幅約5 ns, 繰返し周波数10 Hz)の

Fig. 1 Experimental setup.

第2高調波(波長532 nm, ビームプロファイルはニアガウシアン)を光源に用いた。集光レンズは、半頂角77.5°の円錐形状アクシコンおよび焦点距離(f) 50 mmの凸レンズ(直径50 mm)を用いた。アクシコンによるベッセルビームの生成では、Nd:YAGレーザーの出力ビームを直径($1/e^2$)約20 mmにエキスパンドして用いた。焦点距離50 mmの凸レンズを用いた集光では、Nd:YAGレーザーの出力ビームを直径($1/e^2$)約25 mmにエキスパンドした後に開口直径が12.5 mmまたは5 mmの虹彩絞りを通してその中心部を切り出して用いた。ニアガウシアンビームから虹彩絞りを用いて切り出したビームのプロファイルを、トップハットとみなした。

アクシコンと試料間の距離 z は、アクシコンにより生成されるベッセルビームの伝播軸上光強度が最大と計算される値に、おおよそ合せた。凸レンズと試料間の距離 z は、これを25 μm ピッチで変化させては集光ビームを照射し、最小のパルスエネルギーで試料表面に痕が観察される距離(ジャストフォーカス)に合せた。

本実験では、試料表面での照射エネルギー密度は、集光スポットの $1/e^2$ 光強度直径円内の平均光エネルギー密度とした。ベッセルビームの中心ピークの直径($1/e^2$)およびその直径内に含まれるパルスエネルギーは、フレネル回折の式に基づく数値計算により求めた^{1,9)}。波長 λ , 直径 D_i のトップハットビームを焦点距離 f の凸レンズによって集光して得られる集光スポット(ウエスト)の直径($1/e^2$)は、“理想的な集光状態”において、

$$d_{w2} = 1.64\lambda f / D_i \quad (1)$$

となる⁹⁾。また、この集光スポット直径($1/e^2$)内に含まれるパルスエネルギーは、入射パルスエネルギーの77%である。凸レンズ集光ビームの試料表面での照射エネルギー密度は、式(1)とこの分配率から算出した。

試料には厚さが10 μm および100 μm のステンレススチール(SUS304)を用い、これをx-y-zステージ上に設置した。集光ビームは試料表面に垂直に照射され、自動化されたxステージの往復運動により溝加工を実施した。

加工された溝は、試料表裏面を実体顕微鏡で観察すると共に、シリコン系樹脂(Struers A/S製レプリセット、解像度0.1 μm 以下)を用いて採取したレプリカのレーザー走査顕微鏡(レーザーテック(株)製VL2000D)による観察で、その内部形状を計測した¹⁰⁾。溝深さはレプリカの高さ、また溝幅はレプリカの1/2高さにおける幅の、3から5点の計測値の平均をとった。

3. 結果

3.1 ベッセルビームを用いた溝加工における移動速度の影響

試料に厚さ100 μm のSUS304を用い、これに半頂角が77.5°のアクシコンを用いて生成したベッセルビームを照射しながらxステージを移動させ、長さ100 μm の溝加工を行った。単位長さあたりのショット数を20 pulse/ μm に固定し、xステージの移動速度を0.5, 2, 8, 25および100

$\mu\text{m/s}$ と変化させた場合の、溝深さ、溝幅の測定結果をFig. 2に示す。いずれの1パルスあたりの照射エネルギー密度においても、溝深さはx軸ステージの移動速度が0.5 $\mu\text{m/s}$ から8 $\mu\text{m/s}$ へと増加するに従って深くなり、8 $\mu\text{m/s}$ を超えるとほぼ一定の深さとなる。但し100 $\mu\text{m/s}$ で溝深さは若干浅くなっている。往復運動に際して、往復の両端では、減速のためにx軸ステージの移動速度が遅くなる。従って、溝の中央部よりも両端部分で単位長さあたりの照射ショット数は多くなってしまふ。この影響は、x軸ステージの移動速度の設定が速いほど顕著となるために、実験条件中で最速である100 $\mu\text{m/s}$ において、溝深さが若干浅くなったものと考えられる。溝幅は、x軸ステージの移動速度にほとんど依存せず、変わらなかった。

半頂角が77.5°のアクシコンを用いて生成したベッセルビームの中心ピークの $1/e^2$ スポット直径は2.9 μm である。また、光源のパルスレーザーの繰り返し周波数は10 Hzである。x軸ステージの移動速度が8 $\mu\text{m/s}$ の場合、時間的に隣り合って照射されるベッセルビームのスポット中心は0.8 μm 隔たっている。照射したベッセルビームの中心ピークの直径を単位とすると、隣り合う照射スポット中心の距離は約0.3×スポット直径となる。溝深さがほぼ一定となる8 $\mu\text{m/s}$ を超えるx軸ステージの移動速度では、隣り合う照射スポットの距離は長くなり、30 $\mu\text{m/s}$ を超える移動速度では、隣り合う照射スポット中心の距離は>スポット直径となり、隣り合う照射スポットの空間的に独立する。一方、8 $\mu\text{m/s}$ に満たないx軸ステージの移動速度では、速度が遅いほど隣り合う照射スポット空間的重なり合いが大きくなる。時間的に隣り合って照射されるスポットの空間的重なりが大きいと形成される溝深さは浅く、スポットの空間的重なりが無視できる程度になると形成される溝深さは一定となる。この理由については、現在検討中である。前の照射ショットによって除去された部位が、次のショットの照射スポット内に傾斜面とし

Fig. 2 Relationships among the groove depth, the groove width, the line speed of the Bessel beam, and the irradiation energy density per pulse. (Bessel beam spot size 2.9 μm , shot number 20 pulse/ μm , groove length 100 μm , 100 μm thick SUS304)

て存在する場合、その部位へはビームが斜入射となるためにエネルギー密度が低下するので、除去能率が低下する。観測された現象はこのことによるものと予測している。

3.2 ベッセルビームを用いた溝加工における照射エネルギーとパルスエネルギーの影響

厚さ100 μm のSUS304に、半頂角77.5°のアクシコンを用いて生成したベッセルビームを照射しながらx軸ステージを移動させ、長さ50 μm の溝加工を行った。x軸ステージの移動速度を10 $\mu\text{m/s}$ に固定した場合の、溝深さおよび溝幅の、単位長さあたりの照射エネルギーおよび1パルスあたりの照射エネルギー密度への依存の測定結果をFig. 3に示す。単位長さあたりの照射エネルギーは、単位長さあたりの照射ショットの総数に集光スポット直径($1/e^2$)内に含まれるパルスエネルギーを乗じて算出した。溝深さは、照射エネルギーの増加に従って深くなった。また同じ照射エネルギーであれば、1パルスあたりの照射エネルギー密度が大きいほど、溝深さは深くなった。これは、金属のレーザーアブレーション加工の主メカニズムが液滴飛散(melt ejection)であることから理解できる¹¹⁾。一方、溝幅は照射エネルギーに殆ど依存せず、1パルスあたりの照射エネルギー密度毎にほぼ一定であった。

溝深さを溝幅で割った値(アスペクト比)の、単位長さあたりの照射エネルギーおよび1パルスあたりの照射エネルギー密度への依存をFig. 4に示す。アスペクト比は1パルスあたりの照射エネルギー密度に殆ど依存せず、照射エネルギーの増加に従って大きくなった。従って、高アス

Fig. 3 Relationships among the groove depth, the groove width, the irradiation energy as a function of length, and the irradiation energy density per pulse. (Bessel beam spot size 2.9 μm , beam line speed 10 $\mu\text{m/s}$, groove length 50 μm , 100 μm thick SUS304)

Fig. 4 Relationships among the groove aspect ratio, the irradiation energy as a function of length, and the irradiation energy density per pulse. (Bessel beam spot size 2.9 μm , beam line speed 10 $\mu\text{m/s}$, groove length 50 μm , 100 μm thick SUS304)

ペクト比の溝を形成するには、照射エネルギーを増加させる、即ち、照射ショット数を増やせば良い。溝の幅は、パルスエネルギーの調節により制御できる。

ベッセルビームを用いたドリル加工において、穴径は1パルスあたりの照射エネルギー密度の増加とともに太くなるが⁵⁾、照射ショット数が変化しても穴径はほとんど変化しないこと⁴⁾、を我々は報告してきた。本溝加工実験における、溝幅が1パルスあたりの照射エネルギー密度の増加とともに太くなる一方、照射エネルギーへの依存が弱いという結果(Fig. 3)は、既報のドリル加工の穴径と1パルスあたりの照射エネルギー密度および照射ショット数の関係と類似している。

3.3 凸レンズ集光ビームを用いた溝加工における照射エネルギーとパルスエネルギーの影響

ベッセルビームによる溝加工を、従来の凸レンズ集光ビームを用いた溝加工と比較した。式(1)によれば、波長532 nmの光を焦点距離50 mmの凸レンズで集光した場合、元のビームの直径が12.5 mmのとき集光スポット直径($1/e^2$)として $d_{e-2} = 3.5 \mu\text{m}$ が、また元のビーム直径が5 mmのとき $d_{e-2} = 8.7 \mu\text{m}$ が期待できる。

厚さ100 μm のSUS304に、スポット直径($1/e^2$)が3.5 μm の凸レンズ集光ビームを用い、x軸ステージの移動速度10 $\mu\text{m/s}$ で、長さ50 μm の溝加工を実施した場合の、溝深さおよび溝幅の、単位長さあたりの照射エネルギーおよび1パルスあたりの照射エネルギー密度への依存の測定結果をFig. 5に示す。また厚さ100 μm のSUS304に、スポット直径($1/e^2$)が8.7 μm の凸レンズ集光ビームを用い、x軸ステージの移動速度25 $\mu\text{m/s}$ で、長さ50 μm の溝加工を実施した場合の、溝深さおよび溝幅の、単位長さあたりの照射エネルギーおよび1パルスあたりの照射エネルギー密度への依存の測定結果をFig. 6に示す。スポット直径の異なる凸レンズ集光ビームを用いた溝加工(Fig. 5およびFig. 6)においても、ベッセルビームを用いた溝加工(Fig. 3)と同様に、溝深さは、照射エネルギーの増加に従って、また同じ照射エネルギーであれば1パルスあたりの照射エネルギー密度

Fig. 5 Relationships among the groove depth, the groove width, the irradiation energy as a function of length, and the irradiation energy density per pulse. (spot size of focused beam 3.5 μm , beam line speed 10 $\mu\text{m/s}$, groove length 50 μm , 100 μm thick SUS304)

が大きいくほど深くなった。凸レンズ集光ビームによる溝加工の溝幅の照射エネルギー依存は、凸レンズ集光ビームのスポット直径で傾向が異なった。ベッセルビームと同程度のサイズであるスポット直径($1/e^2$)が3.5 μm の凸レンズ集光ビームを用いた加工では、照射エネルギーの増加に伴う溝幅の増加が明確に確認された。サイズが倍を超えるスポット直径($1/e^2$)が8.7 μm の凸レンズ集光ビームを用いた加工では、照射エネルギーの増加に伴う溝幅の増加は、ベッセルビームの場合よりも大きく、スポット直径($1/e^2$)が3.5 μm の凸レンズ集光ビームの場合よりも小さかった。スポット直径($1/e^2$)が3.5 μm の凸レンズ集光ビームを用いて加工した溝のアスペクト比の、単位長さあたりの照射エネルギーおよび1パルスあたりの照射エネルギー密度への依存をFig. 7に示す。照射エネルギーの増加に伴うアスペクト比の増加に、飽和傾向が認められる。これらの結果は、凸レンズ集光ビームによる溝加工では、溝幅を一定に保ったまま溝深さを増加させることは難しいことを示している。

3.4 ベッセルビームによる高アスペクト比スリット加工

ベッセルビームを用いると、マイクロメートルオーダーの溝幅で高アスペクト比の溝を、凸レンズ集光ビームよりも容易に加工できることが分かった。加工条件は、所望の溝幅からそれに対応する1パルスあたりの照射エネルギー密度(あるいはパルスエネルギー)が決められ、また所望の溝深さからその深さに達するに必要な照射エネルギー(あるいは照射ショット数)が決められる。

Fig. 6 Relationships among the groove depth, the groove width, the irradiation energy as a function of length, and the irradiation energy density per pulse. (spot size of focused beam 8.7 μm , beam line speed 25 $\mu\text{m/s}$, groove length 50 μm , 100 μm thick SUS304)

Fig. 7 Relationships among the groove aspect ratio, the irradiation energy as a function of length, and the irradiation energy density per pulse. (spot size of focused beam 3.5 μm , beam line speed 10 $\mu\text{m/s}$, groove length 50 μm , 100 μm thick SUS304)

試料に厚さ10 μm のSUS304を用い、これに半頂角が77.5°のアクシコンを用いて生成したベッセルビームを照射しながらx軸ステージを移動させ、長さ100 μm のスリット(貫通溝)加工を行った。試料表面での1パルスあたりの照射エネルギー密度は2 J/(cm²·pulse)、x軸ステージの移動速度は25 $\mu\text{m/s}$ 、単位長さあたりの照射ショット数は500 pulse/ μm である。スリット加工したSUS304の表裏面の顕微鏡写真、および加工したスリットのレプリカの走査型レーザー顕微鏡による3D観察像およびその断面形状をFig. 8に示す。厚さ10 μm のSUS304を貫通して、平均スリット幅約2 μm 、アスペクト比約5のスリットが形成されている。

Fig. 8 Grooving by laser ablation using a Bessel beam in 10 μm thick SUS304 foil: (a)-1 & 2 optical microscope images, (b) laser microscope 3D image of replica, (c) cross-section height profile of replica. (Bessel beam spot size 2.9 μm, beam line speed 25 μm/s, irradiation energy density per pulse 2 J/(cm²·pulse), shot number 500 pulse/μm, groove length 100 μm)

4. 考 察

本実験で用いたビームの、集光スポット直径および焦点深度の計算値を、Table 1にまとめる。凸レンズ集光ビームの集光スポットの焦点深度は、次式を用いて計算した¹²⁾。

$$z_f = \pm 2\lambda f^2 / D_l^2 \quad (2)$$

またベッセルビームの焦点深度は、フレネル回折の式に基づく数値計算により求めた伝播軸上強度分布において、最大強度の80%を維持している伝播距離とした⁹⁾。

スポット直径(1/e²)が3.5 μmの凸レンズ集光ビームの焦点深度は±17 μmしかない。この焦点深度は、本実験で使った加工試料の厚みよりも浅く、また本実験で加工した浅い溝の深さと同程度でしかない。スポット直径(1/e²)が8.7 μmの凸レンズ集光ビームの焦点深度は±110 μmであり、本実験で使った試料厚みと同程度である。焦点深度を超えた溝深さではビーム直径が大きくなり、これに従って溝幅も太くなってしまふことが予想される。焦点深度の深い集光ビームによる溝加工での溝幅の照射エネルギーの増大に伴う変化(Fig. 6)よりも、焦点深度の浅い集光ビームによる溝加工での溝幅の照射エネルギー依存(Fig. 5)の方が大きいことはこのことによると考えられる。ベッセルビームによる溝加工における溝幅の照射エ

Table 1 Focal spot diameter and focal depth of the focused beam.

lens	source beam diameter	focal spot diameter(1/e ²)	focal depth
axicon θ _a = 77.5°	20 mm (1/e ²)	2.9 μm	~44 mm
convex f = 50 mm	12.5 mm (top hat)	3.5 μm	±17 μm
convex f = 50 mm	5 mm (top hat)	8.7 μm	±110 μm

ネルギー依存(Fig. 3)は本検討中でもっとも小さいが、Table 1にあるように極めて長い焦点深度を有するビームであることによると考えられる。

スポット直径(1/e²)が3.5 μmの凸レンズ集光ビームによる溝加工において、溝深さの増加に伴う集光ビーム直径の増大を防ぐためにジャストフォーカス位置を試料表面よりも50 μm試料内部にセットすると、照射エネルギーに対する溝幅の増大は鈍感になったが、照射エネルギーが少ないうちから溝幅が大きくなり、高いアスペクト比の溝加工は困難であった。

ベッセルビームを用いた溝加工の結果(Fig. 3)と、凸レンズ集光ビームを用いた結果(Fig. 5およびFig. 6)において、試験した1パルスあたりの照射エネルギー密度の値が大きく異なっている。各図において試験された最小の1パルスあたりの照射エネルギー密度が、各実験コンディションにおける加工しきい値に相当しているが、軸状集光ビームを用いた溝加工の加工しきい値が約2.1 J/(cm²·pulse)であるのに対して、スポット直径(1/e²)が8.7 μmの凸レンズ集光ビームを用いた場合の加工しきい値が約4.2 J/(cm²·pulse)、スポット直径(1/e²)が3.5 μmの凸レンズ集光ビームの場合には約28 J/(cm²·pulse)と、ベッセルビームの場合に比べて極めて大きな値となっている。

我々が利用できるビームプロファイラー(浜松ホトニクス(株)製 LEPAS-11)は、パルス光の観測に対応していないので、連続発振のHe-Neレーザー(波長632.8 nm)を用いて、焦点距離50 mmの凸レンズによる直径D_lが5 mmおよび12.5 mmのトップハットビームの集光スポット(ウエスト)を測定した。トップハットビームは、He-Neレーザーの出力ビームをエキスパンドした後、虹彩絞りをを用いて切り出して得た。測定結果をFig. 9に示す。観測されたプロファイルは線対称に近いものであったので、対称軸お

Fig. 9 Intensity distribution in the cross-section of the focal spot with a f = 50 mm convex lens: (a) iris diameter 12.5 mm, (b) iris diameter 5 mm. (x and y axes are the two orthogonal directions to the propagation axis, λ = 633 nm)

よびそれに直交する軸(図中の x 軸, y 軸)に沿ったプロファイルを示した. 式(1)から算出される“理想的な集光状態”における集光スポット直径は, $D_t = 5 \text{ mm}$ の場合は $d_{te-2} = 10 \mu\text{m}$, $D_t = 12.5 \text{ mm}$ の場合は $d_{te-2} = 4.2 \mu\text{m}$ である. 測定値(Fig. 9)は x 軸方向と y 軸方向で若干の違いはあるが, $D_t = 5 \text{ mm}$ の場合は約 $10 \mu\text{m}$, $D_t = 12.5 \text{ mm}$ の場合は約 $4.8 \mu\text{m}$ であった. 従って, 集光スポット径は理想的な集光状態の場合と差がない. 特徴的なのは $D_t = 5 \text{ mm}$ の場合の y 軸方向および $D_t = 12.5 \text{ mm}$ の場合の x 軸方向の大きな副次ロブの存在である. トップハットビームの凸レンズ集光スポットには, 中心部の高光強度の明るい円板とその周囲の同心輪帯の明暗縞からなるエアリパターンが現れることが知られている¹³⁾. 1次の副次ロブの高さは, 中心ロブの2%未満であり, また前述のように中心ロブの $1/e^2$ 強度円内に入射光の77%のエネルギーが含まれる. Fig. 9の $D_t = 5 \text{ mm}$ の場合の y 軸方向の1次の副次ロブの高さは中心ロブの約21%, $D_t = 12.5 \text{ mm}$ の場合の x 軸方向の1次の副次ロブの高さは中心ロブの27%にも達している. これらにより中心ロブに含まれるエネルギーの割合が理想集光状態よりも大きく低下してしまっていると考えられる. 一方でFig. 5およびFig. 6の1パルスあたりの照射エネルギー密度は理想集光状態を前提として算出されており, 実際との乖離が生じたことが原因である. また, 実際の集光状態が理想状態からずれた原因は, 用いた $f50 \text{ mm}$ 凸レンズの直径が 50 mm であるのに対してこれに入射させたビーム直径が 12.5 mm と太かったために, ガウス光学の適用範囲に収まることができず, 収差が顕著に現れたため考えられる.

5. まとめ

ベッセルビームを用いた, マイクロメートルオーダーの溝幅でアスペクト比の高い微細溝の加工を検討した. また, 凸レンズ集光ビームを用いた微細溝加工と比較した.

時間的に隣り合って照射されるスポットの空間的重なりが大きいと形成される溝深さは浅く, スポットの空間的重なりが無視できる程度になると形成される溝深さは一定となった.

ベッセルビームを用いた微細溝加工では, 溝深さは照射エネルギーの増加と共に深くなった. また同じ照射エネルギーであれば, 1パルスあたりの照射エネルギー密度が大きいほど, 溝深さは深くなった. 溝幅は照射エネ

ギーにほとんど依存せず, 1パルスあたりの照射エネルギー密度毎にはほぼ一定であった. 従って, 所望の溝幅からそれに対応する1パルスあたりの照射エネルギー密度(あるいはパルスエネルギー)を決め, また所望の溝深さからその深さに達するに必要なエネルギー(あるいはショット数)を照射することで, 高アスペクト比の微細溝が加工できる.

凸レンズ集光ビームを用いた微細溝加工では, 溝深さはベッセルビームと同様に, 照射エネルギーの増加に従って, また同じ照射エネルギーであれば1パルスあたりの照射エネルギー密度が大きいほど深くなった. 照射エネルギーの増加に伴う溝幅の増加は, ベッセルビームの場合よりも大きかった. 従って, 凸レンズ集光ビームを用いた溝加工では, 溝幅を一定にしたまま溝深さを増加させることは難しい.

ベッセルビームを用いて, 厚さ $10 \mu\text{m}$ のSUS304に幅 $2 \mu\text{m}$, アスペクト比約5のスリットを形成できた.

謝 辞

本研究を進めるにあたり, 有益な助言や議論等を頂いた, 元産総研非常勤職員井上 尚志博士に感謝致します.

参考文献

- 1) 松岡 芳彦: レーザー研究 **32** (2004) 131.
- 2) 松岡 芳彦, 井上 尚志, 木塚 優子, 山内 真, 丸山 伸吾, 木下 岳司: レーザー研究 **33** (2005) 615.
- 3) M. Kohno and Y. Matsuoka: JSME Int. J. **B47** (2004) 497.
- 4) 松岡 芳彦, 河野 正道: レーザー研究 **32** (2004) 348.
- 5) 平澤 誠一, 松岡 芳彦, 木塚 優子, 井上 尚志: レーザー研究 **34** (2006) 57.
- 6) T. V. Kononenko, S. V. Garnov, S. M. Klimentov, V. I. Konov, E. N. Loubnin, F. Dausinger, A. Raiber, and C. Taut: Appl. Surf. Sci. **109/110** (1997) 48.
- 7) S. M. Klimentov, S. V. Garnov, T. V. Kononenko, V. I. Konov, P. A. Piovarov, and F. Dausinger: Appl. Phys. **A69** (1999) S633.
- 8) S. Norte, C. Momma, H. Jacobs, A. Tunnermann, B. N. Chichkov, B. Wellegehausen, and H. Welling: J. Opt. Soc. Am. **B14** (1997) 2716.
- 9) Y. Matsuoka, Y. Kizuka, and T. Inoue: Appl. Phys. **A84** (2006) 423.
- 10) 松岡 芳彦, 河野 正道, 高瀬 修: レーザー研究 **32** (2004) 535.
- 11) C. Körner, R. Mayerhofer, M. Hartmann, and H. W. Bergmann: Appl. Phys. **A63** (1996) 123.
- 12) 久保田 広: 波動光学 (岩波書店, 1971) p.321.
- 13) 同上, p.262.