

銅のマルチレベル CGH を用いた 炭酸ガスレーザのビーム整形

萩野 秀樹* 朴 忠植* 加藤 暢宏** 菊田 久雄*** 岩田 耕一***

Beam Shaping of CO₂ Laser Using Multilevel Copper Computer Generated Hologram

HAGINO Hideki, PARK Choong Sik, KATO Nobuhiro, KIKUTA Hisao and IWATA Koichi

*大阪府立産業技術総合研究所 (〒594-1157 和泉市あゆみ野 2-7-1)

**近畿大学 (〒649-6493 那賀郡打田町西三谷 930)

***大阪府立大学 (〒599-8531 堺市学園町 1-1)

hagino@tri.pref.osaka.jp

(原稿受付 2004 年 9 月 13 日)

Computer generated hologram (CGH) is one of the efficient optical device for laser beam shaping. We developed a multi level copper CGH for CO₂ laser beam shaping. Surface relief of the CGH has eight height levels with 0.94μm in step heights and was formed on a flat copper substrate by electroplating with photo-resist masks. Designed CGH changed a gaussian CO₂ laser beam of 14mm in diameter to a pattern of letters. The beam shaping by the fabricated CGH was demonstrated experimentally using CO₂ laser with a power of 10W and infrared-camera. The beam profile of shaped beam agreed with the designed pattern. The intensity of character part was about 5 times bigger than the noise signal. The laser marking on an acrylic plate was carried out by irradiation of the shaped beam.

Key words: laser processing, beam shaping, computer generated hologram, diffractive optical element, CO₂ laser, electroplating

1. 緒 言

溶接や表面改質などのレーザ加工を行う場合、ビームの強度分布が加工品質に大きく影響する。ビームの強度分布を加工対象に応じた分布に整形することができれば、加工品質の向上をはかることができ、また、高能率な加工や特殊な加工を行うことも期待できる。

ビームの強度分布を整形する方法には、マスクやカラーディスコープを用いる方法、ビームスキャニング法、シリンドリカルレンズなどのレンズを複数組み合わせる方法など様々な方法が考案され用いられている。これらの方法は、既存の光学部品を組み合わせることで実現可能であり、広く採用されている。しかし、マスクの損傷や、高価な装置を必要とすること、ビーム整形の自由度が低いといった問題をそれぞれ抱えている。

一方、通信や計測の分野においてレーザの強度分布整形に用いられている方法に回折光学素子を用いる方法がある。その中でも計算機ホログラム(CGH)と呼ばれる回折光学素子を用いる方法は、光エネルギーの利用効率が高く、かつ、均一な強度分布だけでなく複雑なビーム形状を作り出せるなどの利点があり、レーザ加工においては理想的な方法である¹⁾。近年、CGHを高出力レーザ加工に適用する試みがなされており、種々の CGH が提案されている²⁾⁻⁶⁾。しかし、CGH の形状はサブミクロン以下の微細な形状であり、高い形状精度を要求される。また、使用時の熱歪みや破損などの問題もあり、高出力レーザ用の CGH については素材や作製方法が確立していないのが現状である。

高出力レーザ用の CGH の素材としては、シリコン²⁾やセレン化亜鉛(ZnSe)³⁾、ガリウム砒素(GaAs)⁴⁾、銅⁵⁾が提案されているが、これまで筆者らは最も耐熱性に優れた銅を選択し、銅のマルチレベル CGH を作製する方法として「マスクめっき法」を考案し、回折効率などのビーム整形の能力について検討を行ってきた⁶⁾。

「マスクめっき法」は、パターニングされたフォトレジストをマスクとして銅めっきを行う方法である。電気を通さないフォトレジストのパターンをマスクにしてめっきを行うと、基板表面が露出している部分にだけ銅が堆積する。フォトレジストのパターンを変えながらめっきを繰り返すことで、複雑なパターンを持つマルチレベル CGH を作製することができる。本手法では、フォトレジストのパターンが正確に銅のパターンに転写されるとともに、同種材料を堆積させるために異種金属間の密着の問題も発生しない。

しかし、マスクめっき法を用いて作製した CGH の表面凹凸形状の段差誤差のために、整形ビームの効率低下や強度分布のずれが発生していた。そこで、めっき時に用いる治具を改良し、めっき厚さの均一性と精度を高め、段差誤差の低下を試みた。本論文では、マスクめっき法で作製した CGH によるレーザ加工の可能性を示すために、改良した治具を用いてマスクめっき法により CGH を作製し、実際にレーザ光強度分布を整形し、アクリル板にマーキングを行った結果について報告する。

2. 素子の設計

Fig. 1 に CGH を用いたビーム整形の基本構成を示す。

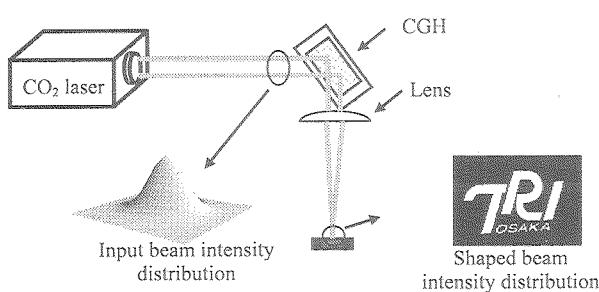


Fig. 1 Schematic diagram of a laser beam shaping system with computer generated hologram (CGH)

CGH の基板は平板であり、45°の角度で入射したレーザ光は反射の後、レンズを通過して、レンズの焦点距離 127mm の位置で設計したビーム形状に整形される。対象とするレーザビームは、炭酸ガスレーザ加工機に搭載することを前提として、波長 10.6μm、ビーム径φ14mm（ピーク強度の $1/e^2$ の径）のガウス分布とした。整形した後の強度分布は、大阪府立産業技術総合研究所のロゴマーク（TRI マーク）とし、文字内は均一な強度とする。

設計した CGH の形状を Fig. 2 に示す。CGH は平板上に凹凸形状を有しており、CGH のパターン（表面の凹凸形状）は、一辺が 160μm の正方形を最小単位のピクセルとして、128×128 個のピクセルで構成され、全体では一辺が 20.48mm (=128×160μm) の正方形の形状をしている。CGH パターンの設計には、様々な手法があるが、ここではフーリエ変換に基づいた反復計算手法の一つである GS 法⁷⁾を用いた。GS 法で得られるのは 0 から 2π の間の連続した位相分布である。これを一定の間隔で 8 段階に離散化して CGH の凹凸形状を決定する。Fig. 2 は、高さ分布を白黒の濃淡で表しており、白い領域が最も高く 6.56μm である。また、一段の段差は 0.94μm である。

整形ビームの強度分布の設計値を Fig. 3 (a) に、設計した CGH を用いてビーム整形を行った場合の強度分布のシミュレーション結果を Fig. 3 (b) にそれぞれ示す。シミュレーション結果によると、入射光強度のうち文字内に集まる光強度の割合は 91.1% であった。また、文字内の強度の目標値を 1.0 とするとき、設計した CGH による文字内強度は 0.31~1.85 の間でばらついており、標準偏差は 0.23 であった。効率や強度のばらつきは CGH 表面の高さの分割数（レベル数）を上げることやピクセルを細かくすることで改善できるが、いずれの方法も製作時間が長くなるため、目的に応じて適度な CGH 形状を選ぶ必要がある。

3. CGH の製作

マスクめっき法による 8 レベルの CGH の製作工程を Fig. 4 に示す⁶⁾。はじめに、銅基板にフォトレジストを塗布した後、フォトマスクを用いて CGH パターンの露光を行う。レジストを現像後、電気めっきにより、所定の厚さまで銅をめっきする。フォトレジストで覆われている部分は、導

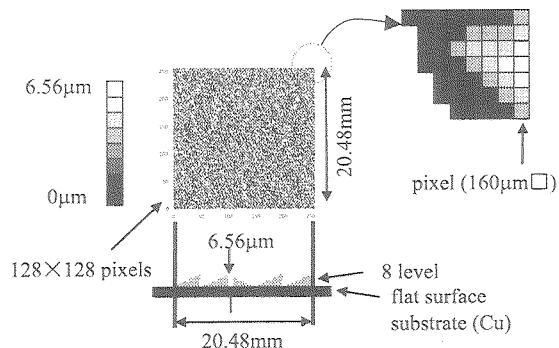


Fig. 2 Feature of computer generated hologram (CGH)

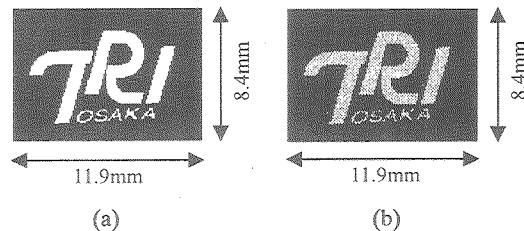


Fig. 3 Shaped beam intensity distribution, (a) designed distribution, (b) simulated distribution with designed CGH

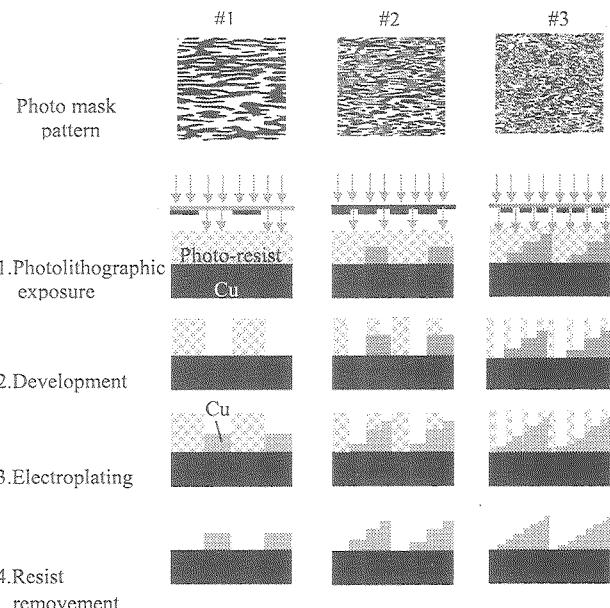


Fig. 4 Fabrication process of 8 level CGH by the mask-electroplating method

電性がないためにめっきされず、基板が露出している部分にのみ銅が堆積する。その後、マスクとなっていたフォトレジストを有機溶媒で除去する。以上の工程を、Fig. 4 の上部に示すような 3 種類のフォトマスクを用いて繰り返すことで、8 レベルの多段構造をもつ CGH が製作できる。フォトマスクでの露光は密着露光用のマスクアライナーを用いて行った。

CGH の基板は、無酸素銅の円柱から、ワイヤ放電加工機

を用いて厚さ 4mm で切り出した。基板はバフ研磨により $Ra=0.04\mu m$ 以下の表面あらさに研磨する。基板にポジ型フォトレジスト AZ1500 (クラリアントジャパン製) を $4\mu m$ 程度の厚さで塗布した後、マスクアライナーを用いて CGH パターンを露光し、現像を行う。

銅めっきには、様々な手法があるが、ここでは硫酸銅めっき浴⁸⁾を利用した。この方法は、室温でのめっきが可能で、毒性が弱く、廃液の処理が容易といった利点があり、精密な厚さ制御が必要とされるプリント基板のめっきなどに利用されている。めっき装置は安定化電源、電流計、めっき浴槽、電極、基板保持具などで構成する。また、めっきの光沢性に影響する塩素イオン濃度の変化を防ぐためにイオン交換膜を用いた。電源には一定の電流量を供給する安定化電源を用いた。めっき浴の組成は、イオン交換膜をはさんで陽極側に濃硫酸 150g/l、陰極側に硫酸銅 100g/l、塩酸 50mg/l、光沢剤（ウイング製）を適量混合した。めっき浴の温度は室温（18~24°C）とした。電極は陽極側に白金電極、陰極側を試料の銅基板とした。その他、試料基板上の油などの不純物を除去するために、めっき前には希硫酸を用いて基板洗浄を行っている。

これまでマスクめっき法で作製した CGH は、めっき厚さの均一性と精度の面で問題があり、段差誤差により回折効率の低下や 0 次光の発生、強度むらの発生などの問題が存在していた⁹⁾。今回は、めっき時に用いる治具を改良して段差誤差の低下を試みた。

銅基板を陰極としてめっきを施した場合、一般に基板のエッジ部分に電荷が集中し、基板中央部でのめっき層は薄くなる傾向にある。また、CGH 表面の電流密度が不均一な場合、めっき厚さも不均一になる。基板のエッジ部分での電流密度の不均一さをなくし、均一なめっき厚さを得るために、従来は基板より十分に広い面積の銅板を治具とし、治具を複数に分割して基板を挟みこむ形で保持してめっきを行っていた。しかし、基板との接触が側面のみであるため、導通が不十分であることや CGH 表面と治具表面の高さずれが生じていたことにより、めっき厚さがばらついていたと考えられる。そこで、基板を埋め込む形に治具を改良し、CGH 表面と治具表面の高さずれを解消できるように CGH 端部に位置決め用の段差を設けた。CGH と治具の形状を Fig. 5 に示す。

めっき厚さは、

$$\text{めっき厚さ} = k \times \text{電流値} \times \text{平均電流効率}$$

$$\times \text{めっき時間} / \text{めっきを施す面積} \quad (1)$$

で表される。 k はめっき金属によって決まる定数、電流値はめっき時に極間に流れる電流値である。平均電流効率は、極間に流れる電流のうち、実際にめっき金属の析出に寄与した割合を示しており、試料やめっき装置で決まる。従って、試料やめっき装置が決まれば、めっき厚さは、電流値とめっき時間で制御できる。

式(1)では、電流値はめっき厚さに影響するのみであるが、

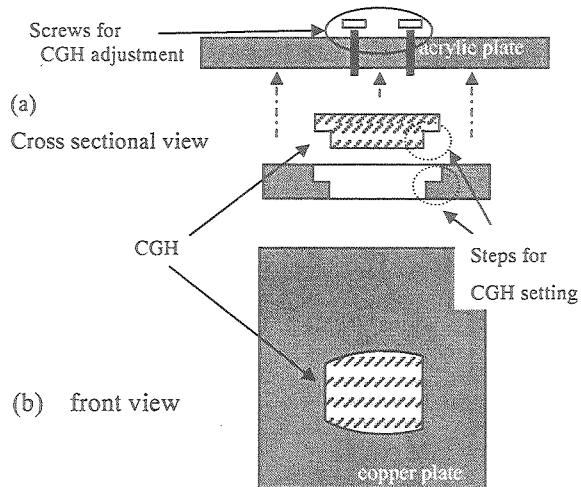


Fig. 5 Plating jig and CGH

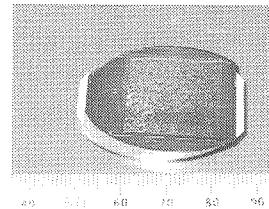
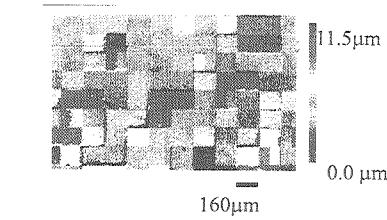
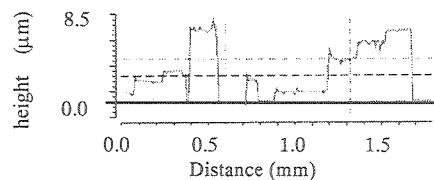


Fig. 6 Fabricated CGH



(a) Micrograph of CGH surface



(b) Cross-sectional feature of CGH

Fig. 7 Microstructure of the fabricated CGH surface

実際には、厚さの均一性や表面あらさにも影響を与える。ここでは、試験的に幾つかの条件でめっきを行い、厚さの均一性や表面あらさが最良になる電流値で 8 レベルの銅製 CGH を作製した。その後、表面の腐食防止とレーザ光の反射率向上のために、CGH 表面に金の薄膜を $0.05\mu m$ の厚さでスパッターコーティングした。

Table 1 Measured surface profile of CGH

Level	Designed Height (DH) [μm]	Average Height (AH) [μm]	Height Difference (AH-DH) [μm]	Height Difference (previous) [μm]	Standard Deviation [μm]	Standard Deviation (previous) [μm]	Number of plating times
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0
1	0.94	0.89	-0.05	0.10	0.06	0.18	1
2	1.87	1.87	0.00	0.28	0.17	0.41	1
3	2.81	2.87	0.06	0.27	0.29	0.49	2
4	3.75	3.97	0.22	0.42	0.17	0.42	1
5	4.68	4.72	0.04	0.56	0.29	0.62	2
6	5.62	6.03	0.41	0.55	0.16	0.96	2
7	6.56	6.84	0.28	1.04	0.06	0.78	3

4. CGH の評価

4.1 CGH の形状評価

製作したマルチレベル CGH を Fig. 6 に示す。CGH 中央部分に凹凸パターンが形成されている。また、Fig. 7 に 3 次元表面構造解析顕微鏡 (Zygo 社, New View 5020) を用いて計測した CGH の表面凹凸形状の一例を示す。Fig. 7 (a)から、CGH 面内にはピクセルの正方形形状 (一辺 160 μm) を最小単位とする CGH パターンが形成されていることがわかる。CGH 表面を数点測定した結果、ピクセル一辺の長さの誤差は 1 μm 以下であった。また、フォトマスクのアライメント誤差によって発生する各段ごとの位置ずれは 5 μm 程度であった。数値シミュレーションによると、この程度の位置ずれは回折像に大きな影響を与えないことがわかっている。また、Fig. 7 (b)から、CGH 表面の段差形状を認めることができる。

3 次元表面構造解析顕微鏡を用いて表面の凹凸形状を数点測定し、その結果をまとめたものを Table 1 に示す。また、従来の治具を用いて作製した CGH (以下、従来の CGH) の測定結果⁶⁾もあわせて示す。従来の CGH の測定結果は、Table 1 中で previous として示している。

従来の CGH と今回作製した CGH では、CGH パターンが異なっており、単純に比較はできないが、高さの差 (Height Difference) および高さの差の標準偏差 (Standard Deviation) は、大幅に改善されている。めっき浴など、他の条件は従来と同じであることから、この結果は治具を改良したことによるものと考えられる。治具を改良したことにより基板の導通が確実となり、基板と治具との高さずれも改善され、CGH 表面の電流密度の均一性が向上した。その結果、従来は電流密度の不均一により、めっき金属の付着速度にばらつきが生じ、高さのばらつきを引き起こしていたが、電流密度の均一性が上がったことにより、高さのばらつきは改善されたものと思われる。

今回作製した CGH では、高さの差がレベル 1~3 と比べてレベル 4~7 では大きくなっている。この原因を調べるた

Table 2 Details of plating height at center and edge of CGH pattern

Level	Designed Height (DH) [μm]	Average Height (center) [μm]	Height Difference (center) [μm]	Average Height (edge) [μm]	Height Difference (edge) [μm]	Number of plating times
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0
1	0.94	0.87	-0.07	0.94	0.00	1
2	1.87	2.04	0.17	1.79	-0.08	1
3	2.81	2.98	0.18	2.81	0.00	2
4	3.75	3.93	0.18	4.06	0.31	1
5	4.68	4.81	0.13	4.40	-0.28	2
6	5.62	5.84	0.22	6.12	0.50	2
7	6.56	6.87	0.31	6.78	0.22	3

めに Table 1 の高さの測定結果を CGH パターン中心付近とパターン端部に分けたものを Table 2 に示す。レベル 4~7 では CGH パターン端部での差が -0.28~0.50 μm と大きく、それに対して CGH 中心付近は、0.13~0.31 μm であった。このパターン端部のめっき高さの差が、Table 1 におけるレベル 4~7 の大きな高さの差の原因になっている。

端部においてめっき高さが大きくなるのは、CGH パターン外側のレジスト付近にある銅イオンが CGH パターン端部に付着するためだと推測される。一方、レベル 1~3 において、端部で高さが高くなかったのは、2 回目、3 回目のめっき時にレベル 1~3 の領域に付着するはずのめっき金属が、レベル 5~7 の領域に付着したためではないかと推測される。しかし、レベル 5 においては、端部の高さが設計値よりも小さくなっている、めっき高さに関するこれらの現象については、今後、さらに検討を行う必要がある。

4.2 CGH によるビーム整形の評価

製作した CGH の光学性能を評価するために、最大出力 10W の炭酸ガスレーザを用いて、ビーム整形の評価実験を行った。実験系を Fig. 8 に示す。発振器から出力されるレーザ光はビーム径 φ3.5 mm でガウス分布である。2 枚のビームスプリッタを用いてレーザ光強度を約 1/40000 に減光し、ビームエキスパンダにより直径を φ14 mm に広げた後、CGH に入射させる。CGH からの反射光を焦点距離 127 mm の

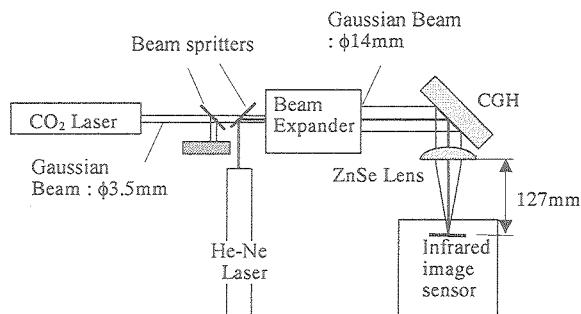


Fig. 8 Experimental setup for beam shaping with the fabricated multilevel CGH

ZnSe レンズによって集光し、赤外線カメラ（三菱電機製、IR-U300）で観察する。赤外線カメラによる観察結果を Fig. 9 に示す。TRI の文字を確認することができ、作製した CGH を用いることによりビーム整形を行えていることがわかる。また、スペックルのような強度むらも見られる。これは Fig. 3(b) に示す設計した CGH を用いた場合の強度分布のシミュレーション結果にも見られており、必然的に生じるものである。CGH のレベル数やピクセル数を上げることで、この強度むらは改善することができる。また、CGH の形状誤差も強度分布に大きく影響する。シミュレーションにより、CGH の形状誤差と得られた強度分布について検討した結果、今回作製した CGH のように、めっき厚さの場所的な不均一さがあった場合、強度むらはより助長されることがわかった。従って、CGH の製作精度をできる限り高める必要がある。

Fig. 9 の明るさのデータを数値化し、カメラのバックグラウンド強度の影響を取り除いて、整形ビームの強度分布を求めた。その結果、文字のない部分の強度（ノイズ）は 0~3（単位は任意）、文字部分の強度（0 次光による最大値を除く）は 0~14 で、文字のない部分の約 5 倍であった。また、最高強度（0 次光）は 18 であった。

整形したビームをアクリル板に約 3 秒間照射した結果を Fig. 10 に示す。レーザ出力は約 8W とした。レーザ照射時にはアクリルの燃焼を防ぐため、乾燥空気を試料に吹き付けた。TRI のロゴマークの形で、ほぼ設計どおりの大きさでアクリルが除去されており、アクリルへのマーキングを行うことができている。ただし、除去深さは強度分布を反映して一様でなく、0 次光のある位置が最も深く除去されていた。

5. 結 言

炭酸ガスレーザ光の強度分布を整形する CGH を試作し、整形したビームを用いてアクリル板にマーキングを行った。CGH の試作にあたっては、めっき厚さの均一性と精度を高めるために、従来用いていためっき用治具を改良した。

CGH はガウス形のレーザ光強度分布を TRI のロゴマークの強度分布に整形するよう設計し、銅の平板基板に、バターニングされたフォトレジストをマスクとして銅めっきを行う「マスクめっき法」で 8 レベルの CGH を製作した。

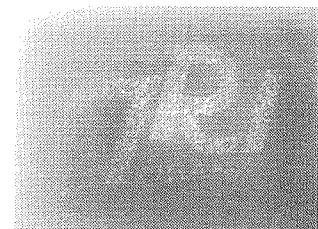


Fig. 9 Beam profile shaped by the multilevel CGH

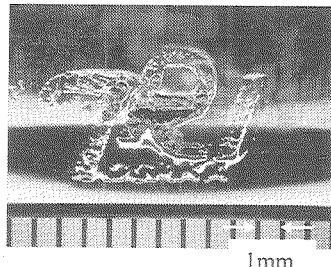


Fig. 10 Acrylic burnt pattern of the shaped beam; laser power 8W, irradiation time 1sec.

めっき治具は、導通と CGH の位置決め精度を向上させたものであり、改良した治具を用いることで、表面形状の高さずれとばらつきを、従来よりも改善することができた。

ガウス形の強度分布をもつ炭酸ガスレーザを用いてビーム整形の実験を行った結果、設計値どおりの強度分布を確認することができた。また、整形したビームをアクリル板に照射した結果、設計したマークをアクリル板にマーキングすることができた。

今回述べた CGH は銅で作製されており、高出力レーザに適用する場合には、他の素材の素子と比べて冷却等が容易となるという利点がある。今後、高出力レーザへの適用が期待できる。

参 考 文 献

- 1) Ichioka, Y.: State of the art of Computer Generated Hologram, Optics & Photonics, 204, (1996), 77. (in Japanese)
- 2) Haupt, Ch., Pahlke, M., Krupka, R. and Tiziani, H.J.: Computer-generated Microcooled Reflection Holograms in Silicon for Material Processing with a CO₂ laser, Appl. Opt., 36-19, (1997), 4411.
- 3) Kurisu, K., Hirai, T., Ushiro, T., Fuse, K., Okada, T. and Ebata, K.: Beam-splitting ZnSe Diffractive Optical Element, Proc. of SPIE, 4830, (2003), 313.
- 4) Chen, Y., Li, D. and Sheng, Y.: Beam-shaping element with reduced sensitivity to input variations, Appl. Opt., 36-3, (1997), 568.
- 5) Hagino, H., Park, C.S., Kato, N., Mitsumata, M., Kikuta, H. and Iwata, K.: Computer Generated Hologram on a Curved Surface for CO₂ Laser Beam Shaping, J. Jpn. Soc. Precision Engineering, 69-3, (2003), 417. (in Japanese)
- 6) Hagino, H., Park, C.S., Yokoi, M., Kato, N., Mitsumata, M., Kikuta, H. and Iwata, K.: Fabrication of Multilevel Copper Computer Generated Hologram for High Power CO₂ Laser Beam Shaping, J. Jpn. Soc. Precision Engineering, 70-9, (2004), 1180. (in Japanese)
- 7) Gerchberg, R.W. and Saxton, W.O.: A Practical Algorithm for the Determination of Phase from Image and Diffraction Plane Pictures, Optik, 35-2, (1972), 237.
- 8) Editing Committee for New Engineering Review of Coating: New Engineering Review of Coating, Industrial Technology Service Center Corp., (1988), 285. (in Japanese)