研 究

反応性イオンエッチングによる赤外ホログラム素子の加工*

河田耕一** 豊田隆一*** 河内義和**

Fabrication of An Ultra-red Hologram Optical Element with Reactive Ion Etching

Koichi KAWATA, Ryuichi TOYODA and Yoshikazu KAWAUCHI

Abstract

This paper concerns a fabrication of the hologram optical element for a carbon dioxide laser which is used on the scanner installed in the vision sensor of a mobile robot operating under harsh conditions.

Reactive ion etching (RIE) is employed to obtain a deep grating. The inclination angle of the wall of the grating can be adjusted by varying the oxygen gas flow rate, which varies the volume of undercut. The inclination angle is almost constant for the reactive gas flow condition and is not affected by the mask spacing. The calculated desirable profile of grating can be fabricated under suitable process conditions.

The irregularity of the fabricated grating profile on the hologram surface affects the local diffraction efficiency variation. As to the depth of the grating, the dimensional accuracy is increased by surrounding the material with a circular wall which evenly distributes the gas flow over the surface. However, the undercut or the inclination of the wall also slightly changes according to the location, and additional mechanical movement of the material or precise control of the gas flow is necessary to increase the accuracy.

The mean value for the diffraction efficiency of the fabricated hologram is 51.7%. An adequate image for recognition is obtained using a two-dimensional scanner with the hologram

* 1992年11月17日第2回電気加工学会全国大会にて発表

** 松下技研(株)

*** 松下通信工業(株)

element and the galvano-mirror and image reproduction with reflected light from the target.

1. 緒 言

災害現場において消火や緊急作業を行うロボットでは、煙や焰などが存在するため視界が妨げられる。このため、可視光以外の手段によってこれらの環境を透視し、対象物の認識を行うことが必要になる。CO₂レーザは波長が10.6 μm と長く、煙や焰などの下での伝播特性に優れていると考えられ、CO₂レーザを用いたアクティブな視覚センサを用いることにした¹⁾。ロボットは不整な災害現場を自走し、またセンサのみを緊急活動者が携帯して探索に使用することも想定されるので、小型、軽量で振動、衝撃に強いことが要求される。ホログラムに回転を与えて走査を行うホログラムスキャナ^{2)~4)}は円板であるため、目的に適合している。

ホログラムの課題の一つは回折効率を高めることであり、そのためには深溝格子を有するレリーフ形ホログラムが望ましい。深溝の加工のため反応性イオンエッチング(RIE)を用いることとし、透過材料であるGe基板の加工に対して研究を実施した。まず格子溝形状と回折効率の関係を検討し、解析からくる必要な形状を得るための加工条件を求めた。また、ホログラム基板上の位置による寸法、形状の差は回折効率のばらつきとなるため、精度の向上について検討を行った。これらの結果を基盤として、直線等ピッチの単純格子のホログラムによるスキャナを製作し、揺動ミラーと組み合わせて2次元走査を行い、対象物の反射光よりその画像を形成して性能を確認した。

2. ホログラムスキャナと回折効率

図1にスキャナの構成を示す。10個のホログラム素子が回転軸上に同心に取りつけられ、ガルバノミラーと合わせて2次元の走査を行う。CO₂レーザ光は距離計測のために変調された後、スキャナによって偏向され対象物を走査する。対象物による反射光は再びスキャナを経由して戻って検出器に入り、光電変換された信号は増幅後復調して振幅信号と位相信号を分離し、おのこの明暗情報および距離情報として用い、対象物の像を形成すると共に位相差から光の伝播時間を求め、対象物との距離を測定する。スキャナの性能としては、像情報の形成に十分な精度を有することと、微弱な信号の授受のため、ホログラムの回折効率、および開口面積を高め、光の損失を最小限にすることが必要である。

反射光からの計測では、走査の直線性、等

図1 2次元スキャナの構成

速性なども課題であるが、微弱な光量を扱うため、ホログラムでは回折効率を高めることが最も重要である。高い回折効率はパターンに対応した立体的なレリーフ（格子）を有する位相型ホログラムによって得られ、最近の解析結果に基づけば、格子の形状、寸法を制御することで高い回折効率の得られることが示されている⁶⁾。

図2はX軸方向に周期構造を持つ誘電体表面レリーフ格子である。格子表面より上側は自由空間で屈折率は $n=1$ であり、表面より下側は屈折率は $n=n_0$ の損失のない誘電体媒質である。間隔 d 、深さ h の格子に波長 λ の平面波が入射角 θ で入射するものとしてGe基板に対し各種の格子の形状と回折効率の関係について検討した。二等辺三角形、正弦波、および矩形断面を持つ格子に対し、 h/d を変化して計算を行った。計算では $d=9\mu\text{m}$ とした。結果を図3に示す。回折効率は形状、溝深さの両者によってかなりの影響を受けることがわかる。また、二等辺三角形断面において、 h/d が1付近で70%程度の回折効率を得られる。

ホログラムの設計では、計算機ホログラム(CGH)の手法によって、走査の集光性、直線性、等速性を最適化することが可能であるが、ホログラムパターンは曲線となり、また格子のピッチも不等となる。したがって、格子の断面の寸法、および格子に対する入射条件がホログラムの個々の場所によって異なることになり、回折効率の計算において非常に複雑になるのみならず、断面の寸法が場所的に異なるため加工上にも問題が多い。一方、ホログラムに収束機能をもたせなければ空間周波数分布は一定でよく、直線等ピッチの単純格子でよい。この場合、等速性、および直線性は必ずしも保証されないが、得られる画像に多少のひずみがあったとしても、対象物の識別に大きい支障はないと考えられる。このため、回折効率をより重視する観点より、スキャナに使用するホログラムは直線等ピッチの溝から成るパターンを用いることにした。

図2 深溝格子のホログラムの断面

図3 Ge基板による種々の形状のホログラムに対する回折効率の計算結果($d=9\mu\text{m}$)

3. 深溝格子の加工

深溝格子の加工にはRIEを採用することにした。RIEは深溝を加工すると同時に、断面形状を制御することも可能と考えられる。RIEでは、反応ガスのプラズマ中で生成したラジカルの化学反応によるエッチングと、イオンが試料面に対して垂直に機械的に衝突することによる、ダメージ層の生成、あるいはスパッタリングが同時に行われる。前者では等方的に加工が進行してアンダーカットを生じる。後者は異方的で垂直方向に加工が進行する。反応ガスその他の加工条件によって両者の比率が異なってくるため、加工された断面形状が変化する。したがって、計算結果から必要な格子の断面形状を設定し、その形状を実現するRIE加工条件を定めることができると考えられる。

RIEによる格子の加工は次のような条件で検討することにした。

- 1) 格子断面を二等辺三角形、 $h/d=1$ にできるだけ近づけること。

格子の先端が尖っていることは加工上からも望ましい。格子上部に平坦部がある場合、その幅はマスクの幅によって基本的に定められるが、アンダーカットがあるため加工時間、加工量によって変動しやすい。

- 2) 加工時間、加工量によって溝形状、溝深さが変化しないこと。

この条件は、格子先端が尖っている形状で、かつ側壁の角度が加工の進行によって変化せず、常に相似的な形状が得られることにより実現できる。

- 3) ホログラム素子内、および素子間での格子の形状、寸法のばらつきを極力小さくすること。

以上のことからGeのRIEに関し実験を行った。基板面にAl薄膜の平行な縞パターンを形成し、これをマスクとして図4に示す平行平板型RIE装置を用いて加工を実施した。ガスは試料上方よりチャンバに導入され、チャンバ側壁に設けられた排気孔より排出される。実験ではガス流の制御のため、図のように試料を円筒で囲む試みも行った。チャンバ内を減圧した後反応ガスを注入し、圧力を 7.5×10^{-4} Pa程度に保ちRF出力を加えることにより加工を行う。反応ガスには予備実験の結果、 $\text{CF}_4 + 5\% \text{O}_2$ 、 CHF_3 、および O_2 の混合ガスを用いた。試料には直径25.4mm、厚さ3mmの多結晶Geを用いAlマスクの厚さは800nmとした。パターンのピッチは $10 \sim 20 \mu\text{m}$ である。

加工面は一般的に図5のようになり、次の問題がある。

- 1) 溝内にひげ状の生成物の発生が見られる。
- 2) Alマスクの損傷が大きい。
- 3) 仕上げ面あらさが悪い。

このため、RIEの条件について検討を加

図4 RIE加工装置の断面

えた。

1) については生成物の分析の結果、Alの成分が認められ、Al膜がスパッタされることによってGe面に付着し、ホイスカ状に発達するのではないかと考えられる。加工後Alマスクの除去を兼ねて、50℃の磷酸50%水溶液を用いて5分間エッチングすることで除去が可能となった。2), 3)についてはイオンの機械的作用が強い場合に促進される傾向が見られた。したがって加工時間は長くなるが、小さいRF出力が望ましい方向と考えられる。

実験において設定した加工条件の代表例を表1に、また各条件において得られる断面形状を図6に示す。条件1では矩形に近い形状で溝深さ8.5 μ m、条件2では三角波形状で溝深さ9 μ m、条件3では台形形状で溝深さ5.3 μ m、条件4では斜面形状は条件3と似ているが、溝深さ7.7 μ mとなった。以上のように、加工条件によって、溝断面の形状、および深さを変化させることが可能であることが判明した。

マスク：Al、ピッチ20 μ m
 反応ガス：CF₄ + 5%O₂ 30ml/min
 CHF₃ 10ml/min
 O₂ 1ml/min
 圧力：5.3 $\times 10^{-4}$ Pa
 RF出力：250W
 加工時間：30min

図5 GeのRIE加工実験における加工面の例（マスク除去前）

表1 RIE加工条件の代表例

条件 No.	エッチングガス			真空度 (10 ⁻⁴ Pa)	RF出力 (W)	加工時間 (min)
	CF ₄ + 5%O ₂ (ml/min)	CHF ₃ (ml/min)	O ₂ (ml/min)			
1	30	10	0	5.3	200	30
2	30	10	1.5	5.3	200	15
3	30	10	3	5.3	200	8.17
4	30	10	3	5.3	200	12

4. RIE加工条件

格子のRIE加工に関し、O₂ガス流量、マスク寸法の断面形状に及ぼす影響、および試料内での形状、寸法のばらつきに関して実験を行った。

実験の条件は次のとおりである。

ピッチ : $10\mu\text{m}$

マスクスペース幅 : $5\mu\text{m}$

図6 RIE加工条件による断面形状の差異 (加工条件のNo.は表1に同じ)

試料 : 多結晶および単結晶Ge, 直径25.4mm, 厚さ3mm

格子ピッチ : $9\mu\text{m}$

反応ガス : $\text{CF}_4 + 5\%\text{O}_2$ 30ml/min

CHF_3 10ml/min

O_2 必要により添加

真空度 : 5.3×10^{-4} Pa

RF出力 : 200W

(1) O_2 ガス流量と断面形状

O_2 ガスにはRIEにおける化学的作用を促進する働きがあり、反応ガスへの O_2 ガスの添加量によってRIEの化学的作用の効果が変化する。その結果、アンダーカットの大小が制御され溝側壁の傾斜が調整できると考えられる。このため O_2 ガス流量を変化してRIE加工を行った。加工深さは $5\sim 6\mu m$ を目標にした。したがって加工時間は一定ではない。Alマスクのスペース幅は $4\mu m$ とした。

SEMによる測定より求めた加工後の格子側壁の平均傾き角と、添加 O_2 ガス流量の関係を図7に示す。 O_2 ガス添加のない場合には、ほぼ垂直に近い形で加工が進行し断面は矩形形状になる。 O_2 ガス流量の増加に伴いアンダーカットが増加し、側壁の傾きは次第に大きくなる。

(2) マスクのスペース幅と断面形状

基板上に形成したAlマスクのスペース部分（窓部）からエッチングが進行する。その影響を見るため、マスクのスペース幅を $1\sim 4\mu m$ に変化して加工を行った。 O_2 ガス流量は $3ml/min$ とし、加工深さは $7.5\mu m$ を目標とした。

加工後の断面のSEM写真を図8に示す。また、図9

図7 添加 O_2 流量と溝側壁平均傾き角の関係

(a) $1\mu m$

(b) $2\mu m$

(c) $3\mu m$

(d) $4\mu m$

図8 マスクスペース幅を変化した場合の断面形状

深さ：記入以外 $7.5\mu\text{m}$

図9 マスクパターンのスペースと側壁の平均傾き角，アンダーカット量の関係

図10 溝の深い場合の格子断面形状

にマスクのスペース幅と，測定より求めた側壁の平均傾き角，およびアンダーカット量（格子上面の幅－マスクのスペース幅）の関係を示す。格子上面の平坦部の幅はマスク寸法によって当然異なるが，傾き角，アンダーカット量には大きい変化が認められない。さらに加工時間を増し，溝を $12\sim 15\mu\text{m}$ と深くした場合でも側壁の傾きは変わらない。溝を深く加工した場合の断面のSEM写真を図10に示す。

以上の結果より，加工状態を模式的に示したものが図11である。溝側壁の傾きは反応ガスの化学的作用により決定され，マスクのスペース幅，溝の加工深さによらない。一方溝底面の幅は，主として

図11 RIEによる溝形状創成の模式図

マスクのスペースを通過するイオンの垂直方向の機械的作用により決まり、ほぼマスクのスペース幅に等しい。得られる断面形状はこれらを合成した結果となる。

5. 素子内での形状、寸法のばらつき

ホログラム素子内での格子の形状、寸法のばらつきは、走査位置による回折効率の変動を生じて対象物からの反射信号に影響を与え、画像形成時の画質が劣化する。したがって、ホログラム素子内での格子の形状、寸法は可能な限り均一でなくてはならない。

図12は、直径25.4mmのGe基板面の半径

図12 基板上の位置による溝深さの差異

加工時間：30分

材 料：多結晶Ge

円筒高さ：30mm

図13 円筒障壁を設けた場合の位置による溝深さの差異

方向の各位置に格子を作成し、その溝深さを表面あらさ計によって測定した結果である。試料には多結晶Ge、および異なる結晶方向をもつ2種の単結晶Geを用いた。いずれの場合も周辺に向かうに従って溝深さが大きくなる。単結晶に比し、多結晶の方が溝深さの変化量が大きい、結晶粒界をもつため、加工条件の変動の影響を受けやすいことによると考えられる。溝深さの変化量に対する単結晶(111)と(100)の差の影響はあまり認められない。加工量の場所による差異は、試料表面での反応ガスの流速、あるいは格子に対する流れの方向が異なるためと推定される。

このため、加工精度向上の対策の一つとして、試料を円筒で囲みガスの流れを均一化することが考えられる。図13は試料を異なる直径の円筒で囲んで加工を行った結果である。極端に円筒が小さく、

その内径と試料外径が等しい場合には、周辺部、および中央部で溝深さが小さくなる。これはガスの淀みと渦が発生し、径方向のガスの流速分布に大きい差ができるためと考えられる。これに対し、内径が比較的大きい場合には溝深さの差異が小さくなることが認められる。

さらに、回折効率は溝側壁の傾き角によっても影響されるので、深さと共に側壁の角度についても均一であることが必要である。図14は内径63.5mm、高さ30mmの円筒で囲んで加工を行った試料を用い、SEMによる測定結果より溝深さと共にアンダーカット量を求め

た結果である。周辺になるに従って溝深さは増すが、アンダーカット量は減少する。すなわち側壁の傾斜が急になる。これはエッチングガスの化学的作用と、イオンによる機械的作用のバランスが中心部と周辺部とで異なるためと考えられる。

より高精度の加工のためには、このような試料面上での場所による加工状態の差を無くすことが必要である。これには、反応ガスの速度分布と方向を試料面上で一定にするようなチャンバ構造の見直しと共に、チャンバ内で試料に何らかの機械的運動を加えて加工の平均化を計る方法も考えられる。

6. ホログラム素子の製作と画像形成

以上の結果に基づき直径25.4mmの円板のホログラム素子の製作を行った。理想的には断面は二等辺三角形であることが望ましいが、RIEではイオンの機械的作用のため、格子底面に平坦部ができることはやむ得ず、図15に示すような三角波となっている。なお、格子の反対面にはPbTe、ZnSによる反射防止膜をつけるようにした。

設定した加工条件は以下のようである。

試料：単結晶(100)Ge、厚さ3mm

パターン：ピッチ $9.2\mu\text{m}$ 、ライン幅 $4\mu\text{m}$

目標深さ： $6.0\sim 6.2\mu\text{m}$

反応ガス： $\text{CF}_4 + 5\% \text{O}_2 \cdots \cdots 30\text{ml/min}$

$\text{CHF}_3 \cdots \cdots 10\text{ml/min}$

$\text{O}_2 \cdots \cdots 3\text{ml/min}$

材料：単結晶Ge(1, 0, 0)

図14 アンダーカット量、溝深さの試料上の位置による差異

図15 製作した三角波状断面のホログラム素子の格子形状（ピッチ： $9.2\mu\text{m}$ ）

試料を囲む内径65mm，高さ30
mmの円筒使用

真 空 度： 5.3×10^{-4} Pa

R F 出力：200W

図16は製作した1個の素子について，入射角に対する回折効率の依存性を測定した結果であり，計算値と対比した。回折効率の最大値，および入射角依存性の傾向は計算値と実測値ではほぼ等しいが，回折効率の最大値を与える入射角は異なる。これは両者の間での格子断面形状の差と，反射防止膜の影響の両者に起因すると考えられる。

図16 RIEにより製作したホログラム素子の回折効率の実測値と計算値

対象物による反射光の受光量を増すためには，ホログラムの開口面積を増大することが必要である。ホログラム素子を扇形にすることが円板上の面積を有効に利用することになる。素子を取りつける円板の外径を156mmとし，1個のホログラム素子を直径50mm，厚さ3mmのGe基板より扇形形状に切り出すようにし，格子ピッチを $9.2\mu\text{m}$ ，目標深さを $6.3 \sim 6.5\mu\text{m}$ として素子の製作を行った。完成したホログラム素子の回折効率を，中心，および中心から内側，外側へ10mm離れた位置の計3箇所において測定した。結果を図17に示す。回折効率が60%程度の素子，あるいは1個の素子上のばらつきの小さい素子も存在するが，素子内でのばらつきが20%近い素子も見られる。平均した回折効率は51.7%である。扇形のホログラム素子を10個配列したホログラムディスクを図18に示す。

製作したホログラムディスクとガルバノミラーを用いて2次元スキャナを製作し，運動物体の画像を形成した。発泡スチロール製の人形を，スキャナより1.5mの距離の回転ステージ上に置き，ステー

ジを回転させながらCO₂レーザ光によって走査を行った。ホログラムディスクの回転数を6000rpmとし、画像を7.1フレーム/sで形成した。10個のホログラムのうち、素子内での回折効率の差の少ないホログラム1個を用いて得られた画像を図19に示す。対象物の姿を十分認識することが可能であり、視覚センサとして十分使用が可能と判断される。

図17 扇形ホログラム素子の回折効率測定結果

図18 扇形状の素子を組立てたホログラムディスク（外径：155mm）

図19 2次元スキャナにより走査したCO₂レーザ光の反射光より形成した像

7. 結 言

- 1) ホログラムの回折効率は格子の形状、寸法によって影響を受けるが、RIEは加工条件を適切に選択することによって、解析結果より得られる必要な格子断面形状を実現することが可能である。
- 2) RIEにおいては、O₂ガス流量によりアンダーカット量を変化して格子側壁の傾き角を制御することが可能であり、傾き角はAlマスクの寸法によらずほぼ一定である。
- 3) 格子の深さは加工面上の場所によって差異がある。試料を円筒で囲んだ場合、その内径が過小な場合には淀み、渦の発生によって深さの差が大きくなるが、適切な寸法では深さ精度が向上することが認められた。一方、場所によるアンダーカット量の変化もあるため、より高い加工精度を得るには、チャンバ構造の見直し、試料への機械的運動の付加などが必要と考えられる。
- 4) 製作したホログラム素子の回折効率測定結果の計算値との対比では、回折効率の値はほぼ等し

いが、最大値を与える入射角に差異があり、格子形状の差、および反射防止膜の影響に起因すると考えられる。また、扇形ホログラム素子10個の回折効率はや平均51.7%であった。1個の素子内での位置による回折効率のばらつきが20%程度の素子も見られたが、少ない素子も存在した。

- 5) 素子を円板上に組み立ててホログラムスキャナを製作し、揺動ミラーと組み合わせて2次元スキャナを構成し、走査したCO₂レーザ光の反射光より運動物体の画像形成を行った結果では、十分に対象像を認識することができ、視覚センサに使用することが十分可能と判断された。

本研究は通商産業省工業技術院大型プロジェクト「極限作業ロボットの研究開発」の一環として、新エネルギー産業技術総合開発機構(NEDO)から委託を受けて実施したものである。

参考文献

- 1) 内藤宏之：防災ロボット用視覚センサ，光技術コンタクト，26，7，(1988) 16.
- 2) I. Cindrich：Image Scanning by Rotation of a Hologram, Appl. Opt., 6, (1967) 1531.
- 3) Y. Ono and N. Nishida：Holographic Laser Scanners Using Generalised Zone Plates, Appl. Optics, 21, 24 (1982) 4542-4548.
- 4) Y. Ishii and K. Murata：Optimum Holographic Disk Scanners with Bow-locus Corrections, SPIE 673 Int. Conf. on Holography Applications, (1986) 426-433.
- 5) K. Rokushima, J. Yamakita, S. Mori and K. Tominaga：Unified Approach to Wave Diffraction by Space-Time Periodic Anisotropic Media, IEEE Trans. on Micro-wave Theory and Techniques, MTT-35, 11 (1987) 937.

(1994年4月2日 受付)