

光を応用したマルチメディア機器などで超精密光学素子に対するニーズが高まっている。マイクロメートルオーダーの微細溝構造による光の回折効果を利用して、レーザービームの分割、偏向、形状変換など、複数の機能を1枚の平板素子で実現するホログラフィック光学素子を開発した。

素子の金属原盤への複雑なホログラフィックパターンへの加工は、超精密加工により実現した。また、ホログラムの断面を鋸(きよ)歯状に加工することで、不要な回折光を抑圧し、高効率化を図った。原盤の微細なパターンは、光学プラスチック材料に高精度に転写し、射出成形で素子を作成した。これらの技術により、光利用効率は従来の8%から14%に向上した。

Industrial demand for the supply of ultraprecision optical components is increasing in the field of optical multimedia devices. We have developed a multifunctional optical element which is able to divide and deflect a laser beam and to convert its profile. This element has a complex holographic pattern consisting of fine grooves having a pitch of less than 5  $\mu\text{m}$ .

The complex holographic pattern of the metal master was fabricated by ultraprecision machining. High efficiency was achieved by machining of the blazed hologram cross section that suppresses excessive diffraction. The fine pattern of the master was copied precisely on optical plastic by injection molding. By employing these technologies, we have improved the light efficiency from 8% to 14%.

### 1 まえがき

DVDをはじめとする映像・情報機器は近年、高密度・高精度化が進展しており、情報の記録・再生などにはレーザーを用いた光学系が多く用いられている。機器の小型化、多機能化に伴い、光学系の集積化が進み、光学素子には複雑な形状と高い精度が要求されている。従来のレンズに対し、光の位相を制御できる自由曲面レンズや回折格子から成るホログラフィック光学素子 (HOE: Holographic Optical Element) を用いることで光ビームを多機能にコントロールでき、これらの要求にこたえることができる。このため、これら光学素子の開発、製品への実用化が活発化している。

このような精密光学素子の開発においては、超精密加工装置の開発をはじめ、光ピックアップ用対物レンズやSOR (Synchrotron Orbital Radiation) 用 X 線トロイダルミラーなどを実用化してきた。

今回、マルチメディア機器に適用可能な HOE を開発し、必要な性能を達成したので、製造プロセスおよび評価について紹介する。

### 2 HOE の概要

HOE は、図1に示すように、マイクロメートルのピッチで多数の微細溝を刻んだもので、光の回折現象を利用して、

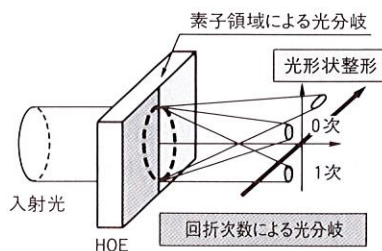


図1. HOE の機能 1枚でレーザービームの分割、偏向、形状変換を行うことができる。

Functions of HOE

ビームの分割、偏向、形状変換を行うことができる。従来、これを行うにはビームスプリッター、レンズなど複数の素子で構成していたものを1枚の平板に集積化でき、次世代の素子として注目されている。

この断面形状が矩(く)形形状のHOEは、フォトリソにより実用化されていたが、光の利用効率が低い問題があった。そこで、図2に示すように、断面形状を鋸歯形状にすることにより、利用効率を高めることができる。われわれはまず、光学設計により必要な精度を求め、これを実現するための加工法から検討した。

### 3 光学設計

高い光利用効率を安定して得るためには、加工誤差と光利用効率の関係を定量化する必要がある。溝形状加工にお

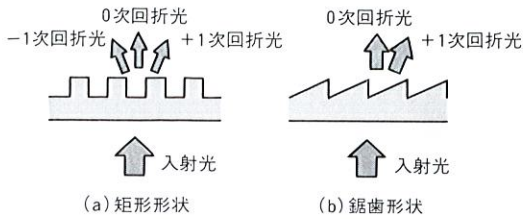


図2. HOEの断面形状と光利用効率 断面の溝形状を鋸歯形状にすることにより光利用効率が向上する。

Cross-sectional outline and light power efficiency of HOE

ける溝深さを  $D$ 、溝の一周期内の有効領域比を  $d$  とすると、光の利用効率  $E$  と  $D$ 、 $d$  には以下の関係がある。

$$E = (\Phi / (-2\pi(d-1))) \text{sinc}^2(\Phi/2) \text{sinc}^2(\Phi/2 - \pi d) \quad (1)$$

ここで、 $\Phi = 2\pi(n-1)D/\lambda$  ( $n$ : 屈折率,  $\lambda$ : 波長)

図3に  $E$  と  $D$ 、 $d$  の関係を示す。効率を最大にするためには、加工可能な有効領域比  $d$  を考慮して深さ  $D$  を決めることが必要である。

実際のHOEでは、基板-空気間の境界反射による光損失が発生する。特に、0次光と1次光をともに利用する光学系では、理論的な光利用効率を  $E$ 、1面当たりの透過率を  $\tau$  とすると、実際の光利用効率  $E^*$  は以下ようになる。

$$E^* = E\tau^4 \quad (2)$$

一例として、 $E^* = 14\%$  にするためには、透過率  $\tau$  を 0.97 とすれば、 $E = 15.8\%$  が必要になる。この場合、有効領域比  $d$  は 0.9 以上、深さの精度は  $\pm 0.03 \mu\text{m}$  以下が要求される。

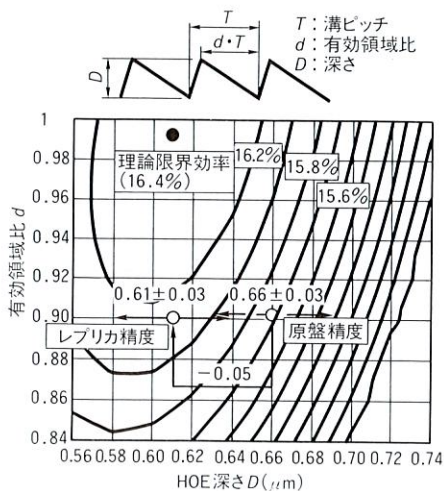


図3. HOEの加工誤差と光利用効率 光利用効率を高めるためには、最適形状の設定と加工精度が重要である。

Fabrication error and light power efficiency of HOE

## 4 製造プロセス

HOEの製造プロセスは、一般の光学素子と同様に原盤となる金型の製作、成形による光学材料への転写、表面処理により製造される。図4に試作したHOEの製造プロセスを示す。HOEのような精密光学素子では原盤の精度および転写性が素子の精度を決定する。



図4. HOEの製造プロセス マスタとなる原盤の加工精度とレプリカへの転写性が重要である。 HOE fabrication process

### 4.1 原盤加工

HOEは任意の位相伝達特性をもつように設計するため、溝形状は高次多項式で表現される。このような鋸歯形状の自由曲線による微細溝加工は従来からの機械加工やフォトリソプロセスでは困難である。そこで、われわれは集束イオンビーム (FIB: Focused Ion Beam) および4軸の切削加工により原盤加工を試みた。

4.1.1 FIB加工 FIB加工では、Gaイオンをイオン源とし、静電レンズで加速・集束して対象物に衝突させて除去加工を行った。溝形状の加工は静電レンズによるビームの位置と照射時間によって制御した。材料には加工レートが優れたAuをメッキした基板を用いた。図5に加工後の溝形状を原子間力顕微鏡 (AFM: Atomic Force Microscope)

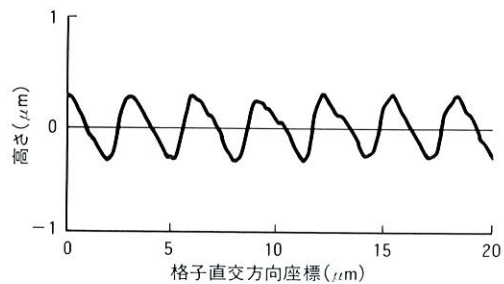


図5. FIBによる原盤加工形状 FIB加工により微細溝の加工を行った。

Fabricated shape of master by FIB



で測定した結果を示す。深さおよびピッチは目標値に対して $\pm 0.05 \mu\text{m}$ 以下の高い精度が得られた。しかしビーム直径の制約から有効領域比  $d$  が 0.75 と低く、また、加工レートが低く、加工に長時間を要することがわかった。

**4.1.2 切削加工** 切削加工に必要な自由度は、溝曲線形状に 2、溝深さが一定でピッチ可変な溝断面加工に 1、さらに切り込み制御に 1 の、合計 4 自由度が必要である (図 6)。加工物には切削性に優れる無酸素銅を用い、工具には単結晶ダイヤモンドバイトを使用し、4 軸超精密 CNC (Computerized Numerical Control) 加工装置 (図 7) により加工した。図 8 に原盤の AFM による断面形状測定結果を示す。深さ精度  $\pm 0.03 \mu\text{m}$  以下、有効領域比 0.87、表面粗さ  $17 \text{ nmRmax}$  以下と目標とする精度を得た。

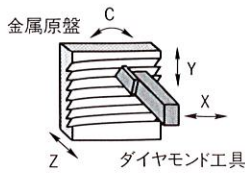


図 6. 切削加工による原盤製作 4 軸切削加工により微細溝の加工を行った。  
Fabrication of master by machining

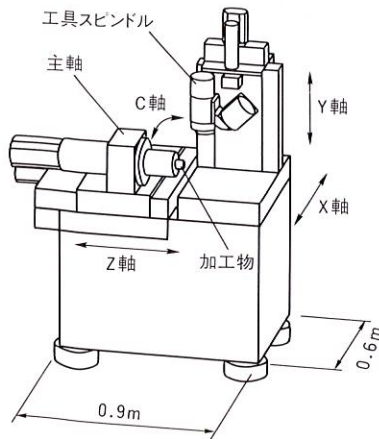


図 7. 超精密 CNC 加工装置 超精密 4 軸 CNC 加工装置により原盤を切削加工した。  
Ultraprecision CNC machine tool

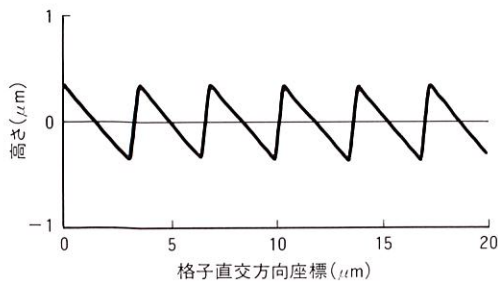


図 8. 切削加工による原盤加工形状 切削により微細溝が加工できた。  
Fabricated shape of master by machining

## 4.2 射出成形

超精密切削加工した原盤を金型としてプラスチック射出成形を行い、溝の転写性を評価した。図 9 に AFM による評価結果を、図 10 に外観を示す。原盤とほぼ同程度の精度が得られ、良好な転写性が得られた。

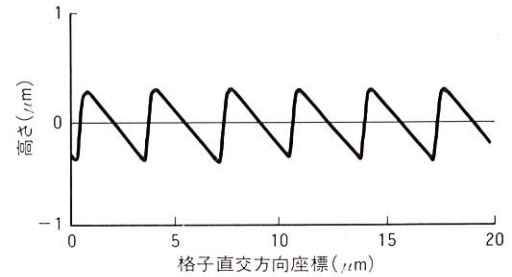


図 9. 射出成形による原盤転写形状 プラスチックの射出成形により原盤を精密に転写できた。

Fabricated shape of replica by injection molding

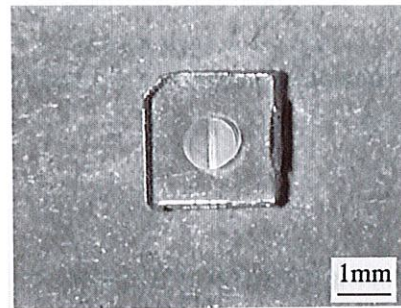


図 10. HOE の外観 射出成形で完成した HOE。原盤とほぼ同程度の精度が得られる。  
Photograph of HOE

## 4.3 光学特性評価

試作した HOE は 0 次光と +1 次光をともに使用することを想定して設計した。そこで、図 11 に示す方法によりナイフエッジ法で回折効率を評価した。評価結果の一例を図 12 に示す。測定は HOE を装置に搭載しない状態の光強度を測定し、焦点面をナイフエッジでスキャンし、強度の差分から各次数の回折効率を算出した。AR (AntiReflection) コートを施した場合の 0 次と +1 次光の回折効率の積は、実測で

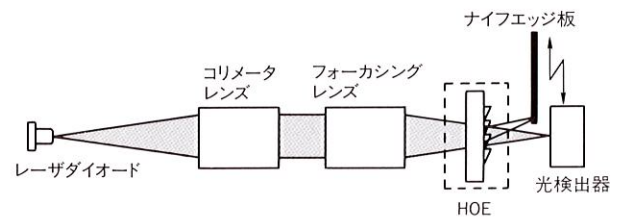


図 11. HOE の光利用効率測定 ナイフエッジ法により光利用効率が測定した。  
Measuring light power efficiency of HOE

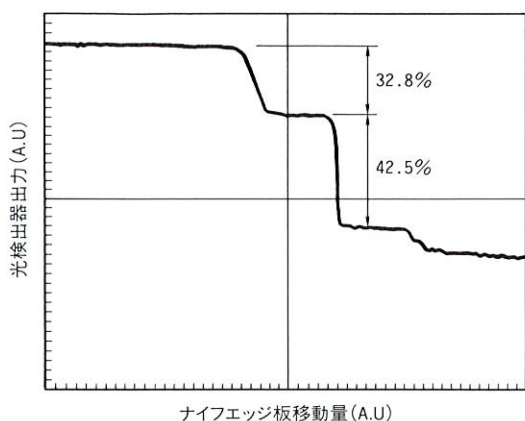


図12. 利用効率測定結果 ナイフエッジ移動時の光量変化からHOEの利用効率が計算できる。

Result of measuring light power efficiency of HOE

13.9%が得られた。これは境界面での反射損失を0とした場合の効率15.5%に相当し、鋸歯形状HOEの理論限界効率16.4%に近い値である。従来の矩形形状格子の理論限界効率は10.1%であり、この試作によるHOEは従来のフォトプロセスなどによる矩形形状格子に比較して、大幅な効率向上を図ることができた。

## 5 あとがき

ミクロンオーダの微細溝をもつ鋸歯形状HOEを開発した。原盤は4軸CNC超精密加工装置により切削加工した。これを基に射出成形によりレプリカを製作し、回折効率を評価した。その結果、光利用効率で14%が得られ、従来の矩形形状HOEに比べ、大幅な効率向上を図ることができた。

今後、このHOEを製品に応用し、マルチメディア機器をはじめとする製品の小型・高機能化へ貢献させていきたい。

## 謝辞

この研究の一部は、(財)神奈川科学技術アカデミー“極限メカトロニクス”プロジェクト、樋口俊郎プロジェクトリーダー(東京大学工学部教授)および同プロジェクト、山形豊研究員(現在、理化学研究所素形材工学研究室)にご指導、ご協力をいただいた。両氏および関係各位に感謝の意を表する次第である。

## 文献

- (1) 高島 譲, 他: ホログラフィック光学素子の製作と評価, 光学連合シンポジウム福岡'96 予稿集, 6 aD 05, pp.91-92 (1996)
- (2) 山形 豊, 他: 精密切削によるブレース化された自由曲線回折格子の製作, 精密工学会春期大会予稿集, (1996)
- (3) Y. Yamagata, et al: Fabrication of micro mechanical and optical components by ultra-precision cutting, Microelectronics Structures and MEMS for Optical Proceeding II, SPIE 2881, pp.148-157 (1996)
- (4) 上田勝宣, 他: 超精密部品加工システム, 東芝レビュー, 48, 6, pp.479-482 (1993)
- (5) 上田勝宣, 他: 光学部品の超精密加工, 機械の研究, 40, 10, pp.1095-1102 (1988)



高島 譲 Yuzuru Takashima

生産技術研究所 精密技術研究部。  
精密機器および精密加工技術の研究・開発に従事。  
Manufacturing Engineering Research Center



天野 啓 Akira Amano

生産技術研究所 精密技術研究部研究主務。  
精密加工技術の研究・開発に従事。  
Manufacturing Engineering Research Center



北村 優 Masaru Kitamura

生産技術研究所 精密技術研究部研究主務。  
精密機器および精密加工技術の研究・開発に従事。  
Manufacturing Engineering Research Center