

技術報告

高効率インラインホログラムレンズの作製

劉 中本*・久保田敏弘**・小瀬 輝次***

* 東京大学生産技術研究所 〒106 東京都港区六本木 7-22-1

** 京都工芸繊維大学工業短期大学部写真工学科 〒606 京都市左京区松ヶ崎橋上町

*** 千葉大学工学部画像工学科 〒260 千葉市弥生町 1-33

(1983年11月26日受理)

Fabrication of High-Efficient In-line Hologram Lens

Zhong-Ben LIU,* Toshihiro KUBOTA** and Teruji OSE***

* Institute of Industrial Science, University of Tokyo,
7-22-1, Roppongi, Minato-ku, Tokyo 106** Department of Photographic Technology, Kyoto Technical University,
Matsugasaki, Sakyo-ku, Kyoto 606*** Department of Image Science and Engineering, Faculty of Engineering, Chiba University,
1-33, Yayoi-cho, Chiba 260

A high-efficient in-line hologram lens was developed by combining two thick off-axis holograms. A method for fabricating the lens are reported. The diffraction efficiency of 72% have been achieved by recording the lens in methylene blue sensitized dichromated gelatin plate. When the lens was used as a coupler for optical fiber, the total coupling efficiency of 49% and 7% was obtained for single mode fiber and dual core fiber, respectively.

1. はじめに

ホログラムレンズはガラス製の従来のレンズに比べて軽く、複製が容易であるため、光ファイバーカップラー¹⁻⁵⁾、光ディスク用ピックアップレンズ⁶⁾などマイクロプロセッサ用の素子として適している。

このホログラムレンズを光学系に組み込んで使用する場合、調整の容易さの点からオフアキス型よりインライン型のほうが有利であると考えられるが、この素子が有効に利用できるためには回折効率が高くなくてはならない。通常の干渉法で作製されたインラインホログラムでは全面にわたって厚いホログラムにすることは不可能であって、中心部の回折効率が低くなるため全回折効率は高くならない。しかし、オフアキスホログラムでは高い回折効率になりうるということが知られており、これを2

枚組み合わせれば高効率のインラインホログラムが得られる。複数のオフアキスホログラムを組み合わせた光学系についてはいくつかの論文が発表されている。低分散、低収差を目的とした Latta の理論的解析⁷⁾、低収差結像レンズのための Richter らの研究⁸⁾、また光ファイバー間の結合において位置合せの許容度をゆるめるための Leite らの研究⁹⁾などがそれである。

われわれはオフアキスホログラムを組み合わせたインラインホログラムが高効率になりうることに注目し、ホログラムコリメーターレンズを作製しその一つの応用としてレーザーとシングルモード光ファイバーを結ぶファイバーカップラーに適用したので報告する。

2. インラインホログラムの回折効率

干渉法によるインラインホログラムレンズの作製は Fig. 1(a)に示すように、乾板Pの面に左方から入射する平面波Rを参照光とし点光源Fから放射される球面波Oを物体光としてホログラフィックに記録して行なわれ

* 現在：西安応用光学研究所 中華人民共和国西安
Present address: Xian Institute of Applied Optics,
Xian, China

る。再生は Fig. 1(b) のようにホログラムHの面から右からRの共役波 R^* をあてて行なわれる。再生した球面波 O^* はF点に収斂する。レンズとしてこの再生光が利用される。この場合の回折効率をレンズ面内の一点Sにおける回折効率で表す。レンズを位相型ホログラムとした場合、厚いホログラムであれば理論的な最大回折効率は 100% に達し、薄いホログラムのそれは 33.9% であることが知られている⁹⁾。したがってS点があるかを知ればホログラムレンズの回折効率を推定することができる。厚いホログラムか薄いホログラムかを区別するのにQ値¹⁰⁾が用いられる。これはホログラムの厚みを t 、その屈折率を n 、再生照明光の波長を λ_c (いまの場合、ホログラム作製時の波長と同一とする)、S点での干渉縞の間隔を d として

$$Q = 2\pi\lambda_c t / nd^2 \quad (1)$$

で与えられる。

Fig. 1(a)でF点を通る乾板の垂線CFを光軸と見なし、点SとFを結ぶ光線の光軸となす角度を ω とし、Qを ω の関数として表わせば

$$Q = 2\pi t \sin^2 \omega / n\lambda_c \quad (2)$$

となる。

一般に $Q > 10$ のとき厚いホログラム、 $Q < 1$ のとき薄いホログラムとされている。

Fig. 1(b)でS点をレンズの縁の位置と考えるとレンズのFナンバーは $F = 1/2 \tan \omega$ 、 $\tan \omega \approx \sin \omega$ と近似すると、(2)式はレンズのFナンバーで表わすことができ、厚いホログラムの場合は

$$F < (1/2)\sqrt{\pi t / 5n\lambda_c} \quad (3)$$

薄いホログラムの場合は

$$F > (1/2)\sqrt{2\pi t / n\lambda_c} \quad (4)$$

となる。たとえば典型的な例として $t = 15 \mu\text{m}$ 、 $n = 1.5$ 、 $\lambda_c = 0.6 \mu\text{m}$ とすれば(3)式より $F < 1.6$ 、(4)式より $F > 5.1$ となる。すなわちFナンバーが5以上のレンズは薄いホログラムであって位相型にしてもその回折効率

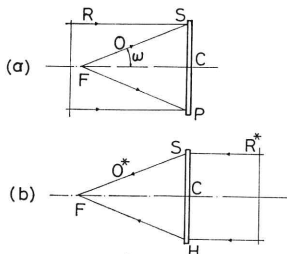


Fig. 1 Conventional in-line hologram lens. (a) recording, (b) reconstruction.

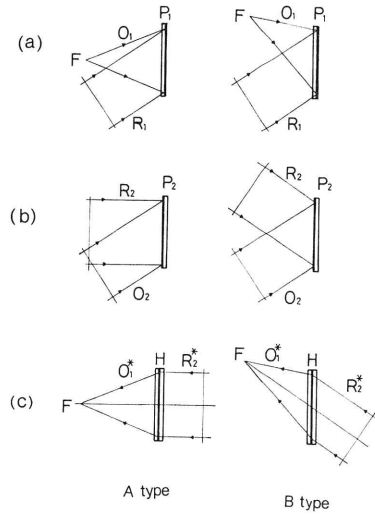


Fig. 2 High-efficient in-line hologram lens. (a) recording an off-axis holographic zone plate, (b) recording a holographic grating, (c) combination of two holograms-zone plate and grating to appear as an in-line hologram lens.

は 33.9% 以上にはならない。一方、Fナンバーが 1.6 以下になればレンズの周辺部では厚いホログラムとなり 100% 近い回折効率を得られることになるが、中心部は薄いホログラムのままであるからレンズ面内では一樣な回折効率にはならず、したがって全回折効率も低い。

この短所を解決し高効率のインラインホログラムレンズを実現するにはレンズの中心部も厚いホログラムにすればよい。

そのためには Q が 10 以上である 2 枚のオフアキスホログラムを組み合わせればよい。

2 枚のオフアキスホログラムを組み合わせせたインラインホログラムレンズの原理を Fig. 2 に示す。Fig. 2 (a) のように球面波 O_1 と平面波 R_1 を乾板 P_1 のガラス面側から入射させオフアキスホログラムを記録する。これをホログラム 1 とする。次に Fig. 2 (b) のように平面波 R_2 と平面波 O_2 を乾板 P_2 の乳剤面側から入射させてホログラム回折格子を記録する。これをホログラム 2 とする。ホログラム 1 と 2 を Fig. 2 (c) のように記録時の状態を保ったまま重ね合わせればそれぞれのホログラムの乳剤層は互いに接することになり、前後をガラス板で保護される。ホログラム 2 を平面波 R_2 と共役な平面波 R_2^* で照明するとこのホログラムは平面波 O_2 に共役な平面波 O_2^* を生じ、これがホログラム 1 の再生照明光となる。したがってホログラム 1 からは球面

波 O_1 に共役な球面波 O^* が再生され、F点に収斂することになる。球面波 O^* がホログラム面に垂直方向に出てゆく場合をA型、斜方向に出てゆく場合をB型とする。

この方法によって作製されたホログラムレンズは次のような特徴をもっている。

- 1) ホログラム1, 2はともに厚いホログラムになりうるから、これらを組み合わせた合成ホログラムの回折効率は高い。
- 2) ホログラム全面にわたって一様な回折効率が得られる。
- 3) ホログラム2による色分散はホログラム1によって補償されるため、低分散で色収差量が少ない⁷⁾。

3. 作製結果

2. で述べた原理に従ったB型のホログラムレンズを作製した。記録材料はメチレンブルー (MB) で増感された重クロム酸ゼラチン乾板¹¹⁾、光源は He-Ne レーザー (632.8 nm) である。処理はいずれも断わらない限り気温 22°C、相対湿度 45% の部屋内で行なわれた。

3.1 乾板の準備

ゼラチン膜は 649 F 乾板を脱銀したもの、およびメルク 4072 ゼラチンを塗布したものを使用した。膜厚は約 15 μm である。4" \times 5" サイズのゼラチン乾板1枚に対する感光液の具体的な組成は以下のとおりである。

溶液A: 蒸溜水 200 cc, $(\text{NH}_4)_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 4 g, アンモニア水 4 cc

溶液B: 蒸溜水 60 cc, MB 100 mg

B液をA液に徐々に加える。その溶液をシャーレに移し乾板を8分間浸漬した後ただちにアンモニア雰囲気中のデシケーター内で乾燥させる。これらの操作は暗赤色の安全光下で行なう。

3.2 記録光学系

2枚のオフアクシスホログラム—ホログラム1, ホログラム2—の記録条件は Fig. 2 の B type に対応させれば以下のとおりである。

ホログラム1

物体光: 球面波 O_1 , 角度 (光軸に対し): 20°

参照光: 平面波 R_1 , " -20°

ホログラム2

物体光: 平面波 O_2 , 角度 (光軸に対し): -20°

参照光: 平面波 R_2 , " 20°

ホログラム1の物体光を得るには二つの方法が考えられる。一つは顕微鏡対物レンズとピンホールによりレーザー光を拡げる方法、他はカプラーとして使用するファイバー、あるいはそれと同じ仕様のファイバーの一端からレーザー光を入れ、他端から出る球面波を利用する方法である。後者は実際に使用するファイバーから出る光を用いるため、ホログラムを共役再生すれば効率よく光をファイバーに導入できる利点がある。しかしファイバーが長いと球面波の波面が時間的に乱れること、逆に短い場合はとくにシングルモードファイバーではクラッド部を伝播した光によって生ずるスペckルパターンが減衰しきれず本来の球面波に重なってしまう短所もあわせもつ。本実験では前者の方法によった。

ファイバー、あるいはそれと同じ仕様のファイバーの一端からレーザー光を入れ、他端から出る球面波を利用する方法である。後者は実際に使用するファイバーから出る光を用いるため、ホログラムを共役再生すれば効率よく光をファイバーに導入できる利点がある。しかしファイバーが長いと球面波の波面が時間的に乱れること、逆に短い場合はとくにシングルモードファイバーではクラッド部を伝播した光によって生ずるスペckルパターンが減衰しきれず本来の球面波に重なってしまう短所もあわせもつ。本実験では前者の方法によった。

3.3 現像処理

露光された重クロム酸ゼラチン乾板を 60°C のオーブン中で3時間加熱した後次の処理を行なった。

- | | |
|-----------------------|-----|
| 1. 流水 (25°C) | 10分 |
| 2. 0.5% 重クロム酸アンモニウム溶液 | 6分 |
| 3. コダックフィクサー | 6分 |
| 4. 流水 (25°C) | 5分 |
| 5. 温水 (48°C) | 3分 |
| 6. 70% イソプロピルアルコール | 2分 |
| 7. 100% イソプロピルアルコール | 2分 |
| 8. 乾燥 | 3分 |

乾燥はヘアードライヤーの熱風を利用した。

3.4 回折効率の測定結果

回折効率は He-Ne レーザー光を使って測定した。個々のホログラムで最も高い回折効率を示した例はメルク 4072 ゼラチンを塗布した場合でホログラム1に対しては露光量 136 mJ/cm^2 で 90%、ホログラム2に対しては露光量 88 mJ/cm^2 で 85% であった。なおこの値はガラス面での反射を考慮した値である。これらのホログラムを合成した結果、回折効率 72%、直接透過光 6.5% のホログラムレンズが得られた。レンズの開口面内の回折

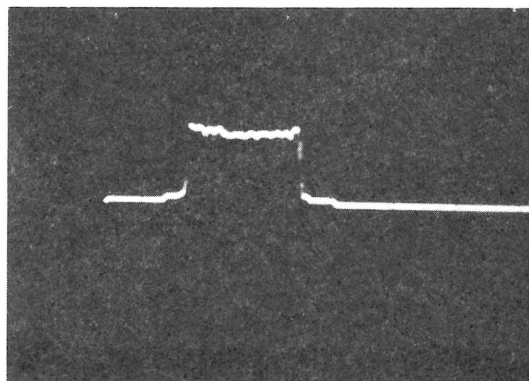


Fig. 3 Intensity distribution profile of the wave diffracted by the lens.

効率分布を測定した結果を Fig. 3 に示す。

本方法により従来のインラインホログラムレンズ⁶⁾より高い回折効率でしかも回折効率がほぼ一般的なレンズが得られた。

4. ファイバークプラーへの適用

この種のホログラムレンズを2種類の光ファイバーに対するカプラーとして作製し次のような結果を得た。

1) シングルモードファイバークプラー

通常のシングルモードファイバーのためのカプラーを前述のように作製しその結合効率を測定した。使用したファイバーはコア径 $4\ \mu\text{m}$ 、比屈折率差 0.2% で $632.8\ \text{nm}$ の光に対してはシングルモードファイバーとなる。ホログラムレンズの回折効率は 70% 、ファイバーへの結合効率(ファイバーへの入射光量に対するファイバーからの出射光量の比)は 70% であり、総合結合効率(ホログラムレンズに入射する光量に対するファイバーからの出射光量の比)は 49% を得た。シングルモードファイバーに対するこの値は銀塩感光材料を使用した場合³⁾(厳密には2モード)に比べて格段に高く、またわれわれの以前の報告⁵⁾の場合より改善された。

2) デュアルコアファイバークプラー

デュアルコアファイバーはごく最近試作されたファイバーで、振動¹²⁾、音波¹³⁾などのセンサーとして使用する試みが報告されている。使用したデュアルコアファイバーの断面を Fig. 4 に示す。比屈折率差は 0.8% である。このファイバーに適合するカプラーを作製した。 $46\ \mu\text{m}$ の間隔で二つの焦点を結ぶ二つの収斂光を再生するようにホログラム1を2重露光法で記録した。ホログラムレンズの回折効率は 50% (各レンズの回折効率は 25%)を得た。デュアルコアファイバーの場合注意すべきことはホログラム1の記録で二重露光の間にホログラムを正確にコア間隔分だけ移動することが必要であり、また再生の際二つの再生像点位置をそれぞれのコアに一致させなければならない。後者の点についてはあらかじめファイバーの反対側の端面から光を入れ本来の入射側の

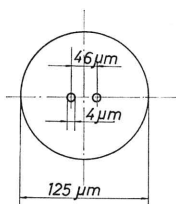


Fig. 4 Dual core fiber used to the experiment.

端面の二つのコアから出る発散光間の干渉による縞の方向がホログラムレンズによって生じる干渉縞の方向と一致するようにファイバーの端面を回転すれば簡単に調整できる。

結合効率を測定した結果は 14% であり、総合結合効率は 7% であった。ここで結合効率についてホログラムによるカプラーと従来のガラス製レンズによるそれとの比較を考える。1)のようなシングルモードファイバーの場合、顕微鏡対物レンズでも適当な開口数のものを使用すれば 50% 程度の結合効率を得られる。したがってこの場合のホログラムのメリットは作製が容易で軽量であることにしか見いだせないであろう。

しかし多数本のファイバーに対するカプラーあるいは多波長を使用した場合の合波器、分波器としての使用などを考えれば、ホログラムの特徴である多機能性を生かすことができ利用価値は高いと思われる。その一つの例が2)の二つのコアをもつデュアルコアファイバーに対するカプラーである。

この例について顕微鏡対物レンズを使用した場合の結合効率を求める。この場合どのような形状の光をファイバーに入射させるかによって結合効率は変わるが、一般的な例として二つのコアにぎりぎり光が入射するように直径 $50\ \mu\text{m}$ の円形にレーザー光を一様に照明したとする。このときの光の利用効率を計算すればほぼ 1% となり実際の測定でも結合効率はこれに近い値である。したがって、ホログラムレンズを使った場合の 7% という総合結合効率が低いようにみえるが、顕微鏡対物レンズを使用した場合に比べて大幅に改善できたといえる。

5. おわりに

2枚のオフアキスホログラムを組み合わせて高い回折効率をもつインラインホログラムレンズを作製した。このホログラムレンズを光ファイバー用カプラーとして使用した結果、シングルモードファイバーに対して 49% 、またデュアルコアファイバーに対して 7% の総合結合効率が得られた。

インライン型で高い回折効率を得られるホログラムとしてキノフォーム¹⁴⁾が知られており、最近では格子の鋸歯状化を電子ビーム¹⁵⁾あるいはイオンビームエッチング¹⁶⁾で行なって高効率のレンズを作製する試みが行なわれている。キノフォームレンズは理論的には 100% の回折効率を得られることになっているが現在のところ作製の困難さから高い回折効率は得られておらず、また作製装置もきわめて高価である。

本方法によるインラインホログラムはホログラム全面にわたってほぼ一様で高い回折効率をもちしかも作製が容易なことから、ホログラムの特徴である多機能性を生かせば有効な素子となりうる。

文 献

- 1) H. Nishihara, S. Inohara, T. Suhara and J. Koyama: IEEE J. Quantum Electron., **QE-11** (1975) 794.
- 2) G. Goldmann and H. H. Witte: Opt. Quantum Electron., **9** (1977) 75.
- 3) A. M. P. P. Leite, O. D. D. Soares and E. A. Ash: Microwaves, Opt. Acoust., **2** (1978) 45.
- 4) J. L. Horner and J. E. Ludman: Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng., **215** (1980) 46.
- 5) T. Yoshino, T. Kubota and T. Ose: Appl. Opt., **22** (1983) 1800.
- 6) 小島千秋, 大木 裕: 光学, **10** (1981) 425.
- 7) J. N. Latta: Appl. Opt., **11** (1972) 1686.
- 8) A. K. Richter and F. P. Carlson: Appl. Opt., **13** (1974) 2924.
- 9) H. Kogelnik: Bell Syst. Tech. J., **48** (1969) 2909.
- 10) W. R. Klein: Proc. IEEE, **54** (1966) 803.
- 11) T. Kubota, T. Ose, M. Sasaki and K. Honda: Appl. Opt., **15** (1976) 556.
- 12) 塩田孝夫, 宮本末広, 福田 長, 稲田浩一: 第44回応用物理学会学術講演会講演予稿集 (1983) p. 186.
- 13) 芳野俊彦, 黒沢 潔, 劉 中本, 久保田敏弘, 小瀬輝次: 第30回応用物理学関係連合講演会講演予稿集 (1983) p. 78.
- 14) 一岡芳樹: 光学, **2** (1973) 133.
- 15) 藤田輝雄, 西原 浩, 小山次郎: 第29回応用物理学関係連合講演会講演予稿集 (1982) p. 80.
- 16) 小菅和弘, 小野雄三, 西田信夫: 第30回応用物理学関係連合講演会講演予稿集 (1983) p. 50.