



ホログラム再生波面干渉露光法による分布帰還型 半導体レーザー用位相シフト回折格子の形成

小野 雄三・高野 信司・水戸 郁夫・西田 信夫

日本電気(株)光エレクトロニクス研究所 〒213 川崎市宮前区宮崎 4-1-1

(1986年9月19日受理)

Fabrication of Phase-shifted Diffraction Grating for Distributed Feed Back Laser Diodes Using Holographic Wavefront Reconstruction

Yuzo ONO, Shinji TAKANO, Ikuo MITO and Nobuo NISHIDA

Opto-Electronics Research Laboratories, NEC Corporation,
4-1-1, Miyazaki, Miyamae-ku, Kawasaki 213

To fabricate a π -phase-shifted grating for a distributed feed back laser diode, a new simple interference exposure fabrication method, using a holographically reconstructed phase-shifted wavefront, is proposed. In this method, a transmitted diffraction wave from a phase shift plate is first recorded as a hologram. Successively, the reconstructed phase-shifted wavefront from the hologram is used as an interference beam. Experimentally, a π -phase-shifted grating with $1\text{-}2\ \mu\text{m}$ phase transition region was fabricated by this method.

1. はじめに

半導体レーザーの縦モードを単一化することは、光ファイバ通信における波長分散による波形歪の防止、安定な高速変調による超高速伝送、雑音の低減、光応用計測等においてきわめて重要な課題である。このため、分布帰還型 (DFB) 半導体レーザーの回折格子の中央付近に $1/4$ 波長相当の位相シフトを付加した、位相シフト型 DFB レーザーの開発が進められている。位相シフト回折格子の製作には、電子ビーム直接描画法¹⁾、ポジレジスト、ネガレジスト併用型の干渉露光法²⁾、石英のコンタクトマスクを用いる干渉露光法³⁾、位相マスクの投影像を用いる干渉露光法⁴⁾が提案されている。しかし、これらの方法には次のような問題点がある。文献1) および2) の方法は複雑な製作プロセスを必要とする。文献3) の方法はコンタクトマスクのフォトリソ膜への密着が十分でないと回折のため位相遷移領域が広がってしまう。また、文献4) の方法では位相シフターを斜め投影するため収差を生じ記録面積が制限されてしまう。

本論文では、これらを改良した、位相遷移領域も狭く、また格子記録面積も広い方法として、ホログラフィ

ックに再生した位相シフト波面を用いた簡便な干渉露光法を提案するとともに、本方法による位相シフト回折格子の製作結果を報告する。

2. 製作方法

本方法では **Fig. 1(a)** に示すように、位相板の透過回折波面を、平面波を参照光にフォトリソ膜にホログラムとしてまず記録する。次に、フォトリソ膜に形成されたホログラムを、**Fig. 1(b)** に示すように記録時の参照光の共役波面で、すなわち、ホログラムを裏面から参照光の逆進波面で照射すると、記録時に位相板のあった位置に位相板で位相変調された波面が再生されるので⁵⁾、この波面と平面波を干渉させることで、位相シフト回折格子を形成できる。

実際の製作プロセスでは、位相シフト波面を正確に回折格子記録面上に再生するために、**Fig. 2** に示すように、位相シフト板のホルダーとホログラム記録媒体のホルダーを同一基台上に固定して用いた。ホログラムを記録、現像後、ホルダーに再びもどし、回折格子記録用のフォトリソ膜を位相シフト板のホルダーに挿入する。両ホルダーを固定した基台を、次に **Fig. 2** に示すよう

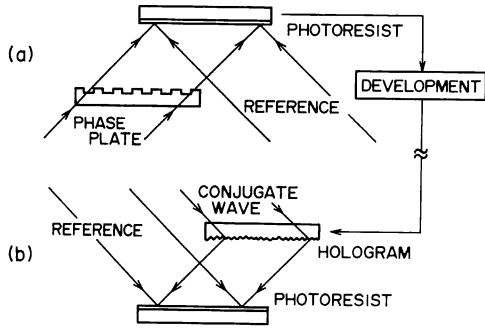


Fig. 1 Holographic fabrication method for phase-shifted diffraction grating. (a) Phase shift plate hologram recording geometry. (b) Phase-shifted diffraction grating recording geometry using the hologram reconstructed wave.

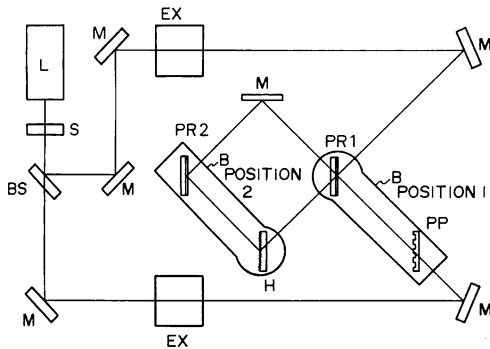


Fig. 2 Interferometer optical arrangement for phase shift plate hologram and phase shift diffraction grating recording. Base B is arranged at position 1 for hologram recording. For phase-shifted diffraction grating recording, base B is rearranged at position 2. L, Lens; S, Shutter; BS, Beam splitter; M, Mirror; EX, Expander; PP, Phase plate; PR, Photoresist; H, Hologram; B, Base.

に位置 2 に移動する。この位置で、基台を回転してホログラムへのビーム入射角を調整することで、位相シフト波面がフォトレジスト膜上に再生される。Fig. 2 に示す光学系を用いることで、光学系を変更することなく両プロセスを同一光学系で行なえる。

3. 位 相 板

位相シフト板として、矩形断面溝を有す透明板を用いた。Fig. 3 に示す位相板の段差による透過光の位相差 $\Delta\phi$ は、光路長差から次式で与えられる。

$$\Delta\phi = (2\pi t/\lambda)[n\{\cos(\sin^{-1}(\sin\theta/n))\} - 1/\cos\theta] \quad (1)$$

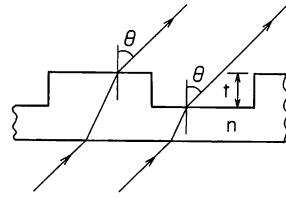


Fig. 3 Sectional view of phase shift plate.

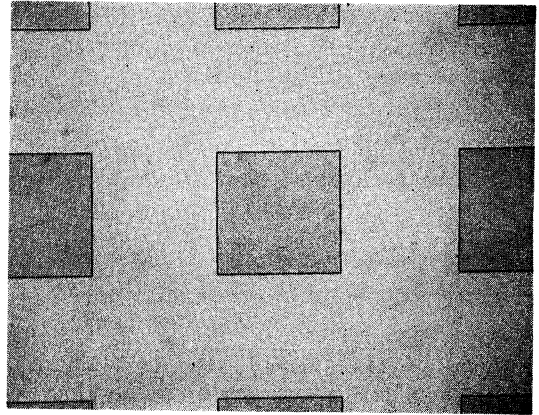


Fig. 4 Reflection microscope photograph of phase shift plate. The square contour is 300 μm square.

ここに、 t は段差、 λ は光の波長、 n は位相板の屈折率、 θ は入射角である。位相差 π を得るために段差 t は、 $n=1.71$ (AZ-1350 J, @ $\lambda=441.6$ nm), $\lambda=441.6$ nm, $\theta=45^\circ$ のとき 476 nm 必要である。実際の位相板は、位相シフト部を見つけやすくするために、格子溝の平行、垂直両方向に位相シフトした、Fig. 4 に示す基盤の目状とし、ガラス基板上に厚さ 420 nm の AZ-1350 J フォトレジスト (ヘキスト製) で形成して用いた。段差部のだれは約 1.5 μm であった。

4. ホログラムの製作

位相板回折波面のホログラムの製作では、フォトレジストのダイナミックレンジと、位相板の高次回折波面のホログラム記録の 2 点を考慮しなければならない。

AZ-1350 J フォトレジストの露光特性を推定するために、同系のノボラック系ポジ型フォトレジストである MP-1350/31 (シップレー製) フォトレジストの露光特性を Fig. 5 に示す。Fig. 5 から、干渉光の変調強度は、最大光量の約 1/2 以下にとるのが望ましいと考えられる。

位相板からの回折波を $O_o(x, y)$ 、参照光を $R_o(x, y)$ とすると、干渉光の強度分布は、

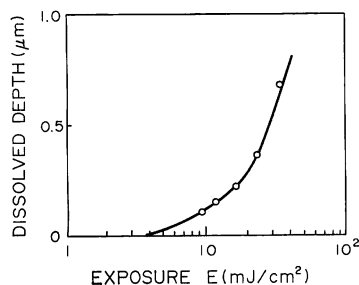


Fig. 5 Exposure characteristics of MP-1350/31 photoresist.

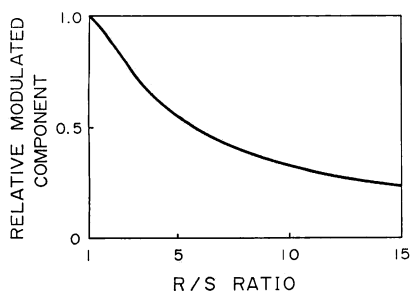


Fig. 6 Relative modulated component versus R/S ratio.

$I(x, y) = \{O_0\}^2 + \{R_0\}^2 + 2R_0O_0 \cos(\phi_0 - \phi_R)$ (2) となる。ここで第3項が変調成分である。回折波強度に対する参照光強度の比 (R/S 比) と変調成分の関係を、Fig. 6 に示す。変調成分を $1/2$ 以下にするためには、 $R/S > 5.8$ が必要である。実験では $R/S = 5$ とした。

位相板段差部の急峻な位相変化を波面として再現するためには、位相板からの回折波面を十分高次までホログラムに記録しなければならない。このため、位相板およびホログラムの大きさ 5×5 cm に対して、位相板とホログラムの距離を 3 cm に接近した配置とした。この配置では、位相板中心からの回折波は、0次光の方向に対して、水平方向 $-35.5 \sim +16.4^\circ$ 、垂直方向 $\pm 30.5^\circ$ をホログラムとして記録していることになる。位相板の段差部からの回折光の広がり を推定するために、段差部の幅 a のだれを回折を生じるスリットと考えると、回折パターン の広がり角 (半角) は λ/a となる。これより上述のホログラムとして記録している角度をスリット幅に変換すると波長 441.6 nm で水平方向 $0.71 \sim 1.54 \mu\text{m}$ 、垂直方向 $0.83 \mu\text{m}$ の段差部だれからの回折光のほとんどをとり込んでいることになる。

$\lambda = 441.6$ nm の He-Cd レーザーを用い、 45° の等入射角でホログラムを記録した。Fig. 7 に、形成されたホログラムの反射顕微鏡写真を示す。 $R/S = 5$ としたこ

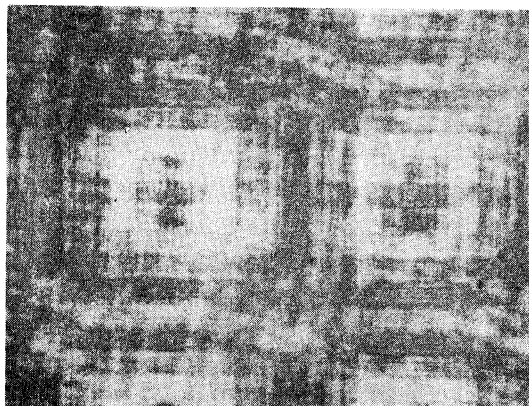


Fig. 7 Microscope photograph for the phase shift plate hologram. Photograph area is 1.03×1.33 mm.

とで、フォトレジストが完全に除去された部分はなく、ほぼダイナミックレンジ内で記録されている。記録されたパターンは複数の矩形開口からの回折波を象徴するパターンであるが、位相板およびホログラム基板の表裏面反射による斜め方向の疎な干渉縞が重畳している。

5. 位相シフト格子の製作

Fig. 7 に示したホログラムの再生波面を用いて、位相シフト格子を製作した。 45° の等入射角で、ピッチ $0.31 \mu\text{m}$ の格子を記録した。Fig. 8 に反射顕微鏡写真を示す。位相板のパターンに相当する輪郭とともに、ホログラムおよびフォトレジスト基板の表裏面反射による疎な干渉縞が重畳している。

位相シフト格子の SEM 写真を Fig. 9 に示す。位相板のフォトレジスト段差部の角に相当する部分である。

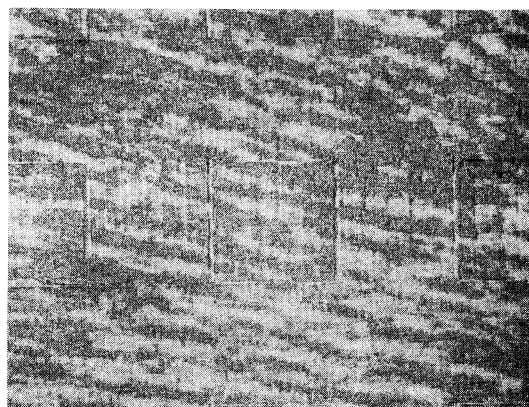


Fig. 8 Reflection microscope photograph of phase shift grating. The square contour is $300 \mu\text{m}$ square.

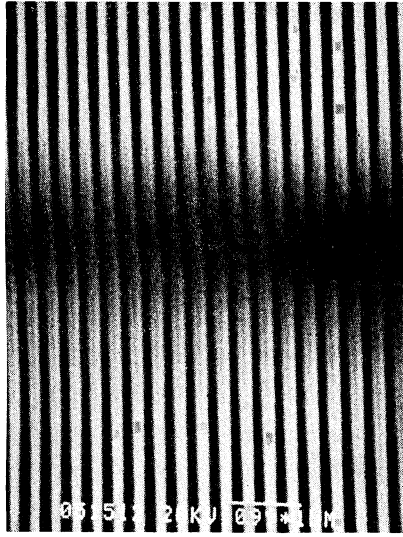


Fig. 9 SEM photograph for phase-shifted diffraction grating. From left to right on the center, phase is shifted. From the top to the bottom, phase is shifted on the center line.

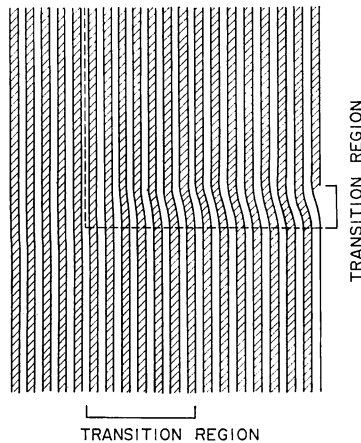


Fig. 10 Schematic illustration of phase shift grating shown in Fig. 9. Dashed line corresponds to photoresist contour on the phase shift plate.

下半分が参照格子になる一様格子部分で、上半分の格子は中央部で位相シフトし、右端で上半分の格子と下半分の格子で位相が約 π シフトしているのがわかる。Fig. 9

をスキマティックに描いたのが Fig. 10 である。格子溝と平行方向の遷移領域は約 $1\mu\text{m}$ 、垂直方向の遷移領域は約 $2\mu\text{m}$ である。これらの値は、レジスト位相板のエッジだれにほぼ対応する大きさである。これらの値は、また、先に述べた回折限界の値である $1\mu\text{m}$ 前後ともほぼ対応する大きさである。

6. ま と め

ホログラフィックに再生した位相シフト波面を用いた簡便な干渉露光法を提案し、 π 位相シフト回折格子を形成した。SEM 観察から位相遷移領域が $1\sim 2\mu\text{m}$ の π 位相シフト回折格子の形成が確認された。ホログラムは、位相シフト波面を生成する光学素子として使用できるので、一度ホログラムを製作すれば、後はたんなる干渉露光で位相シフト格子を広い面積にわたり形成できる。したがって本方法は、DFB レーザーの量産プロセスに適した方法であると考えられる。

日頃ご指導いただき、日本電気(株)基礎研究所齊藤富士郎所長、光エレクトロニクス研究所阪口光人所長、小林功郎部長に深謝いたします。

文 献

- 1) K. Sekartedjo, N. Eda, K. Furuya, Y. Suematsu, F. Koyama and T. Tanbun-ek: "1.5 μm phase-shifted DFB lasers for single-mode operation," *Electron. Lett.*, **20** (1984) 80-81.
- 2) K. Utaka, S. Akiba, K. Sakai and Y. Matsushima: " $\lambda/4$ -shifted InGaAsP/InP DFB lasers by simultaneous holographic exposure of positive and negative photoresists," *Electron. Lett.*, **20** (1984) 1008-1010.
- 3) 白崎正孝, 雙田晴久, 山腰茂伸, 石川 浩, 中島啓幾: "DFB レーザ用 $1/4$ 波長位相シフト回折格子の形成方法の提案一位相マスクの考案とその効果一", *信学技報, OQE* **85-60** (1985) 57-64.
- 4) 辻 伸二, 岡井 誠, 有本 昭, 平尾元尚, 松村宏善: "位相面投影型干渉露光法による π シフト回折格子の作製", 第 46 回応用物理学会学術講演会講演予稿集 (1985) p. 202.
- 5) Y. Ono and N. Nishida: "Holographic laser scanners using generalized zone plates," *Appl. Opt.*, **21** (1982) 4542-4548.