半導体レーザによるパターン描画の研究*

——1次元濃度分布光学フィルタの描画——

徳永 剛** 田中義弘*** 宮崎俊行† 吉澤 徹††

Study on Pattern Drawing by a Laser Diode

— Drawing of Optical Filters with One-dimensional Density Distribution —

Tsuyoshi TOKUNAGA, Yoshihiro TANAKA, Toshiyuki MIYAZAKI and Toru YOSHIZAWA

A pattern drawing system on a photographic film was developed. This system consists of a laser diode for a light source, and a cylindrical lens for changing the beam profile to the linear. Before drawing patterns, the exposure characteristics were measured on the LD wave length, and then LD power was modulated for desired patterns. Some diffraction patterns were calculated depending on numerical aperture of collimators. Rotating the collimated beam by the dove prism, the most suitable focusing direction was obtained experimentally for uniform power distribution on the focus of the cylindrical lens. Using an 8 bit D/A converter, one dimensional arbitrary patterns were drawn with 256 level gradations of density. For example, periodic sinusoidal patterns, fractional distribution patterns for optical range meters. Drawn area of the film was 200mm (film length)×9mm(linear beam length) by one scanning.

Key words : pattern drawing, laser diode, cylindrical lens, photographic film, sinusoidal pattern, optical filter

1. 結 論

光応用計測や光学情報処理の分野で、光学フィルタが重要な役割を果たす場合がある。使われるフィルタも多品種に及ぶが、ここでは特に場所によって濃度の異なるフィルタ（一種の空間フィルタ）について着目している。例えば格子パターン投影法による変位計測では、投影パターンに濃度分布が白黒二値のロンキ格

子や干渉じまが用いられる。しかし投影されたパターンから距離情報を解析する際、基本周波数に高次の項が重畳して誤差の原因となっており、特に格子ピッチに比較して測定対象が小さい場合はこの影響が大きい¹⁾²⁾。この点から計算上有利な正弦波状の濃度分布を持つ格子（以後正弦波格子と呼ぶ）が望まれている。しかし、市販レベルではロンキ格子以外に適当な格子が入手できない。さらに中間色を持ったパターンは、リニアに変化するタイプがいくつか見受けられる程度が現状で、パターンを正弦波状に変化させることや周期性を持たすことは難しいようである。このような背景から、本研究ではマイクロコンピュータで半導体レーザの出力を制御し、写真フィルムに任意の1次元パターンを描画するシステムを開発した。そして、1次元分布する正弦波格子や距離測定用の光学フィルタを製作したので報告する。

* 原稿受付 平成4年8月27日

** 正 会 員 職業能力開発大学校（相模原市橋本台4-1-1）

*** 正 会 員 東京職業能力開発短期大学校（小平市小川西町2-32-1）

+ 正 会 員 千葉工業大学（習志野市津田沼2-17-1）

++ 正 会 員 東京農工大学工学部（小金井市中町2-24-16）

Fig. 1 Schematic of the pattern drawing system

2. 実験装置

パターン描画の原理は、あらかじめ描画する写真フィルムの感光特性をデータ化しておき、これを基に所望のパターンに応じてレーザーの出力を制御する一方、フィルム上にこのビームを線状に集光し走査させることで任意のパターンを得ようというものである。本システムの概略図を図1に、また写真を図2に示す。

光源である半導体レーザーは、フィルムの感度が光源波長に依存するため組合せが重要である。まずフィルムは、①光学フィルタへの応用を考え、ベースが透明であること、②パターン描画のために解像力が優れていること、という条件からマイクロフィルム（富士写真フィルム製ミニコビーHRⅡ）とした。このフィルム

Fig. 2 Photograph of the system

は、半導体レーザーの発振波長である赤外域で感度が低下する。したがって、レーザーパワーで不足分を補うことになる。ここでは波長780nm、最大出力30mWのレーザー（シャープ製LT024）を用いた。

光学系は、半導体レーザーのビームをコリメートした後、ダブリズム、ビームエキスパンダを通り、シリンドリカルレンズで線状に集光する。この焦点に写真フィルムを巻いたドラムを配置し、定速回転させ線状ビームを走査することで露光する。本システムのようにビームパワーが要求される分野では、ビームを効率よくコリメートすることが重要である。一方、半導体レーザーは放射角が半値全角で30°にも及ぶ。従って、ビームのパワー損失を少なくするためにコリメートレンズの開口数（NA）も大きくしなければならない³⁾。ここでは半導体レーザー自体の大きさとコリメートレンズのバックフォーカスの兼ね合いからNA=0.47、焦点距離 $f=4.7\text{mm}$ の非球面プラスチックレンズを使った。ダブリズムは、コリメート後のビームとシリンドリカルレンズに方向性があるため、光軸回りの任意の角度でビームを回転できるように挿入した。また焦点でのビーム線長を延長するために、3倍のビームエキスパンダを設けた。シリンドリカルレンズの焦点距離は6.35mm、焦点でのビーム線長は約9mmであった。

レーザーの出力制御をマイクロコンピュータで行うた

Fig. 3 Block diagram of the laser diode driver

Fig. 4 Beam radiation from a laser diode

め、図3に示す駆動回路を設計製作した。この回路は、写真フィルムの感光特性を考慮して、8bitのデジタル信号をDA変換した変調信号に、任意のバイアス電流を加えてレーザに入力できるようにした。さらに光出力をフィードバックする安定化を施してある。また、フィルムを巻いてあるドラムは直径80mmであり、保持部を除く約200mmの範囲で描画できる。なお移動速度は0.93mm/sであった。

3. 光 学 系

コリメートレンズは入手できた中で最も開口数の大きいものを選んだ。しかし、このレンズでも楕円状に放射されるビームの長軸方向の一部は入射できず、レンズを通過するビームは回折する。そこでこの回折の影響を数値計算により求めてみた。

3.1 開口数とコリメート領域

まず半導体レーザーの放射角（半値）から、強度が中心部の $1/e^2$ となる放射角 ϕ （半角）と、開口数との関係を求める。計算するにあたり以下の仮定を設けた。

- ①光源は楕円形で、レーザーチップ面上でのビームの振幅は光軸を含む任意の断面でガウス分布している。
- ②光源からのビーム放射角 θ は、半値半角で長軸方向に $\theta_v = 15^\circ$ 、短軸方向に $\theta_h = 5^\circ$ とし、光源に非点収差はない。
- ③レンズの開口数で決まる立体角を越えるビーム部分はレンズを通過しない。

出力がPのガウスビームで、光軸からの距離 r 離れた点での強度 $I(r)$ は、

$$I(r) = \frac{2P}{\pi w^2} \exp\left(-\frac{2r^2}{w^2}\right) \quad (1)$$

である。ただし、 w は強度が中心部の $1/e^2$ となる半径である。これより、強度が中心部の $1/2$ となる半径を R とすると、

$$w = R \frac{2}{\log 2} \quad (2)$$

Fig. 5 Region of collimation

となる。ところで、図4のように光源から光軸に沿って距離 d 離れた断面上の点では、

$$\tan \theta = \frac{R}{d}, \quad \tan \phi = \frac{w}{d} \quad (3)$$

であるので、式(2)、(3)より $1/e^2$ 強度を考慮した半導体レーザーの放射角 ϕ は、半角で

$$\phi_v = 24.5^\circ, \quad \phi_h = 8.45^\circ$$

と求まる。一方、開口数の定義から

$$NA = n \sin \theta \quad (4)$$

n :屈折率 θ :半角

であり、レンズの屈折率を $n=1.5$ とすると、コリメートできる領域とレンズ開口数の関係は、図5のようになる。なお、図中のビームは $1/e^2$ 半径を示した。

3.2 開口数と回折パターン

次に、コリメートレンズの外縁でビームが遮られた場合の影響について求めてみる。これは、楕円状の平行ビームを、図5で示すようなレンズの開口数で決まる大きさの円形開口で遮り、射出するビームの振幅分布から受光部での振幅分布と位相を計算すればよい。すなわちコリメートレンズ出口での振幅分布を $g(x, y)$ とすると、集光光学系の入口における振幅分布 $G(s, t)$ は

$$G(s, t) = \frac{1}{j\lambda} \iint \frac{1}{z_{xy}} g(x, y) \exp(-j2\pi \frac{z_{xy}}{\lambda}) dx dy \quad (5)$$

$$z_{xy} = \sqrt{L^2 + (x-s)^2 + (y-t)^2} \quad (6)$$

となる。ここで L はレンズと集光部の距離、 λ は波長である。これらの関係に、 L の値を装置の大きさである800mmとして、集光部入口における強度分布を求めた。コリメートレンズの開口数を変化させた場合の強度分布の一例を図6に示す。図6(a)は $NA=0.20$ 、図6(b)は今回使用したレンズで $NA=0.47$ 、図6(c)は $NA=0.62$ である。この図6(c)は、ビーム長軸の放射角 ϕ_v とレンズ開口数の θ が一致しており、 $1/e^2$ 半径のビームまではコリメート可能な場合である。開口数が大きくなる

Fig. 6 Intensity distribution of collimated LD beam

Fig. 7 Intensity distribution on the focus of cylindrical lens

につれて、コリメートされるビーム強度は強くなることがわかる。また、 $NA=0.47$ のとき、長軸方向は短軸方向に比べ強度の変化が激しいことが示されている。図6(d)は、実際に $NA=0.47$ のレンズでコリメート後のビームを、光軸方向から直接フィルムに露光したものであり、数値計算の結果とよく似た強度分布が現れている。

焦点上の強度分布に均一性が求められる本システムでは、集光方向の設定が重要である。コリメートレンズに起因した複雑な回折パターンを有するビームをシリンドリカルレンズで集光すると、強度分布が集光方向に依存する。そこで、ビームの集光方向を変化させ、焦点における強度分布を測定した。結果の一例を図7に示す。これより集光方向を適切に選ぶと、回折の影響を軽減できることがわかる。実験では試行錯誤を繰り返し、最も平坦になるようにダブプリズムの回転角を設定した。

4. 感 光 特 性

レーザの出力制御により写真フィルムを感光させるためには、露光量と濃度の非線形な関係を把握してお

Fig. 8 Schematic of the valuation system for transmittance

く必要がある。ところが、半導体レーザの個体差、途中の光学系の損失や現像処理のように、計算上ではその影響を厳密に確定することが困難な要素もある。このような場合、実験的に感光特性を求めるのが有効である。すなわち、半導体レーザの出力を停止状態から最大出力まで変化させ、フィルムを露光する。そして現像処理後、図8に示す評価システムでフィルムを透過する光強度を測定し、相対的な透過率を求めるものである。半導体レーザコリメート後の楕円ビームプロファイルを円形に補正するため、プリズムペアを光路上に設けた。評価システムの測定箇所のビーム半径は、ナイフエッジ法により確認した。ナイフエッジの走査

(a) Photograph

(b) Relations between output code and normalized transmittance

Fig. 9 Reference pattern

量をマッハ・ツェンダ干渉計で測定した結果、ビーム半径は約 $2\mu\text{m}$ であった³⁾。

次に感光特性とレーザの調整について記す。まず、半導体レーザの注入電流をリニアに変化させ感光特性を求める。次に、この関係を基にフィルムが感光を始める臨界点をバイアス電流として、描画中はコンピュータの出力信号に加えて常時注入する。またコンピュータが最大出力の指令を出したときに、フィルムの濃度が飽和するようレーザ出力を調整する。これにより、DAコンバータの分解能でフィルムの階調を制御できる。図9は、調整後のコンピュータの出力コードと透過率の関係である。

5. パターン描画例

5.1 正弦波格子

感光特性を基に、正弦波格子パターンを製作した。写真および透過率の測定結果を図10に示す。図より透過率の低い（濃度の濃い）部分にひずみがあることがわかる。これはレーザ出力が最大値となる部分の周辺である。高出力になると焦点でのビーム幅も太くなり周辺部にも影響を及ぼす。先に求めた感光特性にはこの影響も含まれているが、出力が256階調変化するの

(a) Photograph

(b) Film transmittance

Fig. 10 Example of sinusoidal pattern

Fig. 11 Arrangement of the optical range meter

に要した距離が、感光特性を測定したとき（130mm）と比べ、正弦波格子を描画したときは約1.3mmと短かった。このことから、設定より感光したものと考えられる。特にこの現象は描画パターンの空間周波数が高くなるほど顕著に現れることが予測される。この場合はコントラストを下げた描画する方法があるが、現状ではパターンの空間周波数とコントラスト低減の関係は充分明らかにされておらず今後の課題である。なお本システムでは、波長3mm以上の正弦波格子パターンは透過率分布の振幅の誤差が10%以内で描画できた。

5.2 関数フィルタ

図11に示すような三角測量を応用した変位測定は、一般的に受光素子にPSD (Position Sensitive Device)

(a) Designed value of transmittance

(b) Transmittance distribution of the filter

Fig.12 Density filter for the range meter

と呼ばれる1次元の光センサが用いられる。そして反射したレーザの結像位置を検出し、距離の換算をしている。したがってセンサの出力に結像位置の情報が含まれればよく、1次元に濃度分布するフィルタとフォトダイオードを組み合わせ PSDの代わりにすることが可能である。すなわち、濃度フィルタにより結像点の位置情報を透過するレーザの強度に変換させフォトダイオードで測定する方式である。結像点の位置は、Scheimpflug条件に従うことを考慮し、測定対象の範囲や Lambertの法則などからフィルタの濃度分布が求まる⁴⁾。このとき出力特性をリニアにしたりスレッシュホールドを設けて二値化するなどの特性を付加することもできる。ここでは測定距離と出力の関係がリニアになるようなフィルタを描画した。透過率の計算結果を図12(a)に、また製作したフィルタの透過率分布を図12(b)に示す。図よりフィルタ全体に周期的な変動が認められる。これは描画の際にフィルムを回転させている駆動系の回転変動と一致していた。このとき製作したフィルタの誤差は、最大8%であった。

6. 結 論

半導体レーザで、写真フィルムに1次元分布する任意のパターンを描画するシステムを開発し、以下の結果を得た。

- (1) 半導体レーザをコリメートするとき、レンズの開口数に応じた回折を生じるが、線状に集光

する際シリンドリカルレンズの集光方向を適切に選ぶことで、回折の影響を軽減することができる。

- (2) 写真フィルムの露光特性に合わせて、半導体レーザに注入するバイアス電流と最大電流を設定することで、DAコンバータの分解能(256階調)での描画が可能となった。
- (3) マイクロコンピュータで出力制御を行い、任意のパターンが描画できた。その一例として、正弦波格子、距離測定用の濃度フィルタを描画した。
- (4) 波長が3mm以上の正弦波格子の場合、透過率の誤差が10%以内で描画できた。

参 考 文 献

- 1) 小松原良平, 吉澤 徹: 縞走査を導入した格子パターン投影法, 精密工学会誌, 55,10(1989)1817.
- 2) 小松原良平, 片瀬和伸, 吉澤 徹: 縞走査を導入した格子パターン投影法(第2報), 精密工学会誌, 58,7(1992)1173.
- 3) 吉澤 徹, 藤沢一郎, 徳永 剛: 半導体レーザビームの集光とマーキングへの応用, 精密工学会誌, 55,12(1989)2179.
- 4) 吉澤 徹, 栃木明義, 徳永 剛: 非線形濃度フィルタを用いた変位計測の研究, 精密工学会誌, 57,10(1991)1850.