デフォーマブルミラーを用いたレーザービームの強度分布変換

正員 根本孝七 (電力中央研究所)

正員 藤井 隆 (電力中央研究所)

正員 後藤直彦 (電力中央研究所)

非会員 名雪琢弥 (電力中央研究所)

非会員 金井美一 (レオニクス株式会社)

Experimental Study on Transformation of Laser Beam Intensity Distribution by Deformable Mirrors

Koshichi Nemoto, Member; Takashi Fujii, Member; Naohiko Goto, Member; (CRIEPI),

Takuya Nayuki, Non-member (CRIEPI), Yoshikazu Kanai, Non-member (Leonix)

We developed a deformable mirror whose surface profile is slightly deformed by nine actuators and varies the phase profile of a reflected laser beam. After Fresnel propagation, the complex amplitude of the reflected laser beam is transformed into another complex amplitude whose profile is different from that of the initial laser beam. Thus, the intensity profile of the reflected laser beam is transformed into another intensity profile with conservation of spatial coherency. We achieved reshaping of a circular-cross-section Gaussian laser (He-Ne : 633nm) beam into a rectangular-cross-section beam using a deformable mirror for the first time. The wavefront of the transformed laser beam has a profile similar to that predicted by a beam propagation simulation.

キーワード：レーザー、ビーム整形、デフォーマブルミラー、強度分布変換、アダプティブオプティクス

1. はじめに

レーザーの様々な応用において、レーザービームの強度分布を目的に合わせて整形するために多重反射⁽¹⁾やマルチレンズアレイあるいはホログラム⁽²⁾などを用いたレーザービーム整形が行われている。しかし、多重散乱やマルチレンズアレイでは空間的なコヒーレンシが失われるためにレーザービームを長距離伝播させる必要がある場合には用いることができず、また、ホログラムによるレーザービーム整形の場合には変換効率が問題となる。一方、デフォーマブルミラー (deformable mirror: 表面形状可変鏡) などの反射体を用いる場合には空間的なコヒーレンシが保たれ、なおかつ高い変換効率が期待できる。デフォーマブルミラーは天文学における画像の揺らぎの補正やレーザービームの伝播特性を向上させるための波面補正に用いられているが⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾、単に位相の補正のみならずレーザービームの強度分布の変換または補正を行うことができる⁽⁷⁾⁽⁸⁾。すなわち、デフォーマブルミラーがある程度自由に位相分布を制御できることを積極的に利用して、伝播前のレーザー光の複素振幅の位相分布を制御することにより、伝播後のレーザー光の複素振幅の振幅成分の分布を別の分布に変換することができる。このような反射光学素子を用いる方式は多重散乱やマルチレンズアレイを用いた従来のレーザービーム整形方式とは異なり、ビーム整形後も空間的なコヒーレンシを保存してお

り、熱歪みの影響を受けにくいために高出力レーザーに適用することができ、また、変換効率も高い。

筆者らはミラーなどの反射体を用いた強度分布変換部と位相補正部からなる強度分布整形についてのシュミレーション結果について、すでに報告しているが⁽⁹⁾、今回、9個の駆動素子を持つデフォーマブルミラーを実際に試作し、それを用いてレーザービーム整形システムの前段である強度分布変換を行い、円形断面のガウスビームを矩形断面のレーザービームへ変換する実験を試みた。円形ビームの矩形化は変換として複雑な変換であり、この変換が可能であれば本方式により実際に必要とされる他の様々な強度分布の変換が可能である。従来、ホログラムを用いてこのような変換が行われた例はあるが⁽²⁾、高い変換効率が期待できる反射体を用いた円形断面ビームの矩形化は初めてである。

2. レーザービーム整形システムの原理

レーザー光の電界は複素振幅により表現されるが、この複素振幅のビームの伝播方向に垂直な断面内の位相分布を制御することにより、伝播後のレーザー光の強度分布を別の強度分布に変換することができる。このようなレーザー光の強度分布を制御することのできるレーザービーム整形システムは図1に示すように2つの位相変換素子から構成される。筆者らの方式では、この位相分布を変える

位相変換素子としてデフォーダブルミラーを用いる。デフォーダブルミラーとは4. 1節で述べるように、反射板の裏面に駆動素子を取りつけ、それを駆動することにより反射板の表面形状を変え、それにレーザ光などの波動を反射させることにより位相分布を変えるものである。通常はこのようなデフォーダブルミラーは望遠鏡による天体観測に於いて大気による揺らぎを補正し、鮮明な天体画像を得るのに用いられる。レーザビーム整形システムでは1枚目のミラーで反射することにより入射レーザビームの複素振幅の位相成分のみを変え、それを伝播させることにより、すなわち(1)式で示されるようなフレネル変換を行うことにより別の振幅と位相分布を持つ複素振幅に変換する⁽⁹⁾。

図1 レーザビーム整形システム概念図

Fig.1 Schematic diagram of a laser beam-forming system

$$a'(u, v) = jk / (2\pi z) \times \exp(-jkz) \times \int \int_{-\infty}^{\infty} a(x, y) \times \exp\{-j\phi(x, y)\} \times \exp\left[jk\left\{(x-u)^2 + (y-v)^2\right\} / (2z)\right] dx dy \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $a(x, y)$ と $a'(u, v)$ は強度分布変換前と後の複素振幅、 k は波数、 z はフレネル伝播の距離、 $\phi(x, y)$ はデフォーダブルミラーによりレーザビームに与えられる位相分布である。この式から明らかなように入射ビームに加える位相分布を制御することにより、ある距離伝播後のビームの振幅成分、すなわち強度分布を制御することが可能となる。これは視点を変えれば、波面収差により像が歪むが、逆に波面収差を制御することにより像の歪み(変形量)を制御することである。レーザビーム整形システムではこの他にレーザビームを長距離伝播させるための位相補正用に、もう一枚のミラーが必要となる。

以上の原理をもとに、本研究では(1)式において円形断面のガウスビームを矩形ビームへ変換する時の入射ビームの複素振幅に加える位相項を $\phi(x, y)$ とした時に(2)式で表される表面形状 $S(x, y)$

$$S(x, y) = \lambda \phi(x, y) / (4\pi) \dots\dots\dots (2)$$

をデフォーダブルミラーにより形成し、これにレーザビームを反射することにより、複素振幅の位相を変え、

これをフレネル伝播させることによりレーザ光の強度分布を制御している。この時、(2)式ではデフォーダブルミラーへの入射角は小さく無視できるものとしている。

3. 円形ガウスビームの矩形化に必要な表面形状の空間周波数

デフォーダブルミラーを用いてレーザビームの強度分布変換が可能であることを示すために、実際にデフォーダブルミラーを試作し、円形断面のガウスビームを四角形のビームに変換する実験を行った。このようなガウスビームを矩形ビームへ変換することは、比較的複雑な変換であり、レーザの応用における多くの場合に於いてはこれよりも単純な変換で済むと思われる。このため、円形断面のガウスビームを矩形ビームへ変換することができれば、他の様々な変換も可能であると期待できる。

デフォーダブルミラーを用いてレーザビームの強度分布変換を行う場合には、強度分布変換に必要な反射面がデフォーダブルミラーにより形成できるかが問題となる。必要な反射面が形成できるかどうかを決定する主たる要因は反射板を変形させるために必要とされる駆動素子の数である。一次元的な曲線を考えた場合には空間周波数が n 次の表面形状を形成するためには少なくとも n 個の駆動点と2個の固定点が必要とされる。そこで、円形ガウスビームを矩形化するための強度分布変換ミラーの表面形状に必要とされる駆動素子の数を評価するために、反射板の表面形状を2次元的にフーリエ変換し、その空間周波数成分を調べる。

まず、円形ガウスビームを矩形化する場合に必要なとされるデフォーダブルミラーの表面形状、すなわち基準点からのデフォーダブルミラー表面の高さ、 $S(x, y)$ について検討する。

入射するガウスビームの複素振幅は、位相分布は平面であるとして(3)式で与えられる。

$$a(x, y) = A_0 \exp\left[-(x^2 + y^2) / 2r_0^2\right] \dots\dots\dots (3)$$

また、強度分布変換後の矩形ビームを

$$a'(u, v) = B_0 \text{rect}(u/u_0) \times \text{rect}(v/v_0) \times \exp[-jk\psi(u, v)] \dots\dots\dots (4)$$

とする。ここで、 $\text{rect}()$ は矩形関数を表す。 u_0 は矩形関数の幅の1/2であり、 u, v は変換後のビームの位置の座標である。(3)(4)式を(1)式に代入すると

$$\begin{aligned} & B_0 \text{rect}(u/u_0) \times \text{rect}(v/v_0) \exp[-jk\psi(u, v)] \\ &= \int \int_{-\infty}^{\infty} A_0 \exp\left[-(x^2 + y^2) / 2r_0^2\right] \times \exp[-j\phi(x, y)] \\ & \times \exp\left[jk\left\{(x-u)^2 + (y-v)^2\right\} / 2z\right] dx dy \\ &= A_0 \int \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-x^2 / 2r_0^2) \times \exp[-j\phi(x, y)] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \times \exp[jk(x-u)^2/2z] dx \times \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-y^2/2r_0^2) \\ & \times \exp[-j\phi_y(y)] \times \exp[jk(y-v)^2/2z] dy \\ & = f_u(u) \times f_v(v) \end{aligned} \quad \cdots \cdots (5)$$

となる。ここで、右辺の位相項を以下のように仮定している。

$$\exp[-j\phi(x, y)] = \exp[-j\phi_x(x)] \times \exp[-j\phi_y(y)] \quad \cdots \cdots (6)$$

すなわち、位相分布は(7)式になる。

$$\phi(x, y) = \phi_x(x) + \phi_y(y) \quad \cdots \cdots (7)$$

従って、この場合には(5)式より $a(u, v)$ の位相項も変数が u と v の成分の積として、(8)で表せる。

$$\exp[-jk\psi(u, v)] = \exp[-jk\psi_u(u)] \times \exp[-jk\psi_v(v)] \quad \cdots \cdots (8)$$

これを用いて、(1)式から次の2式を導くことができる。

$$\begin{aligned} \sqrt{B_0} \text{rect}(u/u_0) \times \exp[-jk\psi_u(u)] &= \sqrt{A_0} \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-x^2/2r_0^2) \\ & \times \exp[-j\phi_x(x)] \times \exp[jk(x-u)^2/2z] dx \end{aligned} \quad \cdots \cdots (9)$$

$$\begin{aligned} \sqrt{B_0} \text{rect}(v/u_0) \times \exp[-jk\psi_v(v)] &= \sqrt{A_0} \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-y^2/2r_0^2) \\ & \times \exp[-j\phi_y(y)] \times \exp[jk(y-v)^2/2z] dy \end{aligned} \quad \cdots \cdots (10)$$

ここで、停留位相法により、(9)(10)式の右辺の急激に変化する位相成分は無視することができる⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。すなわち、(9)式右辺の位相成分

$$\Phi = -j\phi_x(x) + jk(x-u)^2/2z \quad \cdots \cdots (11)$$

について、

$$\partial\Phi/\partial x = 0 \quad \cdots \cdots (12)$$

となる成分のみを考慮すれば良い。このため、

$$\partial\phi_x(x)/\partial x = -k(x-u)/z \quad \cdots \cdots (13)$$

が成り立つ。 k は波数、 z はフレネル伝播させる距離である。 y と u についても(10)式より(13)式と同様の式が導ける。(13)式を解くためには、 u が x の関数として与えられねばならないため、エネルギー保存則の観点から求められる(14)式より $u(x)$ を求める。

$$\begin{aligned} & \int_0^{u(x)} \text{rect}(u'/u_0) du' \\ & = 2u_0/(r_0\sqrt{\pi}) \int_0^x \exp[-(x')^2/r_0^2] dx' \end{aligned} \quad \cdots \cdots (14)$$

r_0 はガウスビームの半幅、 u_0 は矩形ビームの一辺の長

さの1/2である。上式の円形ガウスビームを矩形ビームに変換する場合の上記の微分方程式は、解析的に求めることが可能であり、(2)(7)式に代入して以下の解を得ることができる。これはホログラムを用いる場合と同じ式になる⁽²⁾⁽¹¹⁾。

$$\begin{aligned} S(x, y) &= -\frac{1}{4z} \left\{ \frac{2r_0}{\text{erf}[\sqrt{2}r_0/u_0]} \right. \\ & \left(x \text{erf}[\sqrt{2}x/u_0] + \frac{u_0}{\sqrt{2\pi}} \left[\exp\left(\frac{-2x^2}{u_0^2}\right) - 1 \right] \right) - x^2 \\ & + \frac{2r_0}{\text{erf}[\sqrt{2}r_0/u_0]} \\ & \left(y \text{erf}[\sqrt{2}y/u_0] + \frac{u_0}{\sqrt{2\pi}} \left[\exp\left(\frac{-2y^2}{u_0^2}\right) - 1 \right] \right) - y^2 \right\} \\ & = -\{S_0(x) + S_0(y)\}/4z \end{aligned} \quad \cdots \cdots (15)$$

ここで erf は誤差関数である。

図2に(15)式で表される円形ガウスビームを矩形化するためのミラー面の2次元の表面形状を、また、図3にはその2次元のフーリエ変換結果を示す。ミラー面の凹凸の深さは(15)式より明らかなように、フルネル伝播させる距離 z に反比例し、ビームの幅にほぼ比例する。ミラーの大きさが1cm角、ビームの幅が0.5cmで伝播距離が0.5mの場合には図2の最大深さは約6 μm である。2次元の表面形状は前述したように(15)式のように書けるので、そのフーリエ変換である図3は

$$F[S(x, y)] = F[S_0(x)] \times \delta(n_x) + F[S_0(y)] \times \delta(n_y) \quad \cdots \cdots (16)$$

と表すことができる。ここで $F[\]$ はフーリエ変換、 $\delta(n)$ はデルタ関数を表す。その空間周波数成分は x または y 成分のどちらかがゼロであるもののみが存在することになる。なお、この場合の反射面の大きさ、すなわちフーリエ変換を行う領域は一辺が入射ガウスビームのビーム直径の2倍としている。この空間周波数はフーリエ変換を行う領域としてミラー面の領域をどこまでとるかにある程度は依存するが、図3から明らかなように空間周波数としては10以下の空間周波数が主成分であり、比較的低い成分のものに限られていることがわかる。特に支配的であるのは空間周波数が1と3の成分である。

このように円形断面のガウスビームを矩形断面のビームに変換するのに必要とされる反射面の空間周波数成分が低周波の成分に限られるということは、比較的少ない数の駆動素子により、強度分布変換に必要な反射面を形成できる可能性が高いことを意味している。実際に、有限要素法により反射板の変形特性をシミュレーションしてみると、9個の駆動素子と4個の固定点により、ガウスビームの矩形化に必要とされる形状とほぼ同じ形状が得られる⁽⁸⁾。

図2 強度分布変換用反射面の表面形状
(計算値：円形ガウスビーム→矩形ビーム)

Fig.2 Surface profile of reflector for intensity distribution transformation
(calculation: circular cross-section Gaussian beam
-> rectangular cross-section beam)

図3 強度分布変換用反射面の空間周波数成分
(計算値：円形ガウスビーム→矩形ビーム)

Fig.3 Spatial frequency distribution of reflector surface for intensity distribution transformation
(calculation: circular cross-section Gaussian beam
-> rectangular cross-section beam)

4. デフォーマブルミラーの構造と変形特性

<4・1> デフォーマブルミラー レーザ光に位相分布を与える反射板とそれを変形するための9個の駆動素子およびその制御装置から構成されるデフォーマブルミラーを試作した。反射板は標準的な光学素子の材料であるBK7により作られており、1辺が30mmの正方形で厚みが1mmの大きさであり反射面はアルミコートされている。駆動素子としてはピエゾ素子に比べるとヒステリシスが非常に少ないPMN (Queensgate Instruments社製)を用いている。今回使用したPMNの可動量は応力の無い状態で約15μmである。PMNの変形量は図4に示すようにD/Aコンバータおよび駆動電圧制御装置を通してパソコンにより制御することが可能である。このデフォーマブルミラーの表面形状を変えることにより、反射するレーザ光に様々な位相分布を加え、それによりレーザビームの強度分布を空間的なコヒーレンシをほとんど落とさずに整形することを試みた。図5にデフォーマブルミラーの図とアクチュエータの配置図を示す。このデフォーマブルミラーは円形断面のガウスビームを矩形ビームに変換することを目的としており、図2に示すようにミラー面は4つの凹の部分を持つ必要があり、その最下部が反射板をミラーハウジングに固定する接着面となっている。

図4 デフォーマブルミラー駆動システム

Fig.4 Schematic diagram of a deformable mirror drive system

ここで試作したデフォーマブルミラーは4つの接着箇所(固定点)を持ち、駆動点も9点と少ない。このために、接着によるミラーの形状の変形はビームの整形特性に重要な影響を与える。図6に駆動素子によるミラー板への応力の無い状態でのミラー面の形状を示す。ここで、反射板としてアルミコートした1mm厚のBK7の市販品を用いているが、その平面は1λ程度の凹面になっていた。

レーザビーム整形用のデフォーマブルミラーは装置内に収まる程度の伝播距離以内で強度分布を変形する必要があるため通常の位相補正用の光学系に比べると、必要とされる位相の勾配、すなわち反射面の勾配が大きい傾向がある。大きい勾配を作るためには変形する反射板は薄い必要がある。図7に示すような簡単なモデルを用い

(a) デフォーミブルミラーヘッド
(a) Deformable mirror head

(b) 駆動点および固定点の位置
(b) Location of actuators and fixed points

図5 デフォーミブルミラー構造図

Fig.5 Schematic diagram of a deformable mirror head

図6 デフォーミブルミラー反射面の表面形状

実測値：PMNによる変形無し
干渉縞間隔：0.43μm

Fig.6 Reflector surface profile of deformable mirror

measurement: without deformation by PMN
1 fringe : 0.43μm

図7 変形応力評価のための自由支持ガラス円盤モデル

Fig.7 Free-support glass disk model for calculation of deformation stress

て、(17) (18) 式により石英ガラスの場合について自由サポートの円盤に負荷を加えたときの変形量とストレスの関係を求めた結果を図8に示す⁽¹²⁾。

$$P = \frac{4\pi E h \omega_{\max}}{3(3+\nu)(1-\nu)a^2} \quad \dots\dots\dots(17)$$

$$\sigma = \frac{4\pi E h \omega_{\max}}{3(3+\nu)(1-\nu)a^2} \left[\frac{3}{2\pi} + (1+\nu) \left(0.485 \ln \frac{a}{h} + 0.52 \right) \right] \quad \dots\dots\dots(18)$$

ここで、Pは中心の負荷、Eは弾性係数、hはガラス板の厚み、 ν はポアソン比、aは円盤の半径、 $\omega_{\max}$ は中心点の歪み、 σ は応力である。直径7mmの窪みを作る場合に厚み3mmの円盤では $1.2\mu\text{m}$ でストレスが破壊応力と等しくなるのに対し、厚み1mmの円盤では2倍近い $2.2\mu\text{m}$ の変形で破壊応力に等しくなる。また、変形に必要な負荷に関しては、用いたPMNの押す力は840Nであり、3mmの厚みの場合には約 $2.8\mu\text{m}$ の変形でこの値になるのに対し、1mmの場合には $15\mu\text{m}$ の変形でも200Nである。実際にこのデフォーミブルミラーで厚みが2mmの場合においては、変形量を大きくすると、必要な加重が大きくなるためにPMNでは十分な変形量を得ることができなくなる。

また、変形に必要な加重が増えた場合は接着剤が最大の問題となる。図8の変形を押し出す力によってではなく引っ張り力により得ようとした場合には、この引っ張り加重に接着剤が耐える必要がある。しかし、接着力には限界があるために接着面積を大きく取る必要が生じる。接着剤としてエポキシ系の接着剤を用いるとして接着力は 60N/mm^2 であり、この場合には3mmのミラー厚で $2.2\mu\text{m}$ 変形させる場合の840Nの引っ張り過重に耐えるためには 14mm^2 の接着面積が必要になってしまう。実験で用いたデフォーミブルミラーではミラー板は直径2mmの円柱状のサポートに接着しており、一箇所の接着面積は約 3mm^2 である。一般に厚いミラー板ほど平面度が良いが、その反面大きい変形量を得ることができない。今回の実験では変形量を多くとるため厚さ1mmのミラー板を用いている。

(a) 負荷特性

(b) 応力特性

図8 自由支持ガラス円盤に変形を加えたときの
応力と負荷 (計算値)

Fig.8 Stress (a) and load (b) of free-support glass disk
subjected deformation (calculation)

<4・2> デフォーマブルミラーの変形特性 図9にPMNを駆動し、ガウスビームの矩形化に必要な表面形状に近づけた場合のミラーの表面形状の測定値を示す。但し、実際の強度分布変換の際には全体的な変形量を大きくしているために表面形状計測装置 (WYKO 400E) の測定範囲を越えてしまうため、図9にはほぼ同じ形状で全体的な変形量が小さいケースを示した。また図10に矩形化に必要なミラー面形状から4以上の高い空間周波数をカットした場合のミラーの表面形状を示す。ここで図10(a)は図2の3次元プロットを等高線で再プロットしたものである。表面形状の計測には干渉型の計測装置 (WYKO 400E) を用いた。これより、実際にこのデフォーマブルミラーで得られる形状は完全に矩形化に必要な形状から高い空間周波数成分がカットされた表面形状に近いことが分かる。

図9 デフォーマブルミラー反射面の表面形状

実測値：PMNによる変形有り
干渉縞間隔：0.75μm

Fig.9 Reflector surface profile of deformable mirror

measurement : with deformation by PMN
1 fringe : 0.75μm

(a) 4以上の空間周波数をカットしない場合

(b) 4以上の空間周波数をカットした場合

図10 4以上の空間周波数をカットした場合の
強度分布変換用反射面の形状 (計算値)
干渉縞間隔：1λ

Fig.10 Reflector surface profile for intensity distribution
transformation with space frequency exceeding
four (a) and without space frequency exceeding
four (b) (calculation)

1 fringe : 1λ

5. デフォーマブルミラーによるガウスビームの強度分布変換

<5・1> 実験配置 実験装置の配置を図11に示す。He-Neレーザをコリメータで拡大した後に、デフォーマブルミラーで反射させたレーザビームの強度分布および干渉縞を観測している。デフォーマブルミラーはマッハツエンダー干渉光学系に組み入れ、強度分布変換後の強度分布と位相分布をCCDカメラにより測定している。参照ビームのビーム径の拡大率は10倍である。また、レーザビームの強度分布を観測するためのスクリーンはスペックルパターンを除去するために回転させている。強度分布変換を行う位置は先に述べたようにデフォーマブルミラーの全体的な変形量を変えることにより調整可能であるが、ここではデフォーマブルミラーより5mの位置とした。

図11 強度分変換実験時の光学素子の配置
Fig.11 Experimental setup of optics for intensity distribution transformation

<5・2> 強度分布 図12(a)に変換前のレーザビームのプロファイル、(b)にデフォーマブルミラーで強度分布を変換したレーザビームのプロファイルを示す。これより、デフォーマブルミラーを用いて円形断面のガウスビームのHe-Neレーザ光を四角形断面のビームに変換することに成功したことが分かる。

また、図13に強度分布変換の前と後の干渉縞を示す。変換後も干渉縞を有していることから、空間的なコヒーレンシを保存していることが明らかである。また、その形状は変換後のレーザビームが存在する領域に於いて、比較的になだらかであり、図13に示した干渉縞の形状は図14に示す強度分布変換後の位相分布に関してビーム伝播シミュレーション⁽⁷⁾⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾を行うことにより得た結果に極めて近い。もう一つのデフォーマブルミラーなどの位相変換素子を用意すれば、強度分布変換により歪んだ位相分布の補正が可能であり、それにより矩形化後も良い伝播特性が期待できる。

(a) 強度分布変換前レーザビームプロファイル
(a) Laser beam profile before intensity distribution transformation

(b) 強度分布変換後レーザビームプロファイル
(b) Laser beam profile after intensity distribution transformation

図12 デフォーマブルミラーによる強度分布変換結果
Fig.12 Experimental results of intensity distribution transformation by deformable mirror

(a) 強度分布変換前の干渉縞
(a) Fringe pattern of laser beam before intensity distribution transformation

(b) 強度分布変換後の干渉縞
(b) Fringe pattern of laser beam after intensity distribution transformation

図 1 3 強度分布変換後の干渉縞 (実測値)
Fig.13 Fringe pattern of laser beam after intensity distribution transformation (experiment)

図 1 4 強度分布変換後の位相分布
シミュレーション結果
干渉縞間隔: 1.8λ

Fig.14 Phase profile of laser beam after intensity distribution transformation calculated by beam propagation simulation
1 fringe : 1.8λ

6. まとめ

デフォーマブルミラーによるレーザビーム強度分布変換の可能性を検討し、実際にレーザ光を特殊な形状の反射面で反射することにより制御して、レーザ光の強度分布を変換した。主な結果は以下の通りである。

(1) デフォーマブルミラーの表面形状について

円形断面のガウスビームを矩形断面で均一な強度分布のレーザビームに変換するために必要とされる反射面の表面形状について、理論的に検討し、空間周波数としては1および3が支配的であることを明らかにした。これは、駆動素子の数の少ないデフォーマブルミラーによってもレーザビーム強度の変換ができることを示している。

(2) デフォーマブルミラーによる円形断面ガウスビームの矩形化

円形断面のガウスビームの矩形化を目的として、駆動素子の数が9個のデフォーマブルミラーを試作した。これを用いて、ガウスビームの矩形化が可能であることを実際に示した。

(3) レーザビーム強度分布変換後の波面形状

ガウスビームの矩形化後の波面形状は、シミュレーション結果にほぼ一致する。このことより、矩形化後の波面を別のデフォーマブルミラーにより補正すれば伝播特性を向上することができる。

なお、今回の強度分布変換ではビームの断面は円形から矩形に変換されているが、均一性についてはまだ十分ではない。これはデフォーマブルミラーの表面形状がビーム整形に必要なとされる形状と若干異なっていたためである。さらにデフォーマブルミラーの駆動点数を増やして表面形状の精度を向上させることにより強度分布の均一性も向上させることができると考える。また、本実験では手で表面形状を変化させたが、良好な再現性を持って強度分布の変換を行うためには、レーザ光の強度分布やミラー面の表面形状のデータをフィードバックして最適制御を行うことが重要である。

謝 辞

電力中央研究所 狛江研究所 佐々木三郎氏および横山茂氏をはじめとする電気物理部の皆様、(株)シー・アール・エス 飯塚静男氏、湘南工科大学 五十嵐紀雄氏、森克樹氏からは貴重なご助言とご助力を頂きましたことを感謝いたします。

(平成7年5月24日受付、同7年10月4日再受付)

文 献

- (1) I.L.Bass, et.al., Appl.Opt.31, pp.6993-7006(1992)
- (2) C.C.Aleksoff, et.al., Optical Engineering, Vol.31, No.5, pp.537-543(1991)

- (3)家正則、唐牛宏、他、応用物理、62(6),pp.540-551(1994)
- (4)一ノ瀬祐治、他、光学、21(10),pp.714-719(1992)
- (5)尹根榮、実野孝久、他、擾乱媒質中の波動伝播と補償光学、pp.180-156,(1993)
- (6)植田憲一、S.Chetkin、擾乱媒質中の波動伝播と補償光学、pp.126-135,(1993)
- (7)K.Nemoto, et.al.,SPIE proceeding 2119(1994)
- (8)根本孝七、他、電気論A.115, 683 (平7-8)
- (9)Olof Bryngdahl, J.Opt.Soc.Am.64,pp.1092-1099(1974)
- (10)谷田貝豊彦、光とフーリエ変換(朝倉出版) p123 (1992)
- (11)Nicholas C.Roberts, Appl.Opt 31(17), pp.3198-3200(1992)
- (12)日本機械学会編、機械設計便覧(丸善) p758 (昭和58)
- (13)菅原宏之、レーザー研究 16(3),pp.32-40,(1988)
- (14)P.W.Milonni and A.H.Paxton, J.Appl.Phys. 49(3),pp. 1012-1027(1978)

根本孝七

(正員) 昭和34年7月16日生。昭和59年3月東京大学大学院修士課程修了。同年4月(財)電力中央研究所入所、現在に至る。平成元年12月より4年7月までレーザー濃縮技術研究組合に出向。電磁フローカプラポンプの解析、査察用チェレンコフ光モニター装置およびレーザー装置の開発に従事。応用物理学会、レーザー学会、SPIE会員。

藤井 隆

(正員) 昭和36年4月26日生。昭和62年3月早稲田大学大学院修士課程修了。同年4月(財)電力中央研究所入所、現在に至る。平成3年10月より4年7月までレーザー濃縮技術研究組合に出向。銅蒸気レーザー用固体電源および半導体レーザーの波長制御技術の開発に従事。応用物理学会員。

後藤直彦

(正員) 昭和39年8月20日生。平成元年3月慶應義塾大学大学院電気工学研究科修士課程修了。同年4月(財)電力中央研究所入所。平成5年4月より7年3月までレーザー濃縮技術研究組合に出向。臭化銅レーザーの開発に従事。応用物理学会、日本物理学会会員。

名雪琢弥

(非会員) 昭和43年3月9日生。平成6年3月電気通信大学大学院電気通信学研究科電子物性工学専攻科博士前期課程修了。同年4月(財)電力中央研究所入所、現在に至る。平成6年10月よりレーザー濃縮技術研究組合に出向。銅蒸気レーザー、色素レーザーおよび補償光学装置の開発に従事。応用物理学会会員。

金井美一

(非会員) 昭和28年9月23日生。1977年3月千葉大学工学部機械工学科卒業。現在、レオニクス株式会社にてレーザー装置、レーザー周辺機器および各種応用機器の開発に従事。OSA (Optical Society of America) 会員。