

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2010-58128

(P2010-58128A)

(43) 公開日 平成22年3月18日(2010.3.18)

(51) Int.Cl.	F I	テーマコード (参考)
B 2 3 K 26/06 (2006.01)	B 2 3 K 26/06	A
B 2 3 K 26/067 (2006.01)	B 2 3 K 26/06	Z
	B 2 3 K 26/067	

審査請求 未請求 請求項の数 4 O L (全 25 頁)

(21) 出願番号	特願2008-223975 (P2008-223975)	(71) 出願人	000236436
(22) 出願日	平成20年9月1日(2008.9.1)		浜松ホトニクス株式会社
(出願人による申告) 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構、ナノテクノロジープログラム/三次元光デバイス高効率製造技術、産業技術力強化法第19条の適用を受ける特許出願		(74) 代理人	100088155
			弁理士 長谷川 芳樹
		(74) 代理人	100092657
			弁理士 寺崎 史朗
		(74) 代理人	100124291
			弁理士 石田 悟
		(74) 代理人	100110582
		弁理士 柴田 昌聰	
	(72) 発明者	松本 直也	
			静岡県浜松市東区市野町1126番地の1 浜松ホトニクス株式会社内

最終頁に続く

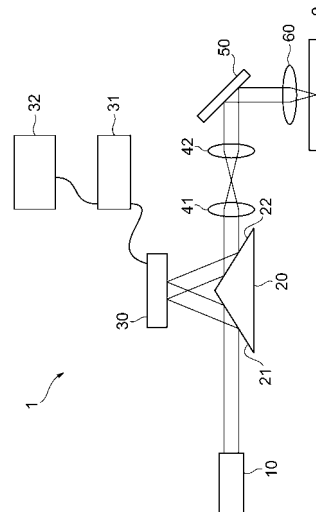
(54) 【発明の名称】 レーザ光照射装置およびレーザ光照射方法

(57) 【要約】

【課題】対象物の内部の複数の集光位置それぞれにおけるレーザ光の集光領域の伸張を低減することができるレーザ光照射装置を提供する。

【解決手段】レーザ光照射装置1は、対象物9の内部の複数の集光位置にレーザ光を集光照射する装置であって、レーザ光源10、プリズム20、空間光変調器30、レンズ41、レンズ42、ミラー50および対物レンズ60を備える。空間光変調器30は、レーザ光源10から出力されたレーザ光を入力し、2次元配列された複数の画素それぞれにおいてレーザ光の位相を変調するホログラムを呈示して、その位相変調後のレーザ光を出力する。空間光変調器30に呈示されるホログラムは、複数の集光位置それぞれにレーザ光を集光させるための集光用ホログラムと、複数の集光位置それぞれに応じたレーザ光の収差を補正するための補正用ホログラムと、が重畳されたものである。

【選択図】 図1



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

対象物の内部の複数の集光位置にレーザ光を集光照射する装置であって、
 レーザ光を出力するレーザ光源と、
 前記レーザ光源から出力されたレーザ光を入力し、2次元配列された複数の画素それぞれにおいて前記レーザ光の位相を変調するホログラムを呈示して、その位相変調後のレーザ光を出力する位相変調型の空間光変調器と、
 前記空間光変調器から出力されたレーザ光を前記複数の集光位置に集光する集光光学系と、
 前記複数の集光位置それぞれにレーザ光を集光させるための集光用ホログラムと、前記複数の集光位置それぞれに応じたレーザ光の収差を補正するための補正用ホログラムと、
 を重畳したホログラムを前記空間光変調器に呈示させる制御部と、
 を備えることを特徴とするレーザ光照射装置。

10

【請求項 2】

前記制御部が、前記対象物の外部に集光位置が存在し且つ補正をしなかった場合の集光位置に対し、前記対象物の内部に集光位置が存在し且つ補正をした場合の集光位置の光路長変化分に基づいて、前記補正用ホログラムを設定する、
 ことを特徴とする請求項 1 に記載のレーザ光照射装置。

【請求項 3】

対象物の内部の複数の集光位置にレーザ光を集光照射する方法であって、
 レーザ光を出力するレーザ光源と、
 前記レーザ光源から出力されたレーザ光を入力し、2次元配列された複数の画素それぞれにおいて前記レーザ光の位相を変調するホログラムを呈示して、その位相変調後のレーザ光を出力する位相変調型の空間光変調器と、
 前記空間光変調器から出力されたレーザ光を前記複数の集光位置に集光する集光光学系と、
 を用いて、
 前記複数の集光位置それぞれにレーザ光を集光させるための集光用ホログラムと、前記複数の集光位置それぞれに応じたレーザ光の収差を補正するための補正用ホログラムと、
 を重畳したホログラムを前記空間光変調器に呈示させる、
 ことを特徴とするレーザ光照射方法。

20

30

【請求項 4】

前記対象物の外部に集光位置が存在し且つ補正をしなかった場合の集光位置に対し、前記対象物の内部に集光位置が存在し且つ補正をした場合の集光位置の光路長変化分に基づいて、前記補正用ホログラムを設定する、
 ことを特徴とする請求項 3 に記載のレーザ光照射方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、対象物の内部の複数の集光位置にレーザ光を集光照射する装置および方法に関するものである。

40

【背景技術】

【0002】

レーザ光源から出力されたレーザ光を集光光学系により集光して加工対象物に照射することにより該加工対象物を加工することができる。単にレンズを用いてレーザ光を集光するだけであれば、レーザ光の1つの集光位置を走査することで、加工対象物を所望の形状に加工することができる。しかし、この場合には加工に要する時間が長い。

【0003】

加工時間の短縮化を図るための最も簡便な手法は、複数の集光位置にレーザ光を同時に

50

集光照射して多点同時加工を行うことである。例えば、複数のレーザ光源を用いて、各レーザ光源から出力されたレーザ光をレンズにより集光すれば、多点同時加工を行うことができる。しかし、この場合には、複数のレーザ光源を用いることから、コストが高く、設置領域や光学系が複雑なものとなる。

【0004】

このような問題を解消することを意図した発明が特許文献1に開示されている。この特許文献1に開示された発明では、位相変調型の空間光変調器にホログラムを呈示させて、1つのレーザ光源から出力されたレーザ光を空間光変調器により位相変調し、その位相変調されたレーザ光を集光光学系により複数の集光位置に同時に集光照射する。空間光変調器に呈示されるホログラムは、集光光学系により複数の集光位置にレーザ光が集光されるような位相変調分布を有する。

10

【0005】

なお、特許文献1に開示されているような対象物の内部の複数の集光位置にレーザ光を集光照射する技術は、例えば、ガラスなどの内部にレーザ光を照射し当該照射部の屈折率変化を起こして光集積回路を形成したり、ガラスなどの内部にレーザ光を照射し当該照射部にクラックを形成して切断したり、シリコンウェハなどの内部にレーザ光を照射して当該照射部に改質層を形成し切断したり、といった加工に用いられるだけでなく、レーザ顕微鏡や多光子吸収顕微鏡などにおいてレーザ光の集光位置を対象物内部で走査して撮像するといった用途にも用いられる。

【特許文献1】特開2006-68762号公報

20

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0006】

しかしながら、特許文献1に開示された発明では、例えば対象物の内部の複数の集光位置にレーザ光を集光照射する場合、各集光位置におけるレーザ光の集光領域が光軸方向に伸張し、また、その集光領域の伸張の程度は集光位置によって異なる。このような場合、上述したような加工用途や撮像用途において正確な加工または撮像を行うことが困難となる。また、例えば、加工用途を考えると、集光領域の伸張は、加工形状の劣化を引き起こすだけでなく、レーザ光の所要パワーの増加を引き起こす。

【0007】

30

本発明は、上記問題点を解消する為になされたものであり、対象物の内部の複数の集光位置それぞれにおけるレーザ光の収差を低減することができるレーザ光照射装置およびレーザ光照射方法を提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0008】

本発明に係るレーザ光照射装置は、対象物の内部の複数の集光位置にレーザ光を集光照射する装置であって、(1)レーザ光を出力するレーザ光源と、(2)レーザ光源から出力されたレーザ光を入力し、2次元配列された複数の画素それぞれにおいてレーザ光の位相を変調するホログラムを呈示して、その位相変調後のレーザ光を出力する位相変調型の空間光変調器と、(3)空間光変調器から出力されたレーザ光を複数の集光位置に集光する集光光学系と、(4)複数の集光位置それぞれにレーザ光を集光させるための集光用ホログラムと、複数の集光位置それぞれに応じたレーザ光の収差を補正するための補正用ホログラムと、を重畳したホログラムを空間光変調器に呈示させる制御部と、を備えることを特徴とする。

40

【0009】

本発明に係るレーザ光照射装置では、制御部は、対象物の外部に集光位置が存在し且つ補正をしなかった場合の集光位置に対し、対象物の内部に集光位置が存在し且つ補正をした場合の集光位置の光路長変化分に基づいて、補正用ホログラムを設定するのが好適である。

【0010】

50

本発明に係るレーザ光照射方法は、対象物の内部の複数の集光位置にレーザ光を集光照射する方法であって、(1)レーザ光を出力するレーザ光源と、(2)レーザ光源から出力されたレーザ光を入力し、2次元配列された複数の画素それぞれにおいてレーザ光の位相を変調するホログラムを呈示して、その位相変調後のレーザ光を出力する位相変調型の空間光変調器と、(3)空間光変調器から出力されたレーザ光を複数の集光位置に集光する集光光学系と、を用いる。そして、本発明に係るレーザ光照射方法は、複数の集光位置それぞれにレーザ光を集光させるための集光用ホログラムと、複数の集光位置それぞれに応じたレーザ光の収差を補正するための補正用ホログラムと、を重畳したホログラムを空間光変調器に呈示させることを特徴とする。

【0011】

本発明に係るレーザ光照射方法は、対象物の外部に集光位置が存在し且つ補正をしなかった場合の集光位置に対し、対象物の内部に集光位置が存在し且つ補正をした場合の集光位置の光路長変化分に基づいて、補正用ホログラムを設定するのが好適である。

【発明の効果】

【0012】

本発明によれば、複数の集光位置それぞれにおけるレーザ光の収差を低減することができる。

【発明を実施するための最良の形態】

【0013】

以下、添付図面を参照して、本発明を実施するための最良の形態を詳細に説明する。なお、図面の説明において同一の要素には同一の符号を付し、重複する説明を省略する。

【0014】

図1は、本実施形態に係るレーザ光照射装置1の構成図である。この図に示されるレーザ光照射装置1は、対象物9の内部の複数の集光位置にレーザ光を集光照射する装置であって、レーザ光源10、プリズム20、空間光変調器30、駆動部31、制御部32、レンズ41、レンズ42、ミラー50および対物レンズ(集光光学系)60を備える。

【0015】

レーザ光源10は、対象物9の内部の複数の集光位置に集光照射されるべきレーザ光を出力するものであり、好適にはフェムト秒レーザ光源やNd:YAGレーザ光源などのパルスレーザ光源である。

【0016】

空間光変調器30は、位相変調型のものであって、レーザ光源10から出力されプリズム20の第1反射面21で反射されたレーザ光を入力し、2次元配列された複数の画素それぞれにおいてレーザ光の位相を変調するホログラムを呈示して、その位相変調後のレーザ光を出力する。この空間光変調器30において呈示される位相ホログラムは、数値計算により求められたホログラム(CGH: Computer Generated Hologram)であるのが好ましい。

【0017】

この空間光変調器30は、反射型のものであってもよいし、透過型のものであってもよい。反射型の空間光変調器20としては、LCOs(Liquid Crystal on Silicon)型、MEMS(Micro Electro Mechanical Systems)型および光アドレス型の何れであってもよい。また、透過型の空間光変調器20としてはLCD(Liquid Crystal Display)等であってもよい。図1では、空間光変調器30として反射型のもものが示されている。透過型の場合にはプリズム20は必要ない。

【0018】

駆動部31は、空間光変調器30の2次元配列された複数の画素それぞれにおける位相変調量を設定するものであり、その画素毎の位相変調量設定のための信号を空間光変調器30に与える。駆動部31は、空間光変調器30の2次元配列された複数の画素それぞれにおける位相変調量を設定することで、空間光変調器30にホログラムを呈示させる。

【0019】

10

20

30

40

50

レンズ 4 1 およびレンズ 4 2 は、4 f 光学系を構成していて、空間光変調器 3 0 と対物レンズ 6 0 とが互いに結像関係となるように配置されている。すなわち、レンズ 4 1 およびレンズ 4 2 からなる 4 f 光学系は、空間光変調器 3 0 から出力されプリズム 2 0 の第 2 反射面 2 2 で反射されたレーザ光を入力して、空間光変調器 3 0 におけるレーザ光の像を対物レンズ 6 0 に結像させる。

【 0 0 2 0 】

ミラー 5 0 は、レンズ 4 1 およびレンズ 4 2 からなる 4 f 光学系から出力されたレーザ光を入力して、このレーザ光を対物レンズ 6 0 へ反射させる。集光光学系としての対物レンズ 6 0 は、ミラー 5 0 で反射されたレーザ光を入力して、このレーザ光を対象物 9 の内部の複数の集光位置に集光する。

10

【 0 0 2 1 】

制御部 3 2 は、例えばコンピュータで構成され、駆動部 3 1 の動作を制御することで、駆動部 3 1 から空間光変調器 3 0 へホログラムを書き込ませる。このとき、制御部 3 2 は、空間光変調器 3 0 から出力されたレーザ光を集光光学系 6 0 により対象物 9 の内部の複数の集光位置に集光させるホログラムを空間光変調器 3 0 に呈示させる。

【 0 0 2 2 】

図 2 は、対象物 9 の内部の 2 つの集光位置 A , B にレーザ光が集光される様子を示す図である。空間光変調器 3 0 に呈示されるホログラム ϕ_{result} は、集光位置 A にレーザ光を集光させるための集光用ホログラムを ϕ_A とし、集光位置 B にレーザ光を集光させるための集光用ホログラムを ϕ_B として、下記 (1) 式の結果から位相のみを取り出すことで得られる。ここで、 K_A , K_B は係数である。なお、この操作を本明細書では「位相化法」と呼ぶ。空間光変調器 3 0 内を複数の小さな領域に分割しそれぞれにホログラムを配置する場合と比較して、この位相化法を用いると、複数のホログラムが 1 つの大きな領域に配置されるため、NA の確保や耐光性を高めることができる。

20

【 0 0 2 3 】

【 数 1 】

$$\exp(\phi_{result}) = K_A \exp(\phi_A) + K_B \exp(\phi_B) \quad \dots (1)$$

【 0 0 2 4 】

また、集光位置 A にレーザ光を集光させるための集光用ホログラム ϕ_A は、対物レンズ 6 0 の光軸に垂直な面上の所定位置にレーザ光を集光させるためのホログラムを ϕ_{A_target} とし、対物レンズ 6 0 の光軸方向の所定位置にレーザ光を集光させるためのホログラムを ϕ_{A_FLP} として、下記 (2 a) 式から得られる。同様に、集光位置 B にレーザ光を集光させるための集光用ホログラム ϕ_B は、対物レンズ 6 0 の光軸に垂直な面上の所定位置にレーザ光を集光させるためのホログラムを ϕ_{B_target} とし、対物レンズ 6 0 の光軸方向の所定位置にレーザ光を集光させるためのホログラムを ϕ_{B_FLP} として、下記 (2 b) 式から得られる。

30

【 0 0 2 5 】

【 数 2 】

$$\phi_A = \phi_{A_FLP} + \phi_{A_target} \quad \dots (2 a)$$

40

$$\phi_B = \phi_{B_FLP} + \phi_{B_target} \quad \dots (2 b)$$

【 0 0 2 6 】

対物レンズ 6 0 の光軸方向に沿った所定位置にレーザ光を集光させるためのホログラム ϕ_{A_FLP} , ϕ_{B_FLP} は、フレネルレンズパターン (F L P : Fresnel Lens Pattern) を表し、下記 (3) 式で表される。ここで、 r は中心からの距離であり、 λ は波長であり、 f は焦点距離である。図 3 は、フレネルレンズパターンにおける位相変調分布を示す図である。この図では、位相変調量がグレイスケールで示されている。

【 0 0 2 7 】

50

【数 3】

$$\phi_{FLP}(r) = \frac{\pi \cdot r^2}{\lambda \cdot f} \quad \dots (3)$$

【0028】

なお、フレネルレンズパターンに替えてフレネルゾーンプレート (FZP: Fresnel Zone Plate) が用いられてもよい。フレネルゾーンプレートは、下記(3)式を2で割ったときの剰余が未満である位置で値0を有し、その剰余が以上である位置で値を有するようにして、2値化されたものである。

【0029】

対物レンズ60から出力されるレーザ光が理想的な収斂光であって、集光位置が対物レンズ60と対象物9の表面との間の空間であるとすると、その集光位置におけるレーザ光の集光領域は狭い。しかし、対物レンズ60から出力されるレーザ光が理想的な収斂光であったとしても、対象物9の内部においてレーザ光が集光される場合、その集光位置におけるレーザ光の集光領域は光軸方向に伸張する。これについて以下に更に詳細に説明する。

10

【0030】

図4は、対象物9の内部においてレーザ光が集光される様子を示す図である。同図に示されるように、対物レンズ60と対象物9の表面との間の空間の屈折率を n_1 とし、対象物9の屈折率を n_2 とする。このとき、屈折率が互いに異なる空間と対象物9との境界面を光が通過するとき、下記(4)式で表されるスネルの法則に従って光が屈折する。ここで、 θ_1 は入射角であり、 θ_2 は屈折角である。

20

【0031】

【数 4】

$$n_1 \cdot \sin \theta_1 = n_2 \cdot \sin \theta_2 \quad \dots (4)$$

【0032】

図5に示されるように、このスネルの法則に従う屈折により、対物レンズ60の周辺部を通る入射角が大きい光線 L_1 による集光位置は、対物レンズ60の中心部付近を通る入射角が小さい近軸光線 L_2 による集光位置から大きくずれる。その結果、集光領域は、同図に示されるように光軸方向に伸びる。このずれは球面収差と呼ばれる。このような伸びた集光領域で加工が行われると、収差がない場合に比べて、強い光量を要したり、加工部分が光軸方向に間延びしたりする。

30

【0033】

球面収差量は内部の集光位置の深さ d によって異なる。光軸から距離 h だけ離れた光線の球面収差 s は下記(5)式で表される。この式から、球面収差が深さ d に比例し、深くなるほど球面収差量が大きくなることがわかる。また、この(5)式を用いて波面収差 $E(h)$ は下記(6)式で表される。ここで、 h は、対物レンズ60における光線の高さ(光軸からの距離)である。

40

【0034】

【数 5】

$$\Delta s = -\frac{(n_2^2 - 1)}{2n_2} d \cdot \tan^2 \theta \quad \dots (5)$$

【0035】

【数 6】

$$E(h) = \frac{1}{f^2} \int_0^h (\Delta s) h dh \quad \dots (6)$$

50

【 0 0 3 6 】

球面収差が大きくなると、加工のためにレーザ光の光量を大きくしなければならなかったり、光軸方向に集光領域が伸びて形成されたりしてしまう。特に、光軸方向に集光領域が伸びて形成されてしまうことは光集積回路を作るうえで好ましくない。

【 0 0 3 7 】

そこで、本実施形態では、制御部 3 2 は、各集光位置にレーザ光を集光させるための集光用ホログラム H_A 、 H_B と、各集光位置に応じたレーザ光の収差を補正するための補正用ホログラム H_{A_SACP} 、 H_{B_SACP} と、を重畳したホログラムを空間光変調器 3 0 に呈示させる。補正用ホログラム H_{A_SACP} は、集光用ホログラム H_A (上記 (2 a) 式) による対象物 9 の内部の集光位置 A でのレーザ光の集光の際の波面収差を補正するものである。また、補正用ホログラム H_{B_SACP} は、集光用ホログラム H_B (上記 (2 b) 式) による対象物 9 の内部の集光位置 B でのレーザ光の集光の際の波面収差を補正するものである。

10

【 0 0 3 8 】

図 1 に示されるレーザ光照射装置 1 の光学系において、空間光変調器 3 0 に呈示されるホログラムのうちフレネルレンズパターンを表すホログラム成分による焦点距離を f_{FLP} とし、対物レンズ 6 0 の焦点距離を f_{object} とし、レンズ 4 1 およびレンズ 4 2 からなる 4 f 光学系の倍率を M とすると、全体の合成焦点距離 f_{result} は下記 (7) 式で表される。4 f 光学系の倍率 M は、レンズ 4 1 およびレンズ 4 2 それぞれの焦点距離の比で決定される。

20

【 0 0 3 9 】

【 数 7 】

$$1/f_{result} = 1/f_{object} + M^2/f_{FLP} \quad \dots (7)$$

【 0 0 4 0 】

この式から判るように、空間光変調器 3 0 に呈示されるホログラムのうちフレネルレンズパターンを表すホログラム成分による焦点距離 f_{FLP} が異なれば、全体の合成焦点距離 f_{result} も異なる。そこで、集光用ホログラム H_A における合成焦点距離に応じて補正用ホログラム H_{A_SACP} が作成され、また、集光用ホログラム H_B における合成焦点距離に応じて補正用ホログラム H_{B_SACP} が作成される。補正用ホログラム H_{A_SACP} 、 H_{B_SACP} は、対物レンズ 6 0 に入射する前のレーザ光の波面を、上記 (6) 式で表される波面収差 $E(h)$ と逆の波面とするものとして作成され得る。なお、より好適な補正用ホログラム H_{B_SACP} 、 H_{B_SACP} の作成方法については後述する。

30

【 0 0 4 1 】

そして、空間光変調器 3 0 に呈示されるべきホログラム H_{result} は下記 (8) 式に従って作成される。すなわち、集光用ホログラム H_A と補正用ホログラム H_{A_SACP} とが加算されたものと、集光用ホログラム H_B と補正用ホログラム H_{B_SACP} とが加算されたものが、位相化法 (上記 (1) 式) により合成されることで、空間光変調器 3 0 に呈示されるべきホログラム H_{result} が作成される。なお、両者に共通する歪み (例えば空間光変調器 3 0 が有する歪み) が上記ホログラム H_{result} に加算されたものが空間光変調器 3 0 に呈示されてもよい。

40

【 0 0 4 2 】

【 数 8 】

$$\exp(\phi_{result}) = K_A \cdot \exp(\phi_A + \phi_{A_SACP}) + K_B \cdot \exp(\phi_B + \phi_{B_SACP}) \quad \dots (8)$$

【 0 0 4 3 】

光軸方向に沿った集光位置 A と集光位置 B との間の距離が比較的近い場合には、集光位置 A、B それぞれの場合の合成焦点距離の平均値に応じて補正用ホログラム H_{SACP} が作成されて、空間光変調器 3 0 に呈示されるべきホログラム H_{result} は下記 (9) 式に従って作成されてもよい。すなわち、集光用ホログラム H_A と集光用ホログラム H_B とが位相化

50

法（上記（１）式）により合成された ϕ_{temp} が作成され（（９a）式）、この作成された ϕ_{temp} と補正用ホログラム ϕ_{SACP} とが加算されることで（（９b）式）、空間光変調器 30 に呈示されるべきホログラム ϕ_{result} が作成される。なお、この場合も、両者に共通する歪みが上記ホログラム ϕ_{result} に加算されたものが空間光変調器 30 に呈示されてもよい。

【 0 0 4 4 】

【 数 9 】

$$\exp(\phi_{temp}) = K_A \cdot \exp(\phi_A) + K_B \cdot \exp(\phi_B) \quad \dots (9a)$$

$$\phi_{result} = \phi_{temp} + \phi_{SACP} \quad \dots (9b)$$

10

【 0 0 4 5 】

なお、ガラスやシリコンウェハなどの対象物 9 を切断する場合に、その対象物 9 の内部にレーザ光を集光して改質層を形成すると、その改質層は、更に深い位置にレーザ光を集光して改質層を形成する際に影響を及ぼす。したがって、深い位置から順に改質層を形成するのが好適である。複数の集光位置にレーザ光を集光照射する場合においても同様である。よって、複数の集光位置にレーザ光を集光照射する場合には、集光位置を互いに近づけることにより、あたかも奥行き方向に伸びた 1 本の線として加工することが望ましい。

【 0 0 4 6 】

レーザ光源 10 としてフェムト秒レーザ光源を用いる場合には、凸レンズで構成される 4 光学系を用いることができない。この場合には、空間光変調器 30 と対物レンズ 60 とは互いに結像関係にはなく、合成焦点距離 f_{result} は下記（１０）式で表される。ここで、 L は、空間光変調器 30 と対物レンズ 60 との間の光路長である。M は、凹凸レンズで構成される縮小光学系を用いた場合の倍率である。実際の集光位置は下記（１１）式で表される。これら（１）式および（１１）式から補正用ホログラムが作成され、上記（８）式または（９）式に従って、空間光変調器 30 に呈示されるべきホログラム ϕ_{result} が作成される。

20

【 0 0 4 7 】

【 数 10 】

$$1/f_{result} = 1/f_{object} + M^2/f_{FLP} - M \cdot \Delta / (f_{object} \cdot f_{FLP}) \quad \dots (10)$$

30

【 0 0 4 8 】

【 数 11 】

$$f_{object} + \delta = f_{object} + M \cdot f_{object}^2 / (M \cdot \Delta - f_{FLP} - M \cdot f_{object}) \quad \dots (11)$$

【 0 0 4 9 】

次に、より好適な補正用ホログラム ϕ_{A_SACP} 、 ϕ_{B_SACP} 、 ϕ_{SACP} の作成方法について説明する。図 6 は、補正用ホログラムの作成方法を説明する図である。同図では、補正をしなかった場合のレーザ光の集光位置が対象物 9 の表面にあるときを基準として、対物レンズ 60 と対象物 9 とが互いに距離 d だけ近くなっている。対象物 9 の外部に集光位置が存在し且つ補正をしなかった場合の集光位置 O に対し、対象物 9 の内部に集光位置が存在し且つ補正をした場合の集光位置 O' が距離 d' だけ異なっている。

40

【 0 0 5 0 】

対象物 9 の外部に集光位置が存在し且つ補正をしなかった場合に、対物レンズ 60 において光軸から距離 h だけ離れた光線の入射角が θ_1 である。また、対象物 9 の内部に集光位置が存在し且つ補正をした場合に、対物レンズ 60 において光軸から距離 h だけ離れた光線は、対象物 9 表面に対し入射角 θ_2 で入射し、対象物 9 表面において屈折角 θ_1 で屈折する。この光線が対象物 9 表面に入射する際の光軸からの距離が h_1 である。

50

【 0 0 5 1 】

これらのパラメータの間に下記(12)式の関係がある。この(12)式から、 h_1 および h_2 は他のパラメータにより表される。また、対象物9の外部に集光位置が存在し且つ補正をしなかった場合の集光位置O'に対し、対象物9の内部に集光位置が存在し且つ補正をした場合の集光位置O'の光路長変化分OPDは、下記(13)式で表される。この(13)式で表される光路長変化分OPDに基づいて、補正用ホログラム A_SACP 、 B_SACP 、 $SACP$ が作成される。

【 0 0 5 2 】

【 数 1 2 】

$$h_1 = (d + \Delta) \cdot \tan \theta_1 \quad \cdots (12a)$$

$$h_2 = (f_{result} \cdot \cos \theta - d) \cdot \tan \theta_2 \quad \cdots (12b)$$

$$h = f_{result} \cdot \sin \theta \quad \cdots (12c)$$

$$h = h_1 + h_2 \quad \cdots (12d)$$

10

【 0 0 5 3 】

【 数 1 3 】

$$OPD = \frac{n \cdot (d + \Delta)}{\cos \theta_1} + \frac{(f_{result} \cdot \cos \theta - d)}{\cos \theta_2} - f_{result} - (n - 1) \cdot d \quad \cdots (13)$$

20

【 0 0 5 4 】

図7は、(6)式で表される波面収差E(h)と逆の波面とするものとして作成された補正用ホログラムにおける位相変調量分布を示す図である。また、図8は、(13)式で表される光路長変化分OPDに基づいて作成された補正用ホログラムにおける位相変調量分布を示す図である。何れの場合にも、 f_{result} が4mmであり、対象物9の屈折率nが1.48であり、NA(=sin)が0.8であり、(d+)が1.34mmである。図7では、dが0.9mmであり、 Δ が0.44mmである。図8では、dが0.81mmであり、 Δ が0.53mmである。

30

【 0 0 5 5 】

図7に示されるように、(6)式で表される波面収差E(h)と逆の波面とするものとして作成された補正用ホログラムでは、必要な位相変調量が大きくなり、空間光変調器30の分解能に対する要求が高い。これに対して、図8に示されるように、(13)式で表される光路長変化分OPDに基づいて作成された補正用ホログラムでは、必要な位相変調量が小さくて済むので、より正確な収差補正が可能となる。

【 0 0 5 6 】

上記(12)式および(13)式に現れる距離 Δ は以下のようにして決定される。すなわち、集光レンズの入射部に対応する空間光変調器上の任意の画素における位相変調量と、画素に隣接する画素における位相変調量との位相差が、空間光変調器が表現できる位相範囲以下であるようにする必要がある。具体的には、 $0 < \Delta < s$ の範囲で、対物レンズ60の入射部に対応する空間光変調器30上の任意の画素における位相変調量と、この画素に隣接する画素における位相変調量との位相差が、2以下となる対象物の移動量dおよび集光点シフト量 Δ を設定する。この場合、dおよび Δ の算出基準としては、補正波面のPV(peak to valley)値、RMS(Root Mean Square)値等がある。これによって、照射位置が、対象物9内部に発生する収差範囲(対象物の入射面からn×dより大きく、n×d+sより小さい範囲)の間に位置するように、対象物9の移動量dおよび集光点シフト量 Δ が設定される。なお、下記(14)式が満たされることが必要である。なお、

40

50

対物レンズ60に入射されるレーザ光の径を制限することにより実効的なレーザの入射サイズを減少させることが可能である。

【0057】

【数14】

$$0 < \Delta < \Delta_s \quad \dots (14)$$

【0058】

図9は、本実施形態に係るレーザ光照射方法の手順を示すフローチャートである。まず、波面補正をしていない状態で集光位置が対象物9の表面に設定され、この位置が原点に設定される。次に、対象物9の内部における集光位置（表面からの距離(d +)）が設定されて、集光用ホログラムが作成される。さらに、上記(14)式を満たすdおよびが決定される。このときにdおよびを決定する際の基準として、補正用ホログラムにおける位相変調量分布のPV値または前記画素に隣接する画素における位相変調量との位相差の変化量が用いられる。すなわち、 $0 < < s$ の範囲で隣接する画素間の位相差が空間光変調器の最大位相変調量以下となるd及びを設定する。

【0059】

そして、上記(13)式に基づいて補正用ホログラムが作成され、さらに、上記(8)式または(9)式に従ってホログラム $result$ が作成され、このホログラム $result$ が空間光変調器30に呈示される。対象物9が対物レンズ60の方向に距離dだけ移動され、レーザ光源10からのレーザ光出力が開始されて、対象物9内部の所定の集光位置にレーザ光が集光照射される。所要の照射時間が終了するとレーザ光源10からのレーザ光出力が停止される。他の集光位置がある場合には、対象物9の内部における集光位置（表面からの距離(d +)）の設定から、同様の処理が繰り返し行われる。尚、集光点の移動は対象物と対物レンズの相対位置を変化させれば良いので、対物レンズを移動させても良いし、対象物と対物レンズの双方を移動させても良い。

【0060】

次に、本実施形態に係るレーザ光照射装置およびレーザ光照射方法による集光状態を確認するために行った実験の結果について説明する。図10は、この確認実験で用いたレーザ光照射装置1Aの構成図である。この図10に示されるレーザ光照射装置1Aは、図1に示される構成に加えて、対物レンズ70および撮像部80を更に備える。対物レンズ70の光軸は対物レンズ60の光軸に対して直交している。撮像部80は、対物レンズ60による集光の状態を、対物レンズ70を介して撮像する。ここでは、対象物9としてアクリル板が用いられ、深さが異なる2つの位置にレーザ光が集光された。撮像部80による撮像結果が図11～図15に示されている。

【0061】

図11および図12は、深さが50 μ mだけ互いに異なる2つの位置にレーザ光が集光されたときの集光の様子を示す図である。図11は、球面収差補正が行われなかった場合の集光の様子を示す。図12は、上記(9)式により球面収差補正が行われた場合の集光の様子を示す。両図を比較して判るように、2つの集光位置それぞれにおいて、球面収差補正が行われることにより、光軸方向の集光領域の伸張が低減されている。

【0062】

図13～図15は、深さが200 μ mだけ互いに異なる2つの位置にレーザ光が集光されたときの集光の様子を示す図である。図13は、球面収差補正が行われなかった場合の集光の様子を示す。図14は、上記(9)式により球面収差補正が行われた場合の集光の様子を示す。図15は、上記(8)式により球面収差補正が行われた場合の集光の様子を示す。これらの図を比較して判るように、2つの集光位置それぞれにおいて、球面収差補正が行われることにより、光軸方向の集光領域の伸張が低減されている。特に、上記(8)式により球面収差補正が行われた場合には、光軸方向の集光領域の伸張が十分に低減されている。

【0063】

10

20

30

40

50

このように、合成焦点距離 f_{result} が考慮された上で、波面収差補正のための補正用ホログラム A_SACP 、 B_SACP （または、 $SACP$ ）が用いられることにより、良好な集光点形状が実現されている。このような良好な集光点形状を用いて加工を行うことで、問題となっていた光量や加工形状の問題が解決され、多点加工により加工時間の短縮化が可能となる。

【0064】

次に、本実施形態に係るレーザ光照射装置およびレーザ光照射方法による集光状態を確認するために行った他の実験の結果について説明する。図16は、この確認実験で用いたレーザ光照射装置2の構成図である。この図に示されるレーザ光照射装置2は、レーザ光源10、スペイシャルフィルタ110、コリメータレンズ120、収差板130、レンズ141、レンズ142、空間光変調器30、レンズ151、レンズ152、フーリエ変換レンズ160および撮像部170を備える。なお、収差板130は、光路上に挿入・取外しが自在であり、収差量が既知であり、球面収差や非点収差、コマ収差などの様々な収差が含まれている。

10

【0065】

このレーザ光照射装置2では、レーザ光源10から出力されたレーザ光は、スペイシャルフィルタ110を経た後、コリメータレンズ120によりコリメートされ、レンズ141およびレンズ142からなる結像光学系を経て、空間光変調器30に入力される。空間光変調器30に入力されたレーザ光は、その空間光変調器30の複数の画素それぞれにおいて位相変調され、レンズ151およびレンズ152からなる結像光学系を経て、フーリエ変換レンズ160により集光されて、撮像部170の撮像面に到達する。撮像部170による撮像結果が図17～図19に示されている。

20

【0066】

空間光変調器30に呈示される集光用ホログラム A 、 B として、離散的な集光点の集合として“HPK”なる文字列を表すホログラムが用意された。集光用ホログラム A 、 B それぞれによるレーザ光の集光範囲は互いに異なる。光路上に収差板130がない状態とされ、下記(15)式により、これら集光用ホログラム A 、 B が位相化法により合成されたホログラム 1 が作成され、このホログラム 1 が空間光変調器30に呈示された。図17は、このときに撮像部により撮像された集光の様子を示す図である。この図に示されるように、光路上に収差板130がない状態では、集光用ホログラム A 、 B それぞれによる“HPK”なる文字列を表す各集光点が鮮明に得られた。しかし、光路上に収差板130が挿入された状態では、集光用ホログラム A 、 B それぞれによる“HPK”なる文字列を表す各集光点は不鮮明であった。

30

【0067】

【数15】

$$\exp(\phi_1) = K_A \cdot \exp(\phi_A) + K_B \cdot \exp(\phi_B) \quad \dots (15)$$

【0068】

続いて、下記(16)式によりホログラム 2 が作成された。すなわち、集光用ホログラム A に対してのみ補正用ホログラム A_SACP が重畳された。このホログラム 2 が空間光変調器30に呈示された。図18は、このときに光路上に収差板130があるときに撮像部により撮像された集光の様子を示す。この図に示されるように、光路上に収差板130がある状態では、集光用ホログラム A による“HPK”なる文字列を表す各集光点は鮮明に得られたが、集光用ホログラム B による“HPK”なる文字列を表す各集光点は不鮮明であった。一方、図19は、このときに光路上に収差板130がないときに撮像部により撮像された集光の様子を示す。この図に示されるように、光路上に収差板130がない状態では、集光用ホログラム B による“HPK”なる文字列を表す各集光点は鮮明に得られたが、集光用ホログラム A による“HPK”なる文字列を表す各集光点は不鮮明であった。

40

【0069】

50

【数 1 6】

$$\exp(\phi_2) = K_A \cdot \exp(\phi_A + \phi_{A_SACP}) + K_B \cdot \exp(\phi_B) \quad \dots (16)$$

【0070】

以上の結果からも、本実施形態に係るレーザ光照射装置およびレーザ光照射方法では、収差補正用ホログラムがそれぞれ独立に作用していることがわかる。

【図面の簡単な説明】

【0071】

【図1】本実施形態に係るレーザ光照射装置1の構成図である。

【図2】対象物9の内部の2つの集光位置A, Bにレーザ光が集光される様子を示す図である。 10

【図3】フレネルレンズパターンにおける位相変調分布を示す図である。

【図4】対象物9の内部においてレーザ光が集光される様子を示す図である。

【図5】対象物9の内部においてレーザ光が集光される様子を示す図である。

【図6】補正用ホログラムの作成方法を説明する図である。

【図7】(6)式で表される波面収差E(h)と逆の波面とするものとして作成された補正用ホログラムにおける位相変調量分布を示す図である。

【図8】(13)式で表される光路長変化分OPDに基づいて作成された補正用ホログラムにおける位相変調量分布を示す図である。

【図9】本実施形態に係るレーザ光照射方法の手順を示すフローチャートである。 20

【図10】レーザ光照射装置1Aの構成図である。

【図11】レーザ光照射装置1Aを用いた確認実験の結果を示す図である。

【図12】レーザ光照射装置1Aを用いた確認実験の結果を示す図である。

【図13】レーザ光照射装置1Aを用いた確認実験の結果を示す図である。

【図14】レーザ光照射装置1Aを用いた確認実験の結果を示す図である。

【図15】レーザ光照射装置1Aを用いた確認実験の結果を示す図である。

【図16】レーザ光照射装置2の構成図である。

【図17】レーザ光照射装置2を用いた確認実験の結果を示す図である。

【図18】レーザ光照射装置2を用いた確認実験の結果を示す図である。

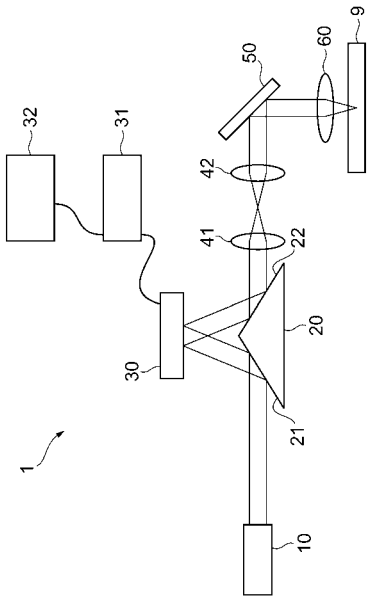
【図19】レーザ光照射装置2を用いた確認実験の結果を示す図である。 30

【符号の説明】

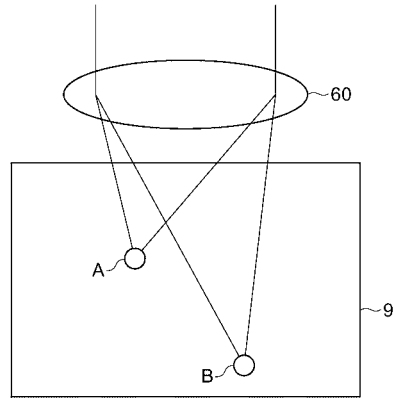
【0072】

1, 1A...レーザ光照射装置、9...対象物、10...レーザ光源、20...プリズム、30...空間光変調器、31...駆動部、32...制御部、41, 42...レンズ、50...ミラー、60...対物レンズ(集光光学系)、70...対物レンズ、80...撮像部。

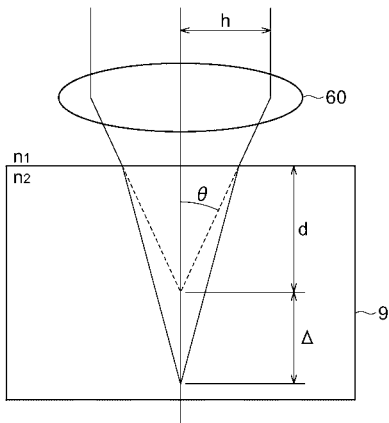
【 図 1 】



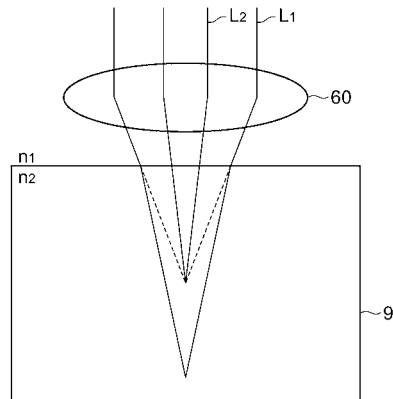
【 図 2 】



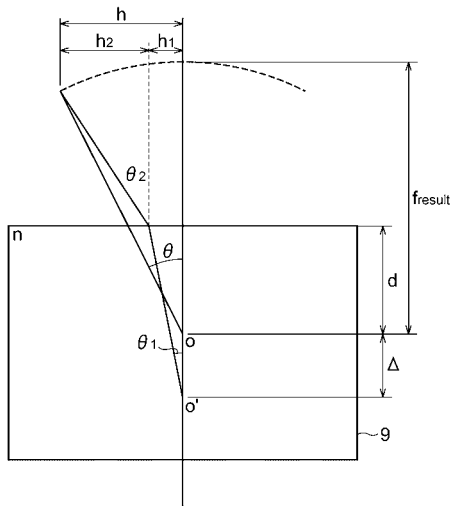
【 図 4 】



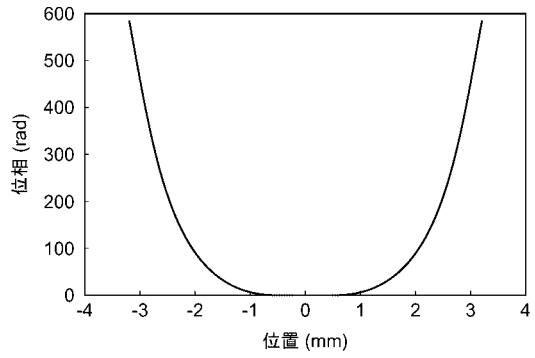
【 図 5 】



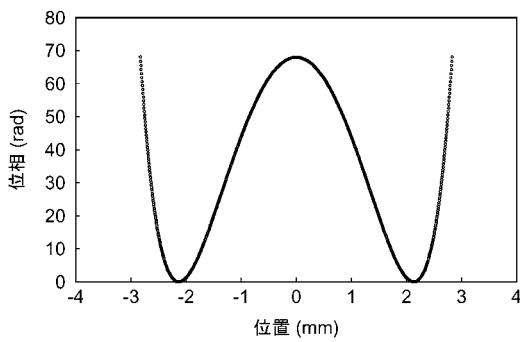
【 図 6 】



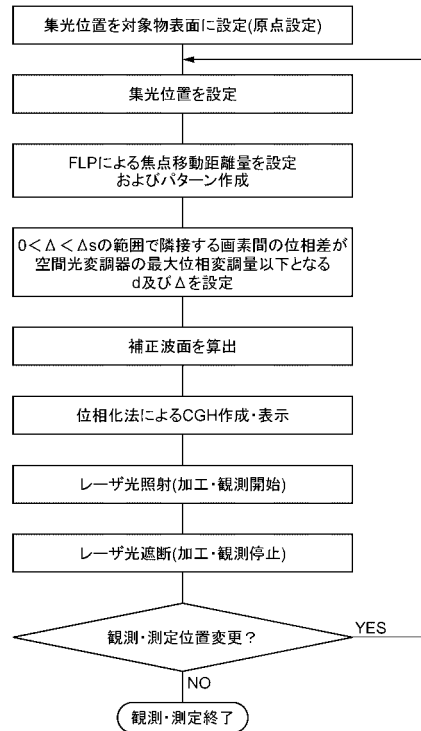
【 図 7 】



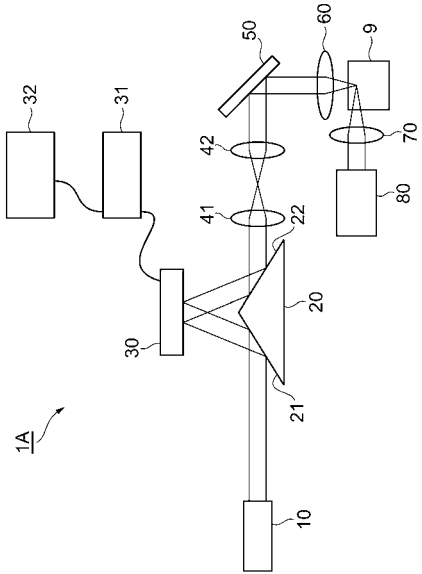
【 図 8 】



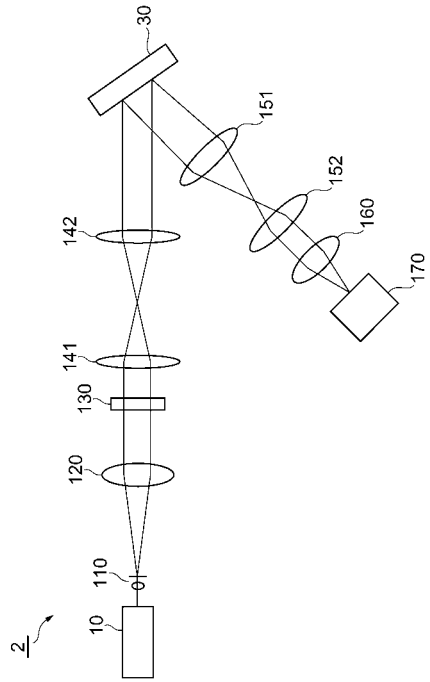
【 図 9 】



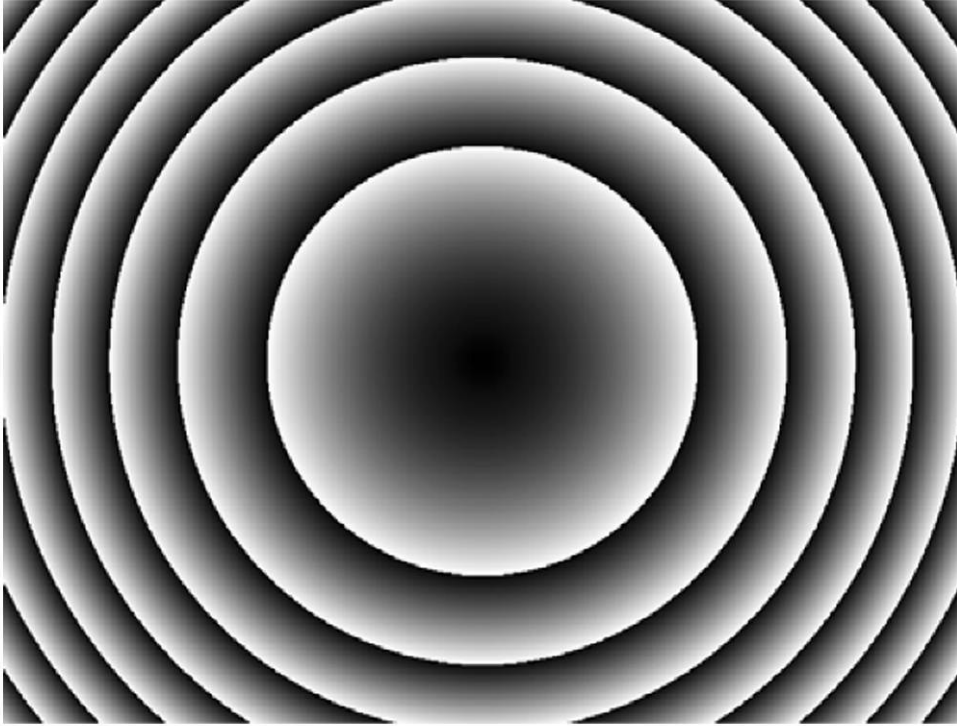
【図 10】



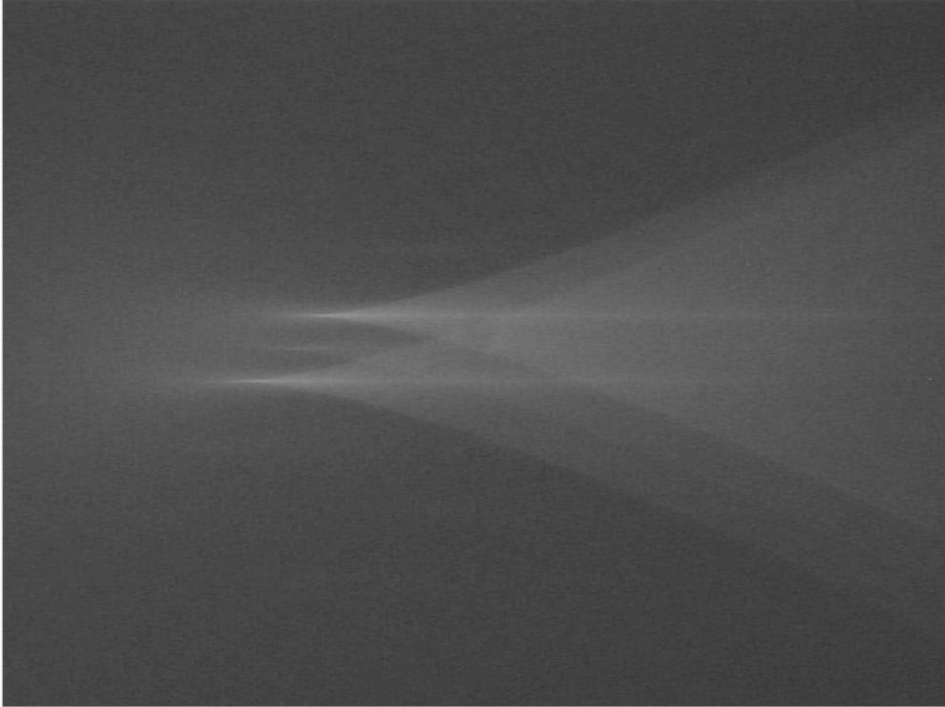
【図 16】



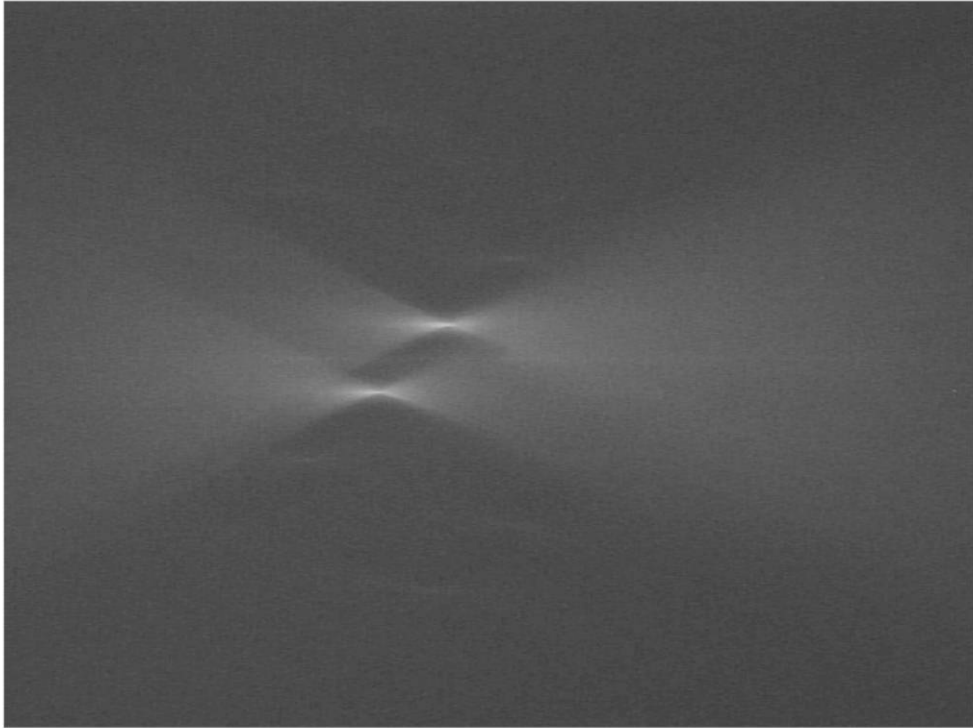
【 図 3 】



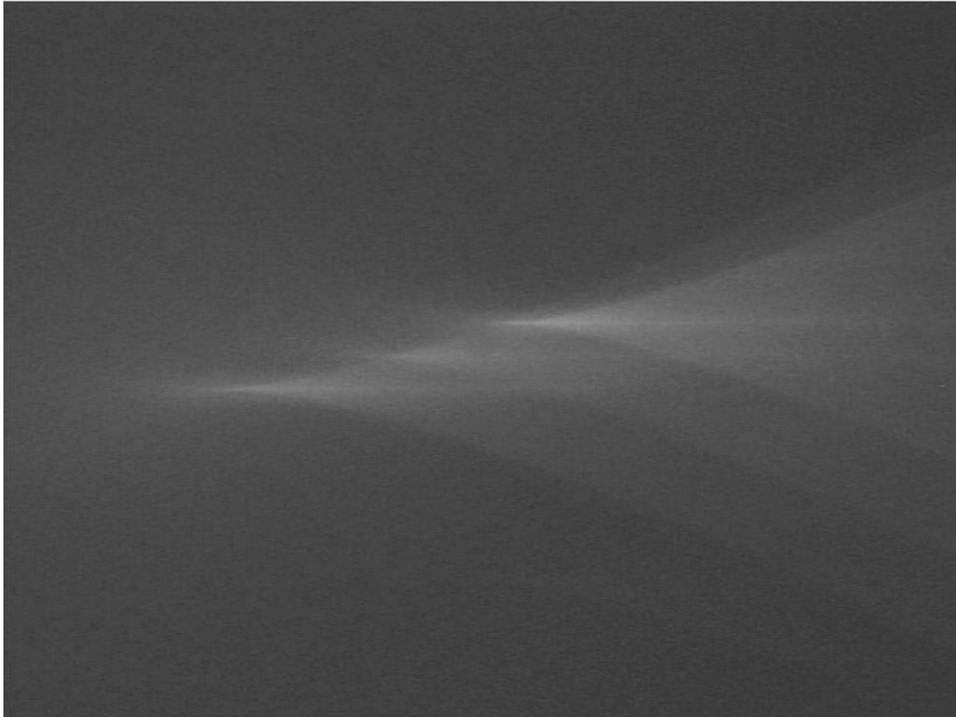
【 図 1 1 】



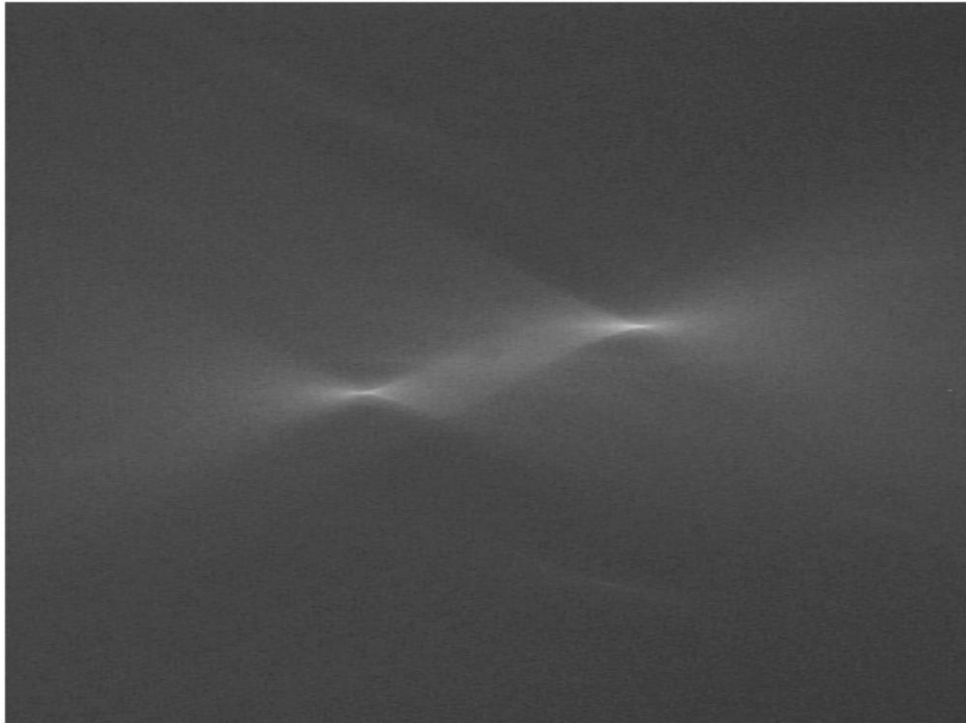
【 図 1 2 】



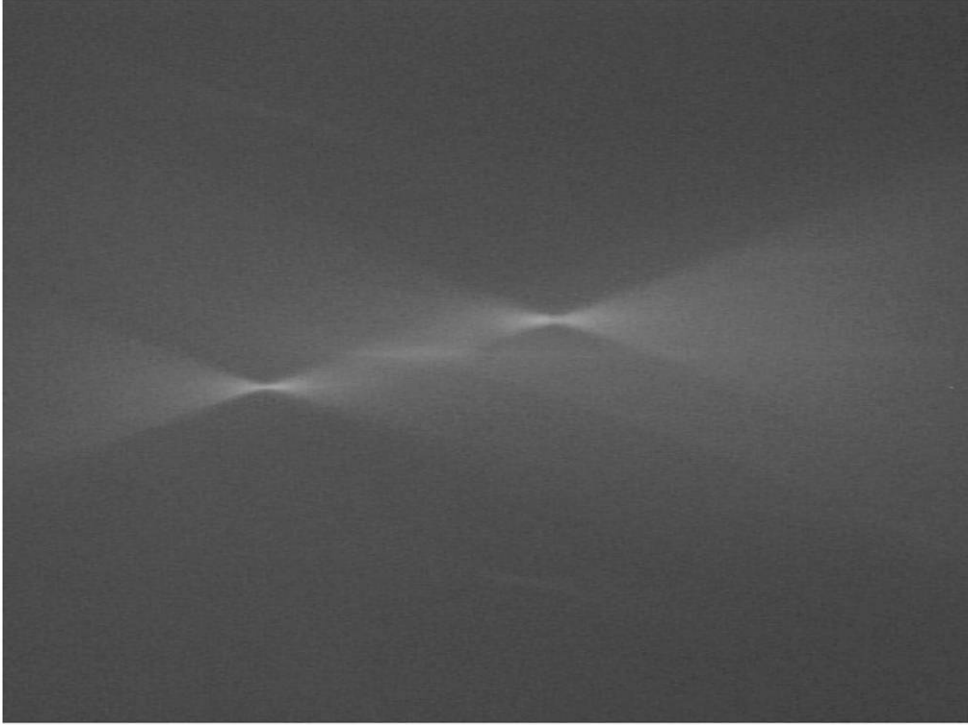
【 図 1 3 】



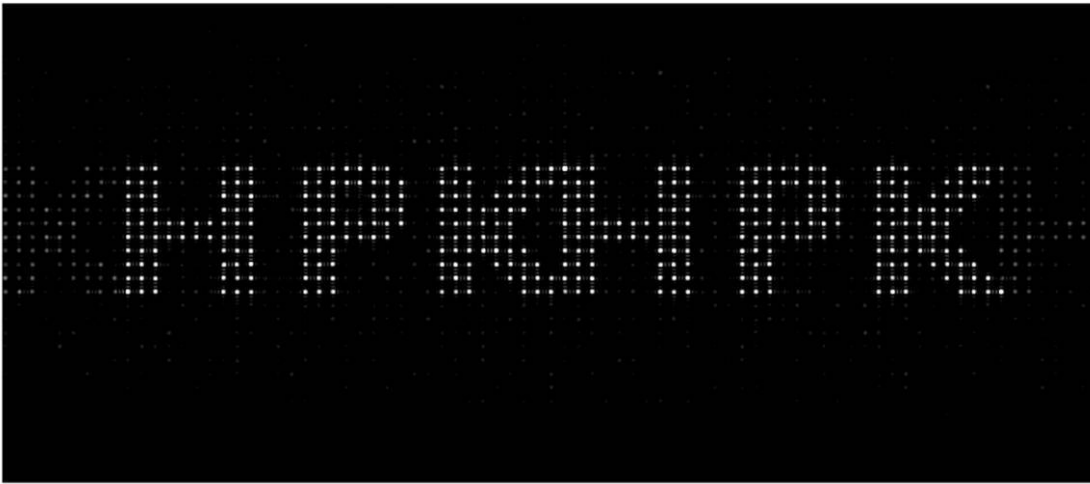
【 図 1 4 】



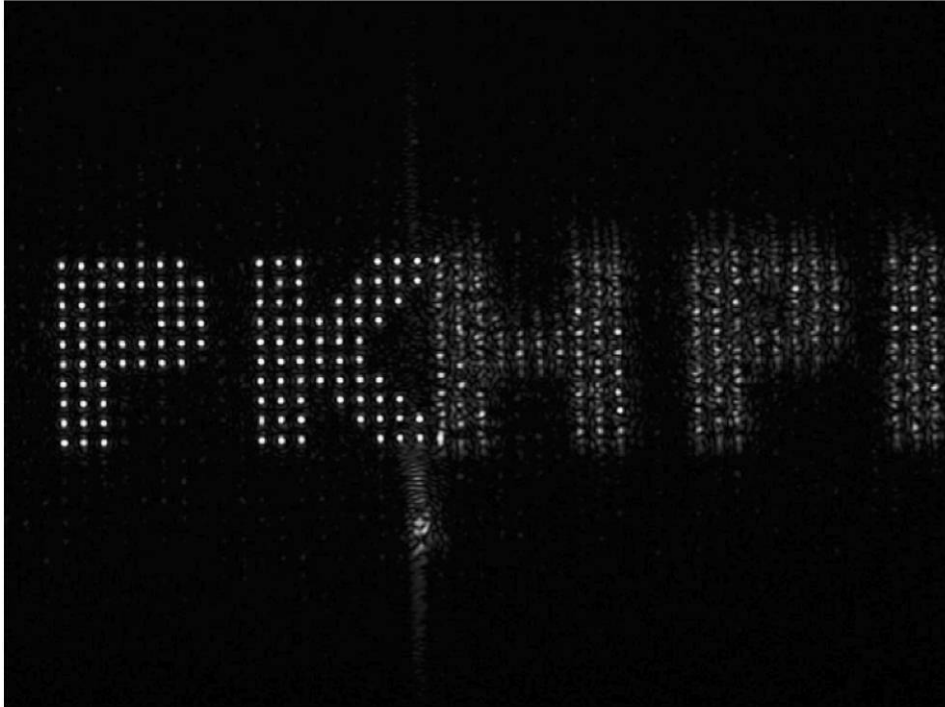
【 図 1 5 】



【 図 17 】



【 図 1 8 】



【 図 1 9 】



フロントページの続き

(72)発明者 井上 卓

静岡県浜松市東区市野町 1 1 2 6 番地の 1 浜松ホトニクス株式会社内

(72)発明者 伊藤 晴康

静岡県浜松市東区市野町 1 1 2 6 番地の 1 浜松ホトニクス株式会社内

Fターム(参考) 4E068 CD04 CD05 CD08 CD09