(19) **Bundesrepublik Deutschland**
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 696 28 957 T2** 2004.05.27

(12) # Übersetzung der europäischen Patentschrift

(97) **EP 0 725 307 B1**
(21) Deutsches Aktenzeichen: **696 28 957.1**
(96) Europäisches Aktenzeichen: **96 100 348.0**
(96) Europäischer Anmeldetag: **11.01.1996**
(97) Erstveröffentlichung durch das EPA: **07.08.1996**
(97) Veröffentlichungstag der Patenterteilung beim EPA: **09.07.2003**
(47) Veröffentlichungstag im Patentblatt: **27.05.2004**

(51) Int Cl.[7]: **G02F 1/37**
G02B 5/00

(30) Unionspriorität:

1463695	**31.01.1995**	**JP**
19218495	**27.07.1995**	**JP**

(84) Benannte Vertragsstaaten:
DE, FR, GB

(73) Patentinhaber:
Oki Electric Industry Co., Ltd., Tokio/Tokyo, JP

(74) Vertreter:
Betten & Resch, 80333 München

(72) Erfinder:
Shinozaki, Keisuke, Minato-ku, Tokyo, JP; Xu, Chang-Qing, Minato-ku, Tokyo, JP; Sasaki, Hironori, Minato-ku, Tokyo, JP

(54) Bezeichnung: **Wellenlangenumwandlungsvorrichtung mit einem nichgebeugten Strahl**

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach der Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents kann jedermann beim Europäischen Patentamt gegen das erteilte europäische Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch ist schriftlich einzureichen und zu begründen. Er gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist (Art. 99 (1) Europäisches Patentübereinkommen).

Die Übersetzung ist gemäß Artikel II § 3 Abs. 1 IntPatÜG 1991 vom Patentinhaber eingereicht worden. Sie wurde vom Deutschen Patent- und Markenamt inhaltlich nicht geprüft.

Beschreibung

HINTERGRUND DER ERFINDUNG

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft eine Vorrichtung wie in Patentanspruch 1 angegeben.
[0002] Kristalle aus nichtlinearen optischen Materialien wie z. B. Lithiumniobat ($LiNbO_3$) sind dafür bekannt, kohärentes Licht ϕmit einer Wellenlänge in Licht mit einer anderen Wellenlänge wie z. B. die Wellenlänge der zweiten Harmonischen umzuwandeln. Auf diese Weise kann von einem Halbleiterlaser ausgestrahltes Infrarotlicht in blaues Licht umgewandelt werden. Diese Fähigkeit hat wichtige Folgerungen für optische Informationsspeicherung, da die kürzere Wellenlänge von blauem Licht die Speicherdichte vergrößert, und für Laserdruck, bei dem die kürzere Wellenlänge höhere Punktauflösung ergibt.
[0003] Einfach einen nichtlinearen optischen Volumenkristall in den Weg eines kohärenten Strahls zu setzen, führt jedoch nicht zu wirkungsvoller Wellenlängenumwandlung. Der Umwandlungswirkungsgrad hängt von der Strecke, die der Strahl im Kristall zurücklegt (je länger, desto besser), und der Strahlintensität (je höher, desto besser) ab. Selbst wenn kohärentes Licht auf einen kleinen, intensiven Strahlfleck fokussiert wird, wenn es in einen Kristall eintritt, bewirkt Beugung, dass sich der Strahl innerhalb des Kristalls schnell verbreitert, so dass die für wirkungsvolle Umwandlung nötige hohe Intensität keine nennenswerte Strecke weit aufrechterhalten werden kann.
[0004] Die übliche Lösung für dieses Problem war, einen Wellenleiter im nichtlinearen optischen Kristall herzustellen. Während er sich durch den Wellenleiter hindurch fortpflanzt, behält der kohärente Strahl eine im wesentlichen konstante Intensität bei, ohne sich zu verbreitern, und es wird eine sehr wirkungsvolle Umwandlung möglich. Es wurden zahlreiche Wellenlängen-Umwandlungsvorrichtungen von diesem Typ beschrieben. Außer einem Wellenleiter haben diese Vorrichtungen häufig einen periodischen Domäneninversionsaufbau, um die Phasenfehlanpassung zu korrigieren, die bei fortschreitender Wellenlängenumwandlung auftritt. Ein weiteres gewöhnliches Merkmal ist ein reflektierender Aufbau, der einen Teil des einfallenden Lichts als optische Rückführung zum Halbleiterlaser zurückschickt, um die Laserwellenlänge zu steuern.
[0005] Wellenlängen-Umwandlungsvorrichtungen vom Wellenleitertyp sind jedoch schwierig herzustellen, wegen der präzisen Positionsausrichtung, die nötig ist, um den Laserstrahl in den Wellenleiter einzukoppeln.
[0006] Aus der US 5,355,246 bekannt ist eine Laserstrahl-Wellenlängen-Umwandlungsvorrichtung mit einer Divergenzeinrichtung zum Umwandeln eines Laserstrahls in einen divergenten Laserstrahl mit einer ringförmigen Wellenfront, einer Konvergenzeinrichtung zum Umwandeln des divergenten Laserlichtstrahls, einer Einstelleinrichtung zum Einstellen des Abstands zwischen der Divergenz- und der Konvergenzeinrichtung, und einem nichtlinearen optischen Medium, das den sich umwandelnden Laserlichtstrahl empfängt, so dass der Strahl darin konvergieren gelassen wird, und zur Durchführung einer Wellenlängenumwandlung.
[0007] Aus der US 4,630,274 ist eine Vorrichtung zur Erzeugung von kurzen Impulsen von Ultraviolett-Laserlichtstrahlen bekannt, die ein oder zwei Axikone als fokussierende optische Elemente für den Ultraviolett- oder Röntgenstrahl enthält.
[0008] Aus "Japanese Journal of Applied Physics 1191 Nr. 8, Seiten 1378–1379" ist "Erzeugung eines beugungsfreien Laserstrahls unter Verwendung einer speziellen Fresnel-Zonenplatte" bekannt. Darin wurde unter Verwendung einer speziellen Fresnel-Zonenplatte und einer geeigneten Konvexlinse ein beugungsfreier Lichtstrahl mit hohem Wirkungsgrad erzeugt. Das beugungsfreie Laserlicht strahlt einen nadelförmigen Strahl aus, der erwartungsgemäß für Laserbearbeitung ideal ist. Im praktischen Gebrauch von solchen beugungsfreiem Licht ist ein Erzeugungsverfahren mit hohem Wirkungsgrad wichtig. Es wird ein neues Verfahren vorgeschlagen, bei dem eine spezielle Fresnel-Zonenplatte und eine geeignete Konvexlinse verwendet werden, um aus einem Strahl in Form einer breiten Säule wirkungsvoll einen beugungsfreien Strahl zu erzeugen.

KURZE DARSTELLUNG DER ERFINDUNG

[0009] Dementsprechend ist es eine Aufgabe der vorliegenden Erfindung, wirkungsvolle Wellenlängenumwandlung ohne die Notwendigkeit für präzise Positionsausrichtung zu erreichen.
[0010] Eine weitere Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es, als optisches Ausgangslicht im Anschluss an Wellenlängenumwandlung einen parallelen Strahl mit kleinem Durchmesser zu erhalten.
[0011] Die vorliegende Erfindung schlägt eine Vorrichtung zur Wellenlängenumwandlung eines kohärenten Lichtstrahls, wie in Patentanspruch 2 angegeben, und einen Generator für einen nichtgebeugten Strahl, wie in Patentanspruch 1 angegeben, vor.
[0012] Das erfundene Wellenlängen-Umwandlungsverfahren und die erfundene Vorrichtung verwenden einen Strahl von nichtgebeugten Typ, wie in Patentanspruch 1 angegeben. Das erfundene Verfahren umfasst die Schritte, einen nichtgebeugten Strahl, wie in Patentanspruch 1 angegeben, aus dem Ausgangslicht eines Halbleiterlasers zu erzeugen und den nichtgebeugten Strahl in ein nichtlineares optisches Volumenelement zu richten. Die Vorrichtung umfasst einen Generator für einen nichtgebeugten Strahl und das nichtlineare optische

Volumenelement. Ein nichtgebeugter Strahl pflanzt sich natürlich fort, ohne sich zu verbreitern, so dass kein Wellenleiter in dem nichtlinearen optischen Element erforderlich ist, und präzise Positionsausrichtung des nichtgebeugten Strahls ist unnötig.

[0013] Der Generator für einen nichtgebeugten Strahl hat vorzugsweise Merkmale, die für verbesserte Wellenlängenumwandlung des von einem Halbleiterlaser ausgestrahlten Lichts geeignet sind. Diese Merkmale umfassen die Folgenden:

einen wellenlängenabhängigen reflektierenden Aufbau zum Zurückschicken eines Teils des Laserlichts zum Halbleiterlaser, für Wellenlängensteuerung;

einen Phasenschieber zum Verschieben der Phase eines Teils des Laserlichts, um einen Phasenanpassungsfehler im nichtlinearen optischen Element zu kompensieren;

ein erstes optisches System zum Fokussieren des von dem Laser ausgestrahlten Lichts zu einem kleinen, ringförmigen Bild; und

ein zweites optisches System zum Erzeugen eines nichtgebeugten Strahls mit einer Länge gleich der Dicke des nichtlinearen optischen Elements aus dem ringförmigen Bild.

[0014] Insbesondere wenn die Länge des nichtgebeugten Strahls zu der Dicke des nichtlinearen optischen Elements passt, wird das umgewandelte Licht in Form eines divergenten rohrförmigen Strahls erhalten. Die erfundene Vorrichtung umfasst vorzugsweise außerdem ein optisches System zum Parallelrichten dieses divergenten rohrförmigen Strahls, Fokussieren des resultierenden rohrförmigen parallelen Strahls zu einem überaufgelösten Fleck und Bündeln des Lichts von dem überaufgelösten Fleck, um einen parallelen Ausgangsstrahl mit kleinem Durchmesser zu erzeugen.

KURZE BESCHREIBUNG DER ZEICHNUNGEN

[0015] **Fig.** 1 veranschaulicht den Aufbau eines ersten Ausführungsbeispiels, das nicht in den Schutzbereich der Patentansprüche fällt.

[0016] **Fig.** 2 veranschaulicht den Aufbau einer Abwandlung der ersten Ausführungsform.

[0017] **Fig.** 3 veranschaulicht den Aufbau eines zweiten Ausführungsbeispiels, das nicht in den Schutzbereich der Patentansprüche fällt.

[0018] **Fig.** 4 veranschaulicht den Aufbau eines dritten Ausführungsbeispiels, das nicht in den Schutzbereich der Patentansprüche fällt.

[0019] **Fig.** 5 veranschaulicht die Form des Phasenschiebers in der dritten Ausführungsform.

[0020] **Fig.** 6 veranschaulicht eine alternative Form des Phasenschiebers in der dritten Ausführungsform.

[0021] **Fig.** 7 veranschaulicht das allgemeine Schema der Ausführungsformen vier bis acht.

[0022] **Fig.** 8 veranschaulicht den Aufbau der Erfindung.

[0023] **Fig.** 9 veranschaulicht die Form der Toroidlinsen in der ersten Ausführungsform der Erfindung.

[0024] **Fig.** 10 veranschaulicht den Aufbau der zweiten Ausführungsform der Erfindung.

[0025] **Fig.** 11 veranschaulicht eine Abwandlung der zweiten Ausführungsform.

[0026] **Fig.** 12 veranschaulicht den Aufbau der dritten Ausführungsform.

[0027] **Fig.** 13 veranschaulicht Parameter in Bezug auf eine Zonenplatte in der dritten Ausführungsform.

[0028] **Fig.** 14 veranschaulicht den Aufbau der Ausführungsformen vier und fünf.

[0029] **Fig.** 15 veranschaulicht den Aufbau einer sechsten Ausführungsform.

[0030] **Fig.** 16 veranschaulicht einen Teil des Aufbaus einer Ausführungsform.

DETAILLIERTE BESCHREIBUNG DER ERFINDUNG

[0031] Unter Bezugnahme auf die beigefügten Beispielszeichnungen werden nun Ausführungsformen beschrieben. Die Zeichnungen sind schematisch, und sie sind nicht so aufzufassen, dass sie die Formen, Größen und Positionsbezichungen der Bestandteile genau darstellen oder den Schutzbereich der Erfindung beschränken.

Erstes Ausführungsbeispiel

[0032] Das erste Ausführungsbeispiel ist in **Fig.** 1 gezeigt. Das Bezugszeichen **6** kennzeichnet die optische Achse. Das Bezugszeichen **8** kennzeichnet einen Strahl kohärentes Licht, das von einem Halbleiterlaser ausgestrahlt und zum Beispiel durch eine Konvexlinse gebündelt wurde, um sich parallel zu der optischen Achse **6** fortzupflanzen. Um die Zeichnungen zu vereinfachen, wurden der Halbleiterlaser und die Konvexlinse weggelassen.

[0033] Das in der ersten Ausführungsform verwendete nichtlineare optische Element **10** ist ein mehrschichtiger Volumenkristall zum Beispiel aus $LiNbO_3$, der einen periodischen Domäneninversionsaufbau hat. Der periodische Domäneninversionsaufbau umfasst Domänen **12** mit abwechselnd umgekehrten natürlichen Polari-

sationsrichtungen, wie in der Zeichnung durch kurze Pfeile angezeigt. All diese Domänen **12** haben die gleiche Dicke. Die Domänen **12** werden durch sukzessive Abscheidung von Dünnfilmen ausgebildet.

[0034] Der Generator für einen nichtgebeugten Strahl in der ersten Ausführungsform ist eine Axikonlinse **14**, die eine ebene Oberfläche **16** senkrecht zur optischen Achse **6** hat. Das kohärente Licht **8** wird auf dieser Oberfläche **16** empfangen. Die entgegengesetzte Seite der Axikonlinse **14** hat die Form eines Kreiskegels, dessen Spitze auf der optischen Achse **6** liegt. Das kohärente Licht **8** wird an dieser kegelförmigen Oberfläche unter einem einheitlichen Winkel θ zur optischen Achse **6** hin gebrochen, welcher Winkel durch die folgende Gleichung mit dem Brechungsindex n und dem Spitzenwinkel Θ der Axikonlinse **14** verknüpft ist.

$$\theta = \Theta - \cos^{-1}(n\cos\Theta)$$

[0035] In der Ebene des Zeichnungsblatts besteht das auf die optische Achse **6** gerichtete Licht aus zwei sich kreuzenden ebenen Wellen mit Wellenvektoren k_1 und k_2. Wenn λ die Wellenlänge des kohärenten Licht **8** ist, können diese Wellenvektoren wie folgt ausgedrückt werden.

$$k_1 = (2\Pi/\lambda)(\cos\theta, \sin\theta)$$

$$k_2 = (2\Pi/\lambda)(\cos\theta, -\sin\theta)$$

[0036] Interferenz zwischen diesen zwei ebenen Wellen und zwischen ähnlichen Paaren von Wellen in allen anderen Ebenen, die die optische Achse **6** enthalten, erzeugt einen nichtgebeugten Strahl **18**, in der Zeichnung durch eine gestrichelte Linie angezeigt, in der unmittelbaren Nähe der optischen Achse **6**. Der Durchmesser des nichtgebeugten Strahls **18** ist vergleichbar mit λ, der Wellenlänge des kohärenten Lichts **8**, welche Wellenlänge für einen im nahem Infrarot ausstrahlenden Halbleiterlaser ungefähr ein Mikrometer (1 μm) ist. Genauer ist der Durchmesser des Airy-Scheibchens des nichtgebeugten Strahls **18**, in dem der größte Teil der Strahlenergie konzentriert ist, vergleichbar mit diesem Wert. Der Strahldurchmesser bleibt über die gesamte Länge des nichtgebeugten Strahls **18** im wesentlichen unverändert.

[0037] Wenn konstante Terme weggelassen werden, nähert sich das elektrische Feld des nichtgebeugten Strahls **18** dem Feld an, das durch die folgende Gleichung gegeben ist, die einen idealen nichtgebeugten Strahl beschreibt.

$$E(x, y, z, t) = \exp[i[(\beta z - \omega t)]J_0(\alpha\rho)$$

[0038] Der Ursprung des in dieser Gleichung verwendeten Koordinatensystems liegt an der Spitze der Axikonlinse **14**. Die positive z-Achse erstreckt sich entlang der optischen Achse **6** nach rechts. Der Abstand von der z-Achse oder optischen Achse **6** ist mit ρ bezeichnet, so dass $\rho = (x^2 + y^2)^{1/2}$. Die Winkelfrequenz des nichtgebeugten Strahls **18** ist ω, und α und β sind Konstanten, so dass $\alpha^2 + \beta^2 = (\omega/c)^2$, worin c die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum ist.

[0039] Der Amplitudenterm in dieser Gleichung ist $J_0(\alpha\rho)$, was die Besselfunktion nullter Ordnung von ersten Typ ist. Die Amplitude hängt nur vom Abstand ρ von der optischen Achse **6** und nicht von der Position z auf der optischen Achse **6** ab, was anzeigt, dass sich der Strahl nicht verbreitert. Der Parameter α ist proportional zum Strahldurchmesser. Der nichtgebeugte Strahl **18** wird auch als beugungsfreier Strahl oder Bessel-Strahl bezeichnet.

[0040] Der Parameter β ist gleich kcosθ, worin k die zu Licht mit der Wellenlänge λ gehörende Wellenzahl ist. Die Phase des nichtgebeugten Strahls **18** ist durch die folgende Gleichung gegeben.

$$E(z, t) = \exp[i(\omega t - kz\cos\theta)]$$

[0041] Diese Phasengleichung ist dieselbe wie für eine gewöhnliche ebene Welle, außer dass die Phasengeschwindigkeit gleich ω/(kzcosθ) ist. Der nichtgebeugte Strahl **18** ist somit angenähert eine ebene Welle mit Phasengeschwindigkeit ω/(kzcosθ), die sich ohne Verbreiterung fortpflanzt.

[0042] Wenn der nichtgebeugte Strahl **18** durch das nichtlineare optische Element **10** läuft, wird seine Wellenlänge durch das bekannte Phänomen der Erzeugung der zweiten Harmonischen (SHG) allmählich von λ in λ/2 umgewandelt. Der periodische Domäneninversionsaufbau soll den Verlust an Phasenkohärenz kompensieren, der aus den unterschiedlichen Geschwindigkeiten resultiert, mit denen sich Licht mit diesen unterschiedlichen Wellenlängen λ und λ/2 im nichtlinearen optischen Element **10** fortpflanzt. Diese Kompensation wird als Quasi-Phasenanpassung (QPM) bezeichnet, und das nichtlineare optische Element **10** wird gewöhnlich als QPM-SHG-Element bezeichnet. In der vorliegenden Ausführungsform können SHG und QPM wie folgt mathematisch analysiert werden.

[0043] Der Realteil des elektrischen Feldes des nichtgebeugten Strahls **18** im nichtlinearen optischen Ele-

ment **10** kann in der folgenden Form ausgedrückt werden, worin E ein Amplitudenterm ist, der nur vom Abstand von der z-Achse abhängt, und k_f die Wellenzahl von Licht mit der Grundwellenlänge λ ist, das sich parallel zur optischen Achse **6** fortpflanzt.

$$E(z, t) = E\cos(\omega t - k_f z\cos\theta)$$

[0044] Das elektrische Feld des im nichtlinearen optischen Element **10** erzeugten Lichts der zweiten Harmonischen hat den folgenden Ausdruck, in dem ω_{sh} und k_{sh} die Winkelfrequenz bzw. die Wellenzahl von Licht mit der Wellenlänge λ/2 der zweiten Harmonischen ist, das sich parallel zur optischen Achse **6** fortpflanzt, und E_{sh} die Amplitude der zweiten Harmonischen ist.

$$E_{sh}(z) = E_{sh}\cos(\omega_{sh} t - k_{sh} z\cos\theta)$$

[0045] Die zwei Wellenzahlen k_f und k_{sh} sind durch die folgenden Gleichungen gegeben, in denen n_f und n_{sh} die Brechungsindizes des nichtlinearen optischen Elements **10** in Bezug auf Licht mit den Wellenlängen λ bzw. λ/2 sind, das sich parallel zur optischen Achse fortpflanzt.

$$k_f = 2\Pi n_f/\lambda$$

$$k_{sh} = 2\Pi n_{sh}/(\lambda/2)$$

[0046] Die durch ein elektrisches Feld E induzierte elektrische Polarisation P wird durch die folgende Gleichung ausgedrückt, in der x_1, x_2, x_3, ... die elektrischen Suszeptibilitäten erster Ordnung, zweiter Ordnung, dritter Ordnung, ... sind.

$$P = X_1 E + X_2 EE + X_3 EEE + ...$$

[0047] Da $k_{sh} = 2k_f$, kann die nichtlineare Polarisation zweiter Ordnung P_{sh} wie folgt geschrieben werden.

$$P_{sh} = (1/2)X_2 E^2\cos(\omega_{sh} t - 2k_f z\cos\theta)$$

[0048] Die nichtlineare optische Wechselwirkung kann analysiert werden, indem diese nichtlineare Polarisation zweiter Ordnung für die interessierende Frequenz (in diesem Fall ω_{sh}) als die treibende Komponente der folgenden Wellengleichung aufgelöst wird.

$$\nabla \times \nabla \times E + \frac{\partial}{\partial t}(\mu_0 E) + \mu_0 \epsilon \frac{\partial^2}{\partial t^2} E = -\mu_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} P$$

[0049] In dieser und den folgenden Gleichungen stellen μ und ϵ die magnetische Permeabilität bzw. Dielektrizitätskonstante des nichtlinearen optischen Elements dar, während μ_0 und ϵ_0 die magnetische Permeabilität bzw. Dielektrizitätskonstante des Vakuums darstellen. Für die zweite Harmonische ist die folgende Gleichung zu lösen.

$$\nabla \times \nabla \times E_{sh}\cos(\omega_{sh} t - k_{sh} z\cos\theta) + \omega_{sh}^2 \epsilon\mu E_{sh}\cos(\omega_{sh} t - k_{sh} z\cos\theta) = -\omega_{sh}^2 \mu P_{sh}$$

[0050] Wenn die Wechselwirkung kollinear stattfindet und die Umwandlung in die zweite Harmonische allmählich stattfindet, wie es der Fall ist, kann die obige Gleichung wie folgt umgeschrieben werden.

$$\frac{dE_{sh}}{dz} = i\frac{\omega_{sh}}{2}\sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_{sh}}}\, X_2 E_f^2 \exp(-i\Delta k z\cos\theta)$$

[0051] Der Term Δk stellt die gewöhnliche Phasenfehlanpassung für Licht mit der Grundwellenlänge und der Wellenlänge der zweiten Harmonischen dar, das sich parallel zur optischen Achse **6** fortpflanzt, welche wie folgt berechnet werden kann.

$$\Delta k = k_{sh} - 2k_f = (4\Pi/\lambda)n_{sh} - 2(2\Pi/\lambda)n_f = (4\Pi/\lambda)(n_{sh} - n_f)$$

[0052] Die Phasenfehlanpassung im nichtgebeugten Strahl **18** ist Δkcosθ, da das Licht von der Axikonlinse **14** unter einem Winkel θ zur optischen Achse **6** hin gerichtet wird.

[0053] Über eine Wechselwirkungslänge **1**, auf der der Energieverlust bei der Grundwellenlänge ignoriert werden kann, wird das Ausgangslicht der zweiten Harmonischen durch die folgende Gleichung ausgedrückt, in der A die Querschnittsfläche des nichtgebeugten Strahls **18** darstellt.

$$P_{sh} = 1/2(\in/\mu_0)^{1/2}E_{sh}^2A = 2(\in/\mu_0)^{3/2}\{(\omega^2X_2^2l^2)/(n_f^2n_{sh})\}\{P^2/A\}\{[\sin(\Delta kl/2)]/(\Delta kl/2)^2\}$$

[0054] Für Licht mit der Grundwellenlänge λ und der Wellenlänge der zweiten Harmonischen λ/2, das sich parallel zur optischen Achse **6** fortpflanzt, hat das nichtlineare optische Element **10** eine Kohärenzlänge l_C, die durch die folgende Formel gegeben ist.

$$l_C = \Pi/\Delta k = \Pi/(k_{sh} - 2k_f) = (\lambda/4)/(n_{sh} - n_f)$$

[0055] Bei konventioneller QPM-SHG ist die Wiederholungsperiode Λ des Domäneninversionsaufbaus gleich $2l_C$, worin l_C die obige Kohärenzlänge ist. In der vorliegenden Ausführungsform ist jedoch wegen der geänderten Phasengeschwindigkeit des nichtgebeugten Strahls **18** die Wiederholungsperiode Λ durch die folgende Gleichung gegeben.

$$\Lambda = 2l_C/\cos\theta = 2(\Pi/\Delta k)/\cos\theta = (\lambda/2)/[(n_{sh} - n_f)\cos\theta]$$

[0056] Diese Gleichung definiert, was als die QPM-Bedingung bezeichnet wird. Die Umwandlung in die zweite Harmonische geht nur dann über die ganze Dicke des nichtlinearen optischen Elements **10** weiter, wenn die Wiederholungsperiode Λ und die Phasenfehlanpassung Δk diese Gleichung erfüllen.

[0057] Wegen seines kleinen Durchmessers und seiner nicht verbreiternden Natur behält der nichtgebeugte Strahl **18** eine hohe Intensität bei, wenn er sich über die ganze Dicke des nichtlinearen optischen Elements **10** fortpflanzt. Die Wellenlängenumwandlung ist daher sehr wirkungsvoll, vorausgesetzt, die QPM-Bedingung ist erfüllt.

[0058] Da das nichtlineare optische Element **10** den nichtgebeugten Strahl **18** auf eine nicht begrenzte Weise überträgt, was bedeutet, dass sich der nichtgebeugte Strahl **18** nicht durch einen Wellenleiter fortpflanzt, ist präzise Positionsausrichtung zwischen der Axikonlinse **14** und dem nichtlinearen optischen Element **10** unnötig. Notwendig ist lediglich, dass das nichtlineare optische Element **10** im Weg des nichtgebeugten Strahls **18** auf der optischen Achse **6** angeordnet sein muss. Der nichtgebeugte Strahl **18** muss nicht notwendigerweise senkrecht zu der Oberfläche des nichtlinearen optischen Elements **10** oder zu den Grenzflächen zwischen Domänen **12** einfallen. Der Einfallswinkel kann eingestellt werden, um einen Dimensionsfehler in der Wiederholungsperiode Λ zu kompensieren, um sicherzustellen, dass die QPM-Bedingung bei der gewünschten Wellenlänge λ erfüllt ist.

Abwandlungen

[0059] **Fig.** 2 zeigt eine Abwandlung des ersten Ausführungsbeispiels, bei der das nichtlineare optische Element **20** einen periodischen Domäneninversionsaufbau hat, der für Summenfrequenzerzeugung (SFG) eingerichtet ist. Kohärentes Licht mit zwei unterschiedlichen Wellenlängen λ_1 und λ_2 wird durch einen halbdurchlässigen Spiegel **22** vereinigt und in die Axikonlinse **14** gerichtet. Die Axikonlinse **14** formt das einfallende Licht zu einem nichtgebeugten Strahl **18**, wie oben beschrieben. Das nichtlineare optische Element **20** wandelt die Wellenlängen im nichtgebeugten Strahl **18** in eine neue Wellenlänge gleich dem Kehrwert der Summe der Kehrwerte von λ_1 und λ_2 um. Das heißt, die Frequenz des Ausgangslichts ist die Summe der zwei Frequenzen des Eingangslichts.

[0060] Der Domäneninversionsaufbau des nichtlinearen optischen Elements **20** ist dem des nichtlinearen optischen Elements **10** in der ersten Ausführungsform allgemein ähnlich. In der ersten Ausführungsform war jedoch die Phasenfehlanpassung Δk für Licht, das sich parallel zur optischen Achse **6** fortpflanzt, gleich $k_{sh} - 2k_f$, was wie folgt geschrieben werden kann.

$$\Delta k = k_{sh} - k_f - k_f$$

[0061] Bei Summenfrequenzerzeugung wird die Phasenfehlanpassung Δks wie folgt ausgedrückt, worin k_{f1} die Wellenzahl von Licht mit der ersten Grundwellenlänge λ_1 ist, k_{f2} die Wellenzahl von Licht mit der zweiten Grundwellenlänge λ_2 ist und k_{sf} die Wellenzahl des Summenfrequenzlichts ist.

$$\Delta k_S = k_{sf} - k_{f2} - k_{f1}$$

[0062] Die QPM-Bedingung für SFG ist durch die folgende Gleichung gegeben.

$\Lambda = 2(\Pi/\Delta k_S)/\cos\theta$

[0063] Das nichtlineare optische Element **20** kann auch für Differenzfrequenzerzeugung (DFG) eingerichtet sein. Wieder wird Licht mit zwei unterschiedlichen Wellenlängen λ_1 und λ_2 durch einen halbdurchlässigen Spiegel **22** vereinigt und zu einem nichtgebeugten Strahl **18** geformt. Die Phasenfehlanpassung Δk_D ist durch die folgende Gleichung gegeben, in der k_{f1} und k_{f2} wie oben sind, aber k_{df} jetzt die Wellenzahl des Differenzfrequenzlichts darstellt.

$\Delta k_D = k_{f1} - k_{f2} - k_{df}$

[0064] Die QPM-Bedingung für DFG kann durch die folgende Gleichung ausgedrückt werden.

$\Lambda = 2(\Pi/\Delta k_D)/\cos\theta$

[0065] SFG- oder DFG-Wellenlängenumwandlung unter Verwendung einer konventionellen Vorrichtung, die einen Wellenleiter enthält, erfordert äußerst schwierige Positionsausrichtung, da zwei Laserstrahlen in denselben Wellenleiter eingekoppelt werden müssen. Dies ist in **Fig.** 2 jedoch nicht der Fall. Das Licht mit den Wellenlängen λ_1 und λ_2 durch den halbdurchlässigen Spiegel **22** zu vereinigen, stellt keine besonderen Schwierigkeiten dar, und das nichtlineare optische Element **20** muss nur im Weg des nichtgebeugten Strahls **18** angeordnet werden. Wie in der ersten Ausführungsform wird Wellenlängenumwandlung mit hohem Wirkungsgrad durchgeführt, da der nichtgebeugte Strahl **18** über die ganze Dicke des nichtlinearen optischen Elements **20** einen kleinen Durchmesser und hohe Intensität beibehält.

Zweites Ausführungsbeispiel

[0066] **Fig.** 3 zeigt ein zweites Ausführungsbeispiel der Erfindung, das zu der ebenen Oberfläche **16** der Axikonlinse **14** des ersten Ausführungsbeispiels eine Mehrschicht-Beschichtung **24** hinzufügt. Das nichtlineare optische Element **10** hat denselben periodischen Domäneninversionsaufbau wie im ersten Ausführungsbeispiel, mit denselben Dünnfilm-Domänen **12** und derselben QPM-Bedingung.

[0067] Die Mehrschicht-Beschichtung **24** reflektiert einen Teil des Lichts mit der Wellenlänge λ, die die QPM-Bedingung des nichtlinearen optisches Elements **10** erfüllt, und lässt andere Wellenlängen ohne Reflexion durch. Die Mehrschicht-Beschichtung **24** erfüllt dementsprechend die Bragg-Bedingung in Bezug auf die Wellenlänge λ. Das reflektierte Licht wird zum Halbleiterlaser (nicht sichtbar) zurückgeschickt, der das einfallende kohärente Licht **8** liefert.

[0068] Durch Rückführung von Licht mit der Wellenlänge λ zum Halbleiterlaser kann die Mehrschicht-Beschichtung **24** die Laserwellenlänge stabilisieren, die sich andernfalls mit Änderungen der Umgebungstemperatur und des Ansteuerstroms tendenziell verändern würde. Die Laserwellenlänge auf dem Wert λ zu halten, der die QPM-Bedingung erfüllt, stellt sicher, dass die Wellenlängenumwandlung trotz Temperatur- und Stromänderungen mit hohem Wirkungsgrad vor sich geht.

[0069] Dieselbe Stabilisierungswirkung kann erreicht werden, indem statt der Mehrschicht-Beschichtung **24** eine teilweise reflektierende Einrichtung an einer geeigneten Stelle auf dem Lichtweg zwischen der Axikonlinse **14** und dem Halbleiterlaser vorgesehen wird. Zum Beispiel kann ein Beugungsgitter verwendet werden, das die Bragg-Bedingung in Bezug auf die Wellenlänge λ erfüllt. Für die in **Fig.** 2 veranschaulichten SFG- und DFG-Abwandlungen können getrennte teilweise reflektierende Einrichtungen für die zwei Eingangswellenlängen λ_1 und λ_2 verwendet werden.

[0070] Bei konventionellen Wellenlängen-Umwandlungsvorrichtungen vom Wellenleitertyp wird am oder nahe am Ausgangsende des nichtlinearen optischen Elements manchmal eine reflektierende Beschichtung oder ein Gitter vorgesehen. Bei der vorliegenden Erfindung wäre dies kein günstiger Ort, da viel von dem reflektierten Licht die Axikonlinse **14** auf der Rückreise verfehlen würde.

Drittes Ausführungsbeispiel

[0071] Das dritte Ausführungsbeispiel, in **Fig.** 4 gezeigt, bedeckt einen Teil der ebenen Oberfläche **16** der Axikonlinse **14** mit einem Phasenschieber **26**. Der Zweck des Phasenschiebers **26** ist es, die QPM-Fehlertoleranz zu vergrößern. Andere Bestandteile des dritten Ausführungsbeispiels sind so, wie im ersten Ausführungsbeispiel beschrieben, und haben dieselben Bezugszeichen wie in **Fig.** 1.

[0072] Der Phasenschieber **26** ist als ein Dünnfilm ausgebildet, der einen um die optische Achse **6** symmetrischen Bereich bedeckt. Unter Bezugnahme auf **Fig.** 5, die die Axikonlinse **14** in Draufsicht zeigt, hat der Phasenschieber **26** die Form einer Scheibe, die auf der optischen Achse **6** zentriert ist. Licht, das durch den zentralen Teil der Axikonlinse **14** und folglich durch den Phasenschieber **26** hindurchgeht, wird in Bezug auf Licht,

das durch den unbedeckten Teil der äußeren Axikonlinse **14** hindurchgeht, phasenverzögert.

[0073] Unter nochmaliger Bezugnahme auf **Fig.** 4 kann der nichtgebeugte Strahl **18** in zwei Bereiche unterteilt werden: einen ersten Bereich **27**, der von Licht bestrahlt wird, das durch den Phasenschieber **26** hindurchgegangen ist, und einen zweiten Bereich **28**, der von Licht bestrahlt wird, das nicht durch den Phasenschieber **26** hindurchgegangen ist.

[0074] Wie im ersten Ausführungsbeispiel erläutert, hat die Periode Λ des Domäneninversionsaufbaus im nichtlinearen optischen Element **10** einen Nennwert von 2(Π/Δk)/cosθ, worin Δk die Phasenfehlanpassung ist. Die Phasenfehlanpassung ändert sich jedoch mit der Temperatur, da sich die Brechungsindizes des nichtlinearen optischen Elements **10** mit der Temperatur ändern. Aus diesem und anderen Gründen wie z. B. Fertigungstoleranzen wird A im Allgemeinen um einen bestimmten Betrag ΔT von seinem Nennwert abweichen, wie in der folgenden Gleichung.

$$\Lambda = 2(\Pi/\Delta k)/\cos\theta + \Delta T$$

[0075] Dieser Fehler ΔT führt zu unvollkommener Kompensation der Phasenfehlanpassung, so dass, wenn sich Licht durch das nichtlineare optische Element **10** fortpflanzt, sich die Phasenfehlanpassung allmählich anhäuft, und der Wirkungsgrad der Wellenlängenumwandlung nimmt ab. Die nutzbare Dicke L des nichtlinearen optischen Elements **10** in der ersten Ausführungsform ist auf den Bereich beschränkt, in dem die sich anhäufende Phasenfehlanpassung die Kohärenzlänge L_C (geteilt durch cosθ) nicht übersteigt. Die sich über eine Strecke L anhäufende Phasenfehlanpassung ist (L/Λ)ΔT, so dass die nutzbare Dicke L des nichtlinearen optischen Elements **10** durch die folgenden Ungleichheiten beschränkt ist.

$$(L/\Lambda)\Delta T < (\lambda 4)/[(n_{sh} - n)\cos\theta]$$

oder

$$L < (\lambda 4)(\Lambda/\Delta T)/[(n_{sh} - n)\cos\theta]$$

[0076] In der dritten Ausführungsform ist die nutzbare Dicke L des nichtlinearen optischen Elements **10** in jedem der zwei Bereiche **27** und **28** durch diese Ungleichheiten beschränkt. Die Dicke und der Brechungsindex des Phasenschiebers **26** können jedoch so gewählt werden, dass die Phasenverzögerung zwischen den ersten und zweiten Bereichen **27** und **28** die Phasenfehlanpassung kompensiert, die sich im ersten Bereich **27** angehäuft hat.

[0077] Wie in der ersten Ausführungsform erläutert, kann die Phase des nichtgebeugten Strahls **18** im zweiten Bereich **28**, die durch den Phasenschieber **26** nicht beeinflusst wird, wie folgt ausgedrückt werden.

$$\exp[i(\omega t - kz\cos\theta)]$$

[0078] Die Phase des nichtgebeugten Strahls **18** im ersten Bereich wird wie folgt ausgedrückt, worin δ die durch den Phasenschieber **26** verursachte Phasenverzögerung ist.

$$\exp[i(\omega t - kz\cos\theta - \delta)]$$

[0079] Wenn die Phasenfehlanpassung, die sich anhäuft, wenn der nichtgebeugte Strahl **18** durch den im ersten Bereich **27** liegenden Teil des nichtlinearen optischen Elements **10** läuft, größenmäßig gleich δ ist, passt das im ersten Bereich **27** erzeugte Licht der zweiten Harmonischen genau genug zu der Phase des den zweiten Bereich **28** erreichenden Grundlichts, dass die Erzeugung der zweiten Harmonischen im zweiten Bereich **28** wirkungsvoll weitergeht.

[0080] Für eine gegebene Dimensionstoleranz ΔT der Periode Λ des Domäneninversionsaufbaus im nichtlinearen optischen Element **10** ermöglicht es der Phasenschieber **26**, die Dicke des nichtlinearen optischen Elements **10** ungefähr zu verdoppeln, so dass mehr von dem einfallenden Licht umgewandelt werden kann. Umgekehrt ermöglicht es der Phasenschieber **26**, für eine gegebene Dicke des nichtlinearen optischen Elements **10** die Toleranz ΔT zu vermindern. Weiterhin ermöglicht es der Phasenschieber **26**, für eine gegebene Dicke des nichtlinearen optischen Elements **10** den Bereich von Wellenlängen λ zu vergrößern, die in mindestens einem bestimmten Bruchteil der Dicke des nichtlinearen optischen Elements **10** wirkungsvoll umgewandelt werden, wodurch zusätzlicher Betriebsspielraum in Bezug auf Wellenlängenveränderungen, Temperaturveränderungen und andere Umgebungsbedingungen erzeugt wird.

[0081] Ähnliche Wirkungen von größerer nutzbarer Dicke, verminderten Fertigungstoleranzen und größeren Betriebsspielräumen in Bezug auf Umgebungsbedingungen können erreicht werden, indem ein ähnlicher Phasenschieber in einer Wellenlängen-Umwandlungsvorrichtung vorgesehen wird, die SFG oder DFG verwendet,

wie in **Fig.** 2 gezeigt.

[0082] Der Phasenschieber muss keine zentrale Scheibe sein. Unter Bezugnahme auf **Fig.** 6 kann ein Phasenschieber **29** als ein ringförmiger Film ausgebildet werden, der die äußere Hälfte der Außenseite der Axikonlinse **14** bedeckt. Man erhält dann denselben Typ von Phasenverzögerung, aber mit entgegengesetztem Vorzeichen. Ob der Phasenschieber **26** in **Fig.** 5 oder der Phasenschieber **29** in **Fig.** 6 vorteilhaft ist, hängt vom algebraischen Vorzeichen des Dimensionsfehlers ΔT der Periode Λ ab.

[0083] In den vorhergehenden Ausführungsformen überstieg die Länge des nichtgebeugten Strahls **18** die Dicke des nichtlinearen optischen Elements **10**, so dass nur ein Teil der Energie im nichtgebeugten Strahl für Wellenlängenumwandlung zur Verfügung stand. Der Umwandlungswirkungsgrad würde größer werden, wenn der nichtgebeugte Strahl kürzer gemacht würde, um diese Energievergeudung zu beseitigen. Der Umwandlungswirkungsgrad würde jedoch kleiner werden, wenn der Strahl kürzer würde als die Dicke des nichtlinearen optischen Elements **10**; in diesem Fall würde ein Teil des Wellenlängen-Umwandlungsvermögens des nichtlinearen optischen Elements **10** vergeudet. Für maximalen Umwandlungswirkungsgrad sollte die Länge des nichtgebeugten Strahls **18** genau zu der Dicke des nichtlinearen optischen Elements **10** passen.

[0084] Ein Verfahren, den nichtgebeugten Strahl zur Anpassung an die Dicke des nichtlinearen optischen Elements **10** kürzer zu machen, wäre, den Winkel θ in **Fig.** 1 bis 4 zu vergrößern. Die Beziehungen $\alpha^2 + \beta^2 = (\omega/c)^2$ und $\beta = k\cos\theta$ bedeuten jedoch, dass bei größer werdendem Winkel **θ** der Strahldurchmesser (proportional zu α) ebenfalls größer wird; daher wird die Strahlintensität vermindert und der Umwandlungswirkungsgrad gesenkt.

[0085] Für maximalen Umwandlungswirkungsgrad sollte nicht nur die Strahllänge optimiert werden, sondern sollte auch die Strahlintensität möglichst groß gemacht werden, da der Winkel θ möglichst klein gemacht werden sollte. Die nächsten fünf Ausführungsformen gemäß der Erfindung sind darauf gerichtet, die Strahlintensität möglichst groß zu machen, indem der Winkel θ verkleinert wird, während die Strahllänge an die Dicke des nichtlinearen optischen Elements **10** angepasst wird.

[0086] **Fig.** 7 zeigt das allgemeine Schema, das in diesen erfinderischen Ausführungsformen verwendet wird. Das einfallende kohärente Licht **8** und das nichtlineare optische Element **10** sind dieselben wie in den vorhergehenden Ausführungsformen. Der Generator für einen nichtgebeugten Strahl umfasst jetzt ein erstes optisches System **30**, das ein ringförmiges Bild **32** erzeugt, und ein zweites optisches System **34**, das aus dem ringförmigen Bild **32** einen nichtgebeugten Strahl **18** erzeugt. Das zweite optische System **34** besteht aus einem rohrförmigen Strahlkollimator **36** und einem optischen Axikonelement **38**, die getrennt sein können, wie gezeigt, oder zu einem einzigen optischen Element vereinigt sein können.

[0087] Der Winkel θ kann verkleinert werden, indem der Durchmesser D_f des ringförmigen Bildes **32** verkleinert wird. Die Länge L des nichtgebeugten Strahls **18** wird in Übereinstimmung mit der folgenden Beziehung durch die Breite W des ringförmigen Bildes **32** und den Kotangens des Winkels θ gesteuert.

$$L = W\cot\theta$$

[0088] Wenn θ klein ist, wird $\cot\theta$ groß, so dass die Breite W ebenfalls klein sein muss, um die gewünschte Strahllänge L zu erhalten. Der gewünschte nichtgebeugte Strahl wird dementsprechend erhalten, indem ein kleines, dünnes, ringförmiges Bild **32** erzeugt wird und das Licht von diesem ringförmigen Bild **32** unter einem engen Winkel θ zur optischen Achse **6** hin gerichtet wird.

Erste Ausführungsform

[0089] Unter Bezugnahme auf **Fig.** 8, in der ersten Ausführungsform der Erfindung, umfasst das erste optische System **30** eine scheibenförmige Toroidlinse **42** zum Fokussieren des kohärenten Lichts **8** zu einem ringförmigen Bild **32**. Das zweite optische System **34** umfasst eine ringförmige Toroidlinse **48**, die das Licht von dem ringförmigen Bild **32** bündelt, um einen rohrförmigen parallelen Strahl **50** zu formen, und eine Axikonlinse **52**, die diesen rohrförmigen parallelen Strahl **50** zur optischen Achse **6** hin richtet, wobei ein nichtgebeugter Strahl **18** mit einer zu der Dicke des nichtlinearen optischen Elements **10** passenden Länge erzeugt wird. **Fig.** 8 zeigt diese Elemente in einer Perspektivansicht.

[0090] Ein Toroid ist definiert als ein Drehkörper, der erhalten wird, indem eine beliebige ebene Figur um eine Achse (in diesem Fall die optische Achse **6**) gedreht wird, die in der Ebene der Figur liegt. Für die beiden Toroidlinsen **42** und **48** in dieser Ausführungsform ist die ebene Figur diejenige einer gewöhnlichen Konvexlinse im Querschnitt gesehen. Für die scheibenförmige Toroidlinse **42** läuft die Drehachse an einem außermittigen inneren Punkt durch den Konvexlinsen-Abschnitt. Für die ringförmige Toroidlinse **48** liegt die Drehachse außerhalb des Konvexlinsen-Abschnitts.

[0091] **Fig.** 9 zeigt eine vergrößerte Schnittansicht der Toroidlinsen **42** und **48**. Die konvexe ebene Figur, die gedreht wurde, um die scheibenförmige Toroidlinse **42** zu erhalten, ist von einer durchgezogenen Linie oberhalb der optischen Achse **6** und einer gestrichelten Linie unterhalb der optischen Achse **6** umgeben. Die Dicke

der scheibenförmigen Toroidlinse **42**, parallel zur optischen Achse **6** gemessen, wird mit zunehmendem Abstand von der optischen Achse **6** zuerst größer und dann kleiner, und die Dicke in der Mitte, auf der optischen Achse **6**, ist größer als die Dicke am äußeren Rand. Der Durchmesser D_f des ringförmigen Bildes **32** ist folglich weniger als die Hälfte der wirksamen Öffnung D_0 der scheibenförmigen Toroidlinse **42**.

$D_f < D_0/2$

[0092] Die ringförmige Toroidlinse **48** hat eine Querschnittsform, die derjenigen von zwei gleichen Konvexlinsen mit durch D_f getrennten Mittelpunkten ähnelt. Die Brennweite dieser Linsen ist vorzugsweise kurz, so dass die ringförmige Toroidlinse **48** nahe am ringförmigen Bild **32** angeordnet werden kann und ein dünnwandiger rohrförmiger Strahl **50** erzeugt werden kann.
[0093] Unter nochmaliger Bezugnahme auf **Fig.** 8 sind die Toroidlinsen **42** und **48** so angeordnet, dass sie gemeinsame Brennpunkte auf dem ringförmigen Bild **32** haben. Der rohrförmige Strahl **50** ist daher parallel. In der Zeichnung bezeichnet f_1 die Brennweite der scheibenförmigen Toroidlinse **42**, und f_2 bezeichnet die Brennweite der ringförmigen Toroidlinse **48**. Die Beziehung $f_1 > f_2$ bedeutet, dass der Außendurchmesser des rohrförmigen parallelen Strahls **50** kleiner als die wirksame Öffnung der scheibenförmigen Toroidlinse **42** ist.
[0094] Wie in **Fig.** 8 gezeigt, ermöglicht es die erste Ausführungsform, alle Energie des nichtgebeugten Strahls **18** auf das nichtlineare optische Element **10** zu konzentrieren. Der kleine Durchmesser D_f des ringförmigen Bildes **32** und die kurze Brennweite f_2 der ringförmigen Toroidlinse **48** erlauben es überdies, dass der nichtgebeugte Strahl einen äußerst kleinen Durchmesser und eine entsprechend hohe Intensität hat, was zu verbessertem Wirkungsgrad der Wellenlängenumwandlung führt. Dies liegt daran, dass der rohrförmige Strahl durch die Axikonlinse **52** unter einem kleinen Winkel (dem Winkel θ in **Fig.** 7) zur optischen Achse **6** hin gebrochen wird, wie früher erörtert.

Zweite Ausführungsform

[0095] **Fig.** 10 ist eine Schnittansicht einer zweiten Ausführungsform, die nur den Teil oberhalb der optischen Achse **6** zeigt. Die zweite Ausführungsform ersetzt die Toroidlinsen der ersten Ausführungsform durch Zonenplatten mit äquivalenten Funktionen.
[0096] Das erste optische System der zweiten Ausführungsform umfasst eine erste Zonenplatte **54**. Des zweite optische System **34** umfasst eine zweite Zonenplatte **56** und die gleiche Axikonlinse **52** wie in der ersten Ausführungsform.
[0097] Die Phasenübertragungsfunktion t(ρ) der ersten Zonenplatte **54** ist durch die folgende Gleichung gegeben, in der k die Wellenzahl von Licht mit der Grundwellenlänge λ ist (k = 2Π/λ), ρ den Abstand von der optischen Achse **6** darstellt, $\varphi_1(\rho)$ die Phasenverteilungsfunktion der Zonenplatte **54** ist und $\varphi_1(\rho)$ die entsprechende Phasendifferenzfunktion ist.

$t(\rho) = \exp[i\varphi_1(\rho)] = \exp[ik\varphi_1(\rho)]$

[0098] Die Funktionen $\varphi_1(\rho)$ und $\varphi_1(\rho)$ sind wie folgt verknüpft.

$\varphi_1(\rho) = (2\Pi/\lambda)\varphi_1(\rho)$

[0099] Die Funktion $\varphi_1(\rho)$ beschreibt die Differenz der Lichtweglänge von zwei Punkten auf der Zonenplatte **54**, die in Abständen R und ρ von der optischen Achse **6** liegen, zu einem Punkt auf dem ringförmigen Bild **32**, das sich in einem Abstand r von der optischen Achse **6** befindet. Das heißt, $\varphi_1(\rho)$ beschreibt die Längendifferenz zwischen den zwei Wegen **57** und **58** in **Fig.** 10. Das Symbol R stellt den wirksamen Radius der ersten Zonenplatte **54** dar, und das Symbol r ist der Radius des ringförmigen Bildes **32** ($D_f/2$ in **Fig.** 9). Wenn F der Abstand von der Zonenplatte **54** zur Ebene des ringförmigen Bildes **32** ist, ist $\varphi_1(\rho)$ durch die folgende Gleichung gegeben.

$\varphi_1(\rho) = [(R - r)^2 + F^2]^{1/2} - [(\rho - r)^2 + F^2]^{1/2}$

[0100] Wenn F viel größer als (R – r) und (ρ – r) ist, was im Allgemeinen der Fall sein wird, kann $\varphi_1(\rho)$ wie folgt dicht angenähert werden.

$\varphi_1(\rho) = [R^2 - \rho^2 - 2r(R - \rho)]/(2F)$

[0101] Dies ergibt den folgenden Näherungsausdruck für die Phasenverteilungsfunktion $\varphi_1(\rho)$.

$\varphi_1(\rho) = [\Pi/(\lambda F)][R^2 - \rho^2 - 2r(R - \rho)]$

[0102] Die Phasenverteilungsfunktion $\varphi_2(\rho)$ der zweiten Zonenplatte **56** kann man erhalten, indem man in F dieser Gleichung durch f ersetzt, wobei f der Abstand vom ringförmigen Bild **32** zur zweiten Zonenplatte **56** ist. $\varphi_2(\rho)$ kann daher wie folgt berechnet werden.

$\varphi_2(\rho) = (F/f)\varphi_1(\rho)$

[0103] Zonenplatten mit diesen Phasenverteilungsfunktionen $\varphi_1(\rho)$ und $\varphi_2(\rho)$ können durch bekannte Verfahren der digitalen Holografie erzeugt wird, die auch als computergenerierte Holografie (CGH) bezeichnet werden. Die erste Zonenplatte **54** fokussiert das einfallende kohärente Licht **8** zu einem ringförmigen Bild **32** im obigen Abstand F. Die zweite Zonenplatte **56** bündelt das Licht von dem ringförmigen Bild **32**, um einen rohrförmigen parallelen Strahl **50** zu formen, aus dem die Axikonlinse **52** einen nichtgebeugten Strahl **18** erzeugt. Die Parameter f und r können gewählt werden, um dem nichtgebeugten Strahl **18** die gewünschte Länge und den gewünschten Durchmesser zu geben.
[0104] Die Breite der Zonen in beiden Zonenplatten **54** und **56** wird in einem Abstand r von der optischen Achse **6** am Größten. Der Bereich maximaler Zonenbreite sollte näher an der Mitte der ersten Zonenplatte **54** liegen als an ihrem äußeren Rand. Die dafür notwendige Bedingung ist:

$r < R/2$

[0105] Die zweite Ausführungsform bietet dieselben Vorteile eines vergrößerten Wirkungsgrades der Wellenlängenumwandlung wie die erste Ausführungsform, mit dem zusätzlichen Vorteil, dass Zonenplatten leichter herzustellen sind als Toroidlinsen und Zonenplatten im Prinzip frei von sphärischer Aberration gemacht werden können.

Abwandlung

[0106] **Fig.** 11 veranschaulicht eine Abwandlung der zweiten Ausführungsform unter Verwendung derselben Bezugszeichen wie in **Fig.** 10, um gleiche Elemente zu bezeichnen.
[0107] Diese Abwandlung bedeckt einen Teil der ebenen Oberfläche der Axikonlinse **52** mit einem Phasenschieber **59** ähnlich dem Phasenschieber **26** des dritten Ausführungsbeispiels. Der Phasenschieber **59** ist so angeordnet, dass er eine Phasenverzögerung in der inneren Hälfte des rohrförmigen parallelen Strahls **50** erzeugt. Wie im dritten Ausführungsbeispiel vergrößert diese Phasenverschiebung die QPM-Fehlertoleranz, wodurch die Dicke des nichtlinearen optischen Elements **10** vergrößert werden kann, und gibt zusätzliche Betriebsspielräume in Bezug auf Umgebungsbedingungen.
[0108] Der Phasenschieber **59** in **Fig.** 10 hat die Form einer Scheibe, die auf der optischen Achse **6** zentriert ist. Der Phasenschieber könnte aber auch eine ringförmige Form haben und entweder die innere oder die äußere Hälfte des rohrförmigen parallelen Strahls **50** bedecken.
[0109] Ein ähnlicher Phasenschieber könnte der Axikonlinse **48** in der ersten Ausführungsform hinzugefügt werden.
[0110] Statt der Axikonlinse **48** in der zweiten Ausführungsform einen Phasenschieber **59** hinzuzufügen, könnte eine äquivalente Phasenverschiebungsfunktion in die zweite Zonenplatte **56** eingebaut werden, wie später beschrieben.

Dritte Ausführungsform

[0111] **Fig.** 12 ist eine Schnittansicht einer dritten Ausführungsform, die wieder nur den Teil oberhalb der optischen Achse **6** zeigt. Die dritte Ausführungsform verwendet die erste Zonenplatte **54** der zweiten Ausführungsform, die ringförmige Toroidlinse **48** der ersten Ausführungsform und eine dritte Zonenplatte **60** an Stelle der Axikonlinse der Ausführungsformen eins und zwei.
[0112] **Fig.** 13 zeigt eine vergrößerte Ansicht der dritten Zonenplatte **60** und des nichtgebeugten Strahls **18**, wobei das nichtlineare optische Element der Deutlichkeit halber weggelassen ist. Es ist ein Koordinatensystem gezeigt, bei dem die z-Achse die optische Achse **6** ist und die ρ-Achse eine Vertikalachse durch die Ebene der dritten Zonenplatte **60** ist. Der Ursprung dieses Koordinatensystems liegt in der Mitte der Zonenplatte **60**. Die Buchstaben A und B bezeichnen die Abstände der inneren und äußeren Ränder des rohrförmigen parallelen Strahls **50** von der optischen Achse **6**. Die Phasenverteilungsfunktion der dritten Zonenplatte **60**, mit $\varphi_3(\rho)$ bezeichnet, wird nachfolgend abgeleitet.
[0113] Zweckmäßig beginnt man mit der Phasenverteilungsfunktion $\varphi(\rho)$ und der Phasendifferenzfunktion $\varphi(\rho)$ einer gewöhnlichen sphärischen Linse mit einer Brennweite f für Licht mit der Wellenlänge λ. Bezogen auf

die Phase eines axialen Strahls sind diese Funktionen in den folgenden Gleichungen gegeben.

$$\begin{aligned}\phi(\rho) &= (2\pi/\lambda)\phi(\rho)\\ &= (2\pi/\lambda)[(\rho^2 + f^2)^{1/2} - f]\\ &= (2\pi/\lambda)f[1 + (\rho/f)^2/2 - 1] \quad \text{(angenähert)}\\ &= (2\pi/\lambda)\rho^2/(2f) \quad \text{(angenähert)}\end{aligned}$$

[0114] Eine Linse von diesem Typ fokussiert 84% der gesamten einfallenden Energie auf ein Airy-Scheibchen von r_D, gegen durch die folgende Gleichung, in der R der Radius der Linse ist.

$$r_D = 2{,}44\lambda f/(2R)$$

[0115] Die Brennweite d dieser Linse ist durch die folgende Gleichung gegeben.

$$d = \lambda(f/2R)^2$$

[0116] Die dritte Zonenplatte **60** muss in einem Abstand A von der optischen Achse einfallendes Licht auf einen Punkt z, auf der optischen Achse und in einem Abstand B von der optischen Achse einfallendes Licht auf einen Punkt z_2 fokussieren. Die Brennweite muss sich daher als Funktion des Abstands ρ von der optischen Achse verändern. Die Phasenverteilungsfunktion $\varphi_3(\rho)$ der Zonenplatte **60** wird dementsprechend wie folgt ausgedrückt, worin f(ρ) die Brennweite der Zonenplatte **60** in Bezug auf Strahlen ist, die parallel zu und in einem Abstand ρ von der optischen Achse **6** einfallen.

$$\varphi_3(\rho) = (2\Pi/\lambda)\rho^2/[2f(\rho)]$$

[0117] Für eine Axikonlinse ist $f(\rho) = \rho\cot\theta$, wobei θ der in **Fig.** 1 bis 4 gezeigte Winkel ist. Wenn diese Funktion f(ρ) auf die Zonenplatte **60** angewendet wird, und wenn $a = \cot\theta$, erhält man die folgende Gleichung für $\varphi_3(\rho)$.

$$\varphi_3(\rho) = (2\Pi/\lambda)\rho/(2a)$$

[0118] Die Brennweite ist aR, was bedeutet, dass ein Strahl im Bereich $0 < z < aR$ ausgebildet werden kann. Das Verhältnis der Spitzenstrahlintensität zur Gesamtstrahlintensität ist jedoch λ/R, und die Halbwertsbreite des Strahls ist aλ, so dass der Strahl nicht den gewünschten kleinen Durchmesser oder die gewünschte konstante hohe Intensität hat.

[0119] Eine allgemeinere Form von f(ρ) ist durch die folgende Gleichung gegeben, in der f_0, a und b freie Konstanten sind.

$$f(\rho) = f_0 + a\rho^b$$

[0120] Der Fokalbereich einer Zonenplatte, die diese Funktion verwendet, ist $f_0 < z < f_0 + aR^b$, und die Brennweite ist aR^b. Der Parameter b bestimmt die Intensitätsverteilung entlang der z-Achse.

[0121] Wenn der rohrförmige parallele Strahl **50** eine gleichförmige Intensität P_0 hat, ist die auf einen ringförmigen Bereich mit der Breite dρ, der sich in einem Abstand ρ von der optischen Achse **6** befindet, einfallende Energie gleich $2\Pi P_0\rho d\rho$. Wenn der nichtgebeugte Strahl **18** eine gleichförmige Intensität P_z auf der z-Achse haben soll, ist die aus diesem ringförmigen Bereich auf ein Segment mit der Länge dz auf der optischen Achse **6** fokussierte Energie gleich $P_z dz$. Wegen des Energieerhaltungsgesetzes sind diese zwei Energien gleich, so dass die folgende Beziehung gilt.

$$P_z dz = 2\Pi P_0 \rho d\rho$$

[0122] Wenn der Parameter a die Gleichung $P_0 = (a/\Pi)P_z$ erfüllt, kann diese Beziehung wie folgt umgeschrieben werden.

$$dz = 2a\rho d\rho$$

[0123] In Form der Funktion f(ρ) wird diese Beziehung die folgende Differentialgleichung.

$$df(\rho) = 2a\rho d\rho$$

[0124] Nach **Fig.** 13 ist $f(A) = z_1$ und $f(B) = z_2$. Integration der obigen Differentialgleichung zwischen diesen Randpunkten liefert die folgende Formel für $f(\rho)$, die anzeigt, dass eine gleichförmige Intensität erhalten wird, wenn der oben erwähnte Parameter b gleich zwei ist.

$$f(\rho) = (z_1 - z_2)\rho^2/(A^2 - B^2) + (z_2A^2 - z_1B^2)/(A^2 - B^2) = [(z_1 - z_2)\rho^2 + (z_2A^2 - z_1B^2)]/(A^2 - B^2)$$

[0125] Die gewünschte Phasenverteilungsfunktion $\varphi_3(\rho)$ ist dementsprechend die Folgende.

$$\varphi_3(\rho) = (\Pi/\lambda)(\rho^2/f(\rho)) = (\Pi/\lambda)\rho^2(A^2 - B^2)/_1 - z_2)\rho^2 + (z_2A^2 - z_1B^2)$$

[0126] Nach **Fig.** 12 ist $B = (F + f)r/F$ und $A = B - Rf/F$, worin R den wirksamen Radius der ersten Zonenplatte **54** darstellt, F die Brennweite dieser Zonenplatte **54** ist, f die Brennweite der ringförmigen Toroidlinse **48** ist und r der Radius des ringförmigen Bildes **32** ist. Diese Gleichungen können benutzt werden, um zum Beispiel als ein computergeneriertes Hologramm eine dritte Zonenplatte **60** herzustellen, die einen nichtgebeugten Strahl **18** mit gleichförmiger Intensität zwischen den Punkten z_1 und z_2 auf der optischen Achse erzeugt. Die Werte von z_1 und z_2 sollten so gewählt werden, dass $z_2 - z_1$ gleich der Dicke des nichtlinearen optischen Elements **10** ist.

Vierte Ausführungsform

[0127] **Fig.** 14 ist eine Schnittansicht einer vierten Ausführungsform, die wieder nur den Teil oberhalb der optischen Achse **6** zeigt. Die vierte Ausführungsform verwendet dieselbe erste Zonenplatte **54** wie in den Ausführungsformen zwei und drei, ersetzt aber die zweiten optischen Systeme **34** dieser Ausführungsformen durch eine einzelne Zonenplatte **62**, die die Funktionen der zweiten und dritten Zonenplatten **56** und **60** vereinigt. Diese Ersetzung ist wegen der phasenerhaltenden Natur des rohrförmigen parallelen Strahls **50** in **Fig.** 10 und 12 möglich.

[0128] Die Phasenverteilungsfunktion $\varphi_4(\rho)$ der einzelnen Zonenplatte **62** kann erhalten werden, indem die oben für die zweiten und dritten Zonenplatten **56** und **60** gewonnenen Phasenverteilungsfunktionen $\varphi_2(\rho)$ und $\varphi_3(\rho)$ addiert werden, wie folgt.

$$\varphi_4(\rho) = \varphi_2(\rho) + \varphi_3(\rho)$$

[0129] Die vierte Ausführungsform vereint die Vorteile der Ausführungsformen eins, zwei und drei mit dem weiteren Vorteil eines äußerst einfachen Aufbaus aus nur zwei Zonenplatten **54** und **62** und dem nichtlinearen optischen Element **10**. Dieser einfache Aufbau senkt die Kosten und verbessert die Langzeit-Zuverlässigkeit der Wellenlängen-Umwandlungseinrichtung, und da keine Linsen verwendet werden, ist die Wellenlängen-Umwandlungseinrichtung im Prinzip frei von sphärischer Aberration.

Fünfte Ausführungsform

[0130] Die fünfte Ausführungsform hat den gleichen Aufbau wie die in **Fig.** 14 veranschaulichte vierte Ausführungsform, verwendet aber eine andere Phasenverteilungsfunktion für die einzelne Zonenplatte **62**. Speziell vereint die fünfte Ausführungsform die Merkmale des dritten Ausführungsbeispiels und der vierten Ausführungsform, indem sie dieser einzelnen Zonenplatte **62** eine Phasenverschiebungsfunktion hinzufügt.

[0131] Die Phasenverteilungsfunktion $\varphi_5(\rho)$ der einzelnen Zonenplatte **62** in der fünften Ausführungsform ist durch die folgende Gleichung gegeben, in der $\varphi_2(\rho)$ und $\varphi_3(\rho)$ wie oben sind und $\varphi_6(\rho)$ die Phasenverteilungsfunktion eines Phasenschiebers darstellt.

$$\varphi_5(\rho) = \varphi_2(\rho) + \varphi_3(\rho) + \varphi_6(\rho)$$

[0132] Für einen Phasenschieber vom in **Fig.** 5 gezeigten Typ kann $\varphi_6(\rho)$ wie folgt definiert sein, worin A und B so sind wie in **Fig.** 13 angezeigt, S ein Wert zwischen A und B ist und δ die gewünschte Phasenverschiebung ist. Die Phasenverschiebung **δ** kann entweder positiv oder negativ sein.

$$\phi_6(\rho) = (2\pi/\lambda)\delta \qquad (\text{wenn } A < \rho < S)$$
$$= 0 \qquad (\text{wenn } S < \rho < B)$$

[0133] Für einen Phasenschieber vom in **Fig.** 6 gezeigten Typ kann $\varphi_6(\rho)$ wie folgt definiert sein.

$$\phi_6(\rho) = 0 \qquad (\text{wenn } A < \rho < S)$$
$$= (2\pi/\lambda)\delta \qquad (\text{wenn } B < \rho < B)$$

[0134] Neben der Anpassung der Länge des nichtgebeugten Strahls **18** an die Dicke des nichtlinearen optischen Elements **10** ermöglicht es die fünfte Ausführungsform, diese Dicke zu vergrößern, aus den im dritten Ausführungsbeispiel erläuterten Gründen, so dass der Wirkungsgrad der Wellenlängenumwandlung weiter verbessert werden kann. Die QPM-Fehlertoleranz wird ebenfalls vergrößert.
[0135] Ein ähnliches Phasenverschiebungsmerkmal kann der zweiten Zonenplatte **56** in der zweiten Ausführungsform oder der dritten Zonenplatte **60** in der dritten Ausführungsform hinzugefügt werden, indem eine der oben definierten Funktionen $\varphi_6(\rho)$ zu den Phasenverteilungsfunktionen für diese Zonenplatten addiert wird.

Sechste Ausführungsform

[0136] Wenn die Länge des nichtgebeugten Strahls **18** zu der Dicke des nichtlinearen optischen Elements **10** passt, kommt Licht mit der umgewandelten Wellenlänge in Form eines divergenten rohrförmigen kegelförmigen Strahls aus dem nichtlinearen optischen Element **10** heraus. Viele Anwendungen verlangen jedoch einen kleinen Lichtfleck. Noch brauchbarer wäre in manchen Anwendungen ein paralleler Strahl mit kleinem Durchmesser, der in einem beliebigen Abstand von der Wellenlängen-Umwandlungsvorrichtung einen kleinen Fleck erzeugen könnte.
[0137] Unter Bezugnahme auf **Fig.** 15 kann dieser Strahltyp hergestellt werden, indem eine Axikon-Sammellinse **66**, die den divergenten rohrförmigen Strahl aus wellenlängenumgewandeltem Licht parallelrichtet, um einen rohrförmigen parallelen Strahl **67** zu erzeugen, eine erste Konvexlinse **68**, um diesen rohrförmigen parallelen Strahl **67** zu einem überaufgelösten Fleck **69** zu fokussieren, und eine zweite Konvexlinse **70** hinzugefügt werden, um Licht von dem überaufgelösten Fleck **69** zu einem parallelen Ausgangsstrahl **71** zu bündeln. Wenn der Durchmesser des parallelen Ausgangsstrahls **71** klein genug ist, wird dieser Strahl **71** nicht rohrförmig, sondern erhält aufgrund von Beugungseffekten im wesentlichen konstante Intensität über seinen gesamten Querschnitt.
[0138] Wenn die Brennweite der ersten Konvexlinse **68** gleich f_3 ist, würde ein gewöhnlicher paralleler Lichtstrahl mit der Wellenlänge $\lambda/2$ und einem Durchmesser D zu einem Fleck mit einem Radius von $2{,}44(\lambda/2)f_3/D$ fokussiert. Genauer ist dies der Radius des zentralen Airy-Scheibchens des Flecks, wie oben beschrieben. Ein rohrförmiger Strahl mit demselben Durchmesser D wird jedoch durch das bekannte Phänomen der Überauflösung zu einem kleineren Fleck fokussiert. Wenn die zweite Konvexlinse **70** eine genügend kleine Brennweite f_4 hat, kann der überaufgelöste Fleck **69** zu einem parallelen Strahl **71** mit äußerst kleinem Durchmesser gebündelt werden.
[0139] Der Durchmesser des endgültigen Strahls **71** hängt von dem Verhältnis f_4/f_3 ab, so dass es vorteilhaft ist, wenn f_4 klein ist und f_3 groß ist. Der Strahldurchmesser hängt jedoch auch von der Größe des Flecks **69** ab, die klein gehalten werden muss. Überauflösung ermöglicht es, trotz eines vergleichsweise großen Wertes von f_3 einen kleinen Fleck **69** zu erhalten.
[0140] Wenn ein Fleck und nicht ein Strahl Ausgangslicht verlangt wird, kann die zweite Konvexlinse **70** weggelassen werden.
[0141] Der nichtgebeugte Strahl **18** im dritten Ausführungsbeispiel kann durch einen der in den vorhergehenden Ausführungsformen gezeigten Generatoren für einen nichtgebeugten Strahl erzeugt werden.

Siebte Ausführungsform

[0142] Die in **Fig.** 16 gezeigte Ausführungsform ersetzt die Linsen **66**, **68** und **70** der sechsten Ausführungsform durch Zonenplatten **72** und **74** mit äquivalenten Funktionen.
[0143] Die Phasenverteilungsfunktion der Zonenplatte **72**, die die Funktionen der Axikonlinse **66** und der ersten Konvexlinse **68** der sechsten Ausführungsform vereint, ist der Phasenverteilungsfunktion $\varphi_4(\rho)$ der einzelnen Zonenplatte **62** in der vierten Ausführungsform ähnlich, außer dass der Wert des bei der Gewinnung dieser Phasenverteilungsfunktion verwendeten Parameters r gleich null ist. Die Funktionen der Linsen **66** und **68** in **Fig.** 15 können in einer einzelnen Zonenplatte **72** in **Fig.** 16 vereint werden, da keine Phasendifferenz im rohrförmigen parallelen Strahl **67** dazwischen auftritt. Die Zonenplatte **72** kann durch computergenerierte Holografie erzeugt werden.
[0144] Die Zonenplatte **74** in der siebten Ausführungsform hat die bekannte Phasenverteilungsfunktion einer sphärischen Konvexlinse, angegeben in der Beschreibung der dritten Ausführungsform. Wenn ein Fleck und nicht ein Ausgangsstrahl verlangt wird, kann die Zonenplatte **74** weggelassen werden.
[0145] Der nichtgebeugte Strahl **18** in der siebten Ausführungsform kann durch einen der in den ersten acht Ausführungsformen gezeigten Generatoren für einen nichtgebeugten Strahl erzeugt werden.
[0146] Die siebte Ausführungsform hat den Vorteil eines vereinfachten Aufbaus und verbesserter Zuverläs-

sigkeit, da drei Linsen durch zwei Zonenplatten ersetzt wurden. Ein weiterer Vorteil ist, dass die Zonenplatten **72** und **74** im wesentlichen frei von sphärischer Aberration sind.

[0147] Die Ausführungsformen fünf und sieben können auf verschiedene naheliegende Weisen modifiziert werden. Zum Beispiel kann die Zonenplatte **72** der zehnten Ausführungsform zusammen mit der zweiten Konvexlinse **70** der sechsten Ausführungsform oder mit einem äquivalenten Kollimatorelement verwendet werden.

[0148] Anwendungen der erfundenen Wellenlängen-Umwandlungsvorrichtung sind nicht auf Informationsspeicherung und Laserdruck beschränkt. Es wird erwartet, dass die Erfindung in vielen Anwendungen nützlich ist, die kleine Flecken oder Strahlen von Licht mit Wellenlängen verlangen, die von Halbleiterlasern nicht ausgestrahlt werden.

[0149] Die Erfindung ist nicht auf die in den vorhergehenden Ausführungsformen gezeigten Aufbauten beschränkt. Insbesondere muss das nichtlineare optische Element keinen periodischen QPM-Domäneninversionsaufbau haben. Es können andere Arten von Phasenanpassung verwendet werden, einschließlich Winkelphasenanpassung, die die Doppelbrechung von nichtlinearen optischen Kristallen ausnutzen.

[0150] Das nichtlineare optische Element muss nicht aus $LiNbO_3$ bestehen. Statt dessen kann man Lithiumtantalat ($LiTaO_3$) verwenden, das ähnliche nichtlineare optische Eigenschalten hat. Das nichtlineare optische Element kann auch einen Mehrschichtaufbau aus abwechselnden Schichten aus Galliumphosphat (GaP) und Galliumarsenid (GaAs) oder einen anderen bekannten nichtlinearen optischen Aufbau haben, der zu Wellenlängenumwandlung führt.

[0151] Der Fachmann erkennt, dass innerhalb des Schutzbereichs der Erfindung, wie nachfolgend beansprucht, weitere Modifizierungen möglich sind.

Patentansprüche

1. Generator für einen nichtgebeugten Strahl, der
ein erstes optisches System (**30**) mit einer ringförmigen Fokussiereinrichtung (**42**; **54**) zum Fokussieren von einfallendem Licht zu einem ringförmigen Bild (**32**) und
ein zweites optisches System (**34**) zum Erzeugen eines nichtgebeugten Strahls (**18**) aus dem ringförmigen Bild (**32**) enthält, wobei das erste optische System (**30**) eine bestimmte wirksame Öffnung hat, **dadurch gekennzeichnet**, dass
das ringförmige Bild (**32**) einen Durchmesser kleiner als die Hälfte der wirksamen Öffnung hat.

2. Vorrichtung zum Umwandeln von koherantem Licht (**8**) mit einer ersten Wellenlänge, das von einem Halbleiterlaser ausgestrahlt wird, in Licht mit einer zweiten Wellenlänge, wobei die Vorrichtung Folgendes aufweist:
einen Generator für einen nichtgebeugten Strahl, nach Anspruch 1, der das koherante Licht (**8**) mit der ersten Wellenlänge als das einfallende Licht empfängt und den nichtgebeugten Strahl (**18**) auf einer bestimmten optischen Achse (**6**) erzeugt, und
ein nichtlineares optisches Volumenelement (**10**), das auf der optischen Achse (**6**) angeordnet ist, zum Empfangen des nichtgebeugten Strahls (**18**) und Weiterleiten des nichtgebeugten Strahls (**18**) auf eine nicht begrenzte Weise unter Umwandlung des nichtgebeugten Strahls (**18**) von der ersten Wellenlänge in die zweite Wellenlänge.

3. Wellenlängen-Umwandlungsvorrichtung nach Anspruch 2, bei der das nichtlineare optische Element (**10**) eine parallel zu der optischen Achse (**6**) gemessene erste Dicke hat und der nichtgebeugte Strahl (**18**) eine Länge gleich der ersten Dicke hat.

4. Wellenlängen-Umwandlungsvorrichtung nach Anspruch 2, bei der das erste optische System (**30**) eine scheibenförmige Toroidlinse (**42**) aufweist, die eine als Drehkörper um die optische Achse (**6**) erhaltene Form hat und die eine parallel zu der optischen Achse (**6**) gemessene zweite Dicke hat, die mit zunehmender Entfernung von der optischen Achse (**6**) zuerst zunimmt und dann abnimmt, wobei die zweite Dicke auf der optischen Achse (**6**) größer ist als an einem äußeren Rand der scheibenförmigen Toroidlinse (**42**).

5. Wellenlängen-Umwandlungsvorrichtung nach Anspruch 2, bei der das erste optische System (**30**) eine erste Zonenplatte (**54**) aufweist.

6. Wellenlängen-Umwandlungsvorrichtung nach Anspruch 2, bei der das zweite optische System (**34**) Folgendes aufweist:
eine ringförmige Toroidlinse (**48**) zum Bündeln von Licht aus dem ringförmigen Bild (**32**) zu einem ersten rohrförmigen parallelen Strahl (**50**), und
eine Axikonlinse (**52**) zum Erzeugen des nichtgebeugten Strahls (**18**) aus dem ersten rohrförmigen parallelen

Strahl (**50**).

7. Wellenlängen-Umwandlungsvorrichtung nach Anspruch 6, bei der die Axikonlinse (**52**) eine ebene Oberfläche hat und das zweite optische System (**34**) außerdem Folgendes aufweist: einen Phasenschieber (**59**), der auf einem Teil der ebenen Oberfläche der Axikonlinse (**52**) angeordnet ist, zur Erzeugung einer Phasenverzögerung in einem Teil des ersten rohrförmigen parallelen Strahls (**50**), welcher Teil entweder ein innerer Teil oder ein äußerer Teil des ersten rohrförmigen parallelen Strahls (**50**) ist.

8. Wellenlängen-Umwandlungsvorrichtung nach Anspruch 2, bei der das zweite optische System (**34**) Folgendes aufweist:
eine zweite Zonenplatte (**56**) zum Bündeln von Licht aus dem ringförmigen Bild (**32**) zu einem ersten rohrförmigen parallelen Strahl (**50**), und
eine Axikonlinse (**52**) zum Erzeugen des nichtgebeugten Strahls (**18**) aus dem ersten rohrförmigen parallelen Strahl (**50**).

9. Wellenlängen-Umwandlungsvorrichtung nach Anspruch 8, bei der die Axikonlinse (**52**) eine ebene Oberfläche hat und das zweite optische System (**34**) außerdem Folgendes aufweist: einen Phasenschieber (**59**), der auf einem Teil der ebenen Oberfläche der Axikonlinse (**52**) angeordnet ist, zur Erzeugung einer Phasenverzögerung in einem Teil des ersten rohrförmigen parallelen Strahls (**50**), welcher Teil entweder ein innerer Teil oder ein äußerer Teil des ersten rohrförmigen parallelen Strahls (**50**) ist.

10. Wellenlängen-Umwandlungsvorrichtung nach Anspruch 8, bei der die zweite Zonenplatte (**56**) eine Phasenverschiebung in einem Teil des ersten rohrförmigen parallelen Strahls (**50**) erzeugt, welcher Teil entweder ein innerer Teil oder ein äußerer Teil des ersten rohrförmigen parallelen Strahls (**50**) ist.

11. Wellenlängen-Umwandlungsvorrichtung nach Anspruch 2, bei der das zweite optische System (**34**) Folgendes aufweist:
eine ringförmige Toroidlinse (**48**) zum Bündeln von Licht aus dem ringförmigen Bild (**32**) zu einem ersten rohrförmigen parallelen Strahl (**50**), und
eine dritte Zonenplatte (**60**) zum Erzeugen des nichtgebeugten Strahls (**18**) aus dem ersten rohrförmigen parallelen Strahl (**50**).

12. Wellenlängen-Umwandlungsvorrichtung nach Anspruch 11, bei der die dritte Zonenplatte (**60**) eine Phasenverschiebung φ(P) hat, definiert durch

$$\varphi(\rho) = (\Pi/\lambda)\rho^2(A^2 - B^2)/[(z_1 - z_2)\rho^2 + (z_2A^2 - z_1B^2)]$$

worin ρ die Entfernung von der optischen Achse (**6**) anzeigt, A und B Konstanten sind, λ die erste Wellenlänge ist und z_1 und z_2 die Entfernungen von der dritten Zonenplatte (**60**) zu Ausgangs- und Endpunkten des nichtgebeugten Strahls (**18**) sind.

13. Wellenlängen-Umwandlungsvorrichtung nach Anspruch 12, bei der die dritte Zonenplatte (**60**) eine Phasenverschiebung in einem Teil des nichtgebeugten Strahls (**18**) erzeugt.

14. Wellenlängen-Umwandlungsvorrichtung nach Anspruch 12, bei der das zweite optische System (**34**) aus einer einzelnen Zonenplatte (**62**) besteht.

15. Wellenlängen-Umwandlungsvorrichtung nach Anspruch 14, bei der die einzelne Zonenplatte (**62**) eine Phasenverschiebung in einem Teil des nichtgebeugten Strahls (**18**) erzeugt.

16. Generator für einen nichtgebeugten Strahl, nach Anspruch 1, bei dem das erste optische System (**30**) eine scheibenförmige Toroidlinse (**42**) aufweist, die eine Mittelachse hat und die eine parallel zu der Mittelachse gemessene Dicke hat, die mit zunehmender Entfernung von der Mittelachse zuerst zunimmt und dann abnimmt, wobei die Dicke auf der Mittelachse größer ist als an einem äußeren Rand der Toroidlinse.

17. Generator für einen nichtgebeugten Strahl, nach Anspruch 1, bei dem das erste optische System (**30**) eine erste Zonenplatte (**54**) aufweist.

18. Generator für einen nichtgebeugten Strahl, nach Anspruch 1, bei dem das zweite optische System (**34**) Folgendes aufweist:

eine ringförmige Toroidlinse (**48**) zum Bündeln von Licht aus dem ringförmigen Bild (**32**) zu einem rohrförmigen parallelen Strahl (**50**), und
eine Axikonlinse (**52**) zum Erzeugen des nichtgebeugten Strahls (**18**) aus dem rohrförmigen parallelen Strahl (**50**).

19. Generator für einen nichtgebeugten Strahl, nach Anspruch 1, bei dem das zweite optische System (**34**) Folgendes aufweist:
eine zweite Zonenplatte (**56**) zum Bündeln von Licht aus dem ringförmigen Bild (**32**) zu einem rohrförmigen parallelen Strahl (**50**), und
eine Axikonlinse (**52**) zum Erzeugen des nichtgebeugten Strahls (**18**) aus dem rohrförmigen parallelen Strahl (**50**).

20. Generator für einen nichtgebeugten Strahl, nach Anspruch 1, bei dem das zweite optische System (**34**) Folgendes aufweist:
eine ringförmige Toroidlinse (**48**) zum Bündeln von Licht aus dem ringförmigen Bild (**32**) zu einem rohrförmigen parallelen Strahl (**50**), und
eine dritte Zonenplatte (**60**) zum Erzeugen des nichtgebeugten Strahls (**18**) aus dem rohrförmigen parallelen Strahl (**50**).

21. Generator für einen nichtgebeugten Strahl, nach Anspruch 20, bei dem die dritte Zonenplatte (**60**) eine optische Achse (**6**) hat und eine Phasenverschiebung $\varphi(\rho)$ hat, definiert durch

$$\varphi(\rho) = (\Pi/\lambda)\rho^2(A^2 - B^2)/((z_1 - z_2)\rho^2 + (z_2A^2 - z_1B^2)]$$

worin ρ die Entfernung von der optischen Achse (**6**) anzeigt, A und B Konstanten sind, λ die erste Wellenlänge ist und z_1 und z_2 die Entfernungen von der dritten Zonenplatte (**62**) zu Ausgangs- und Endpunkten des nichtgebeugten Strahls (**18**) sind.

22. Generator für einen nichtgebeugten Strahl, nach Anspruch 1, bei dem das zweite optische System (**34**) aus einer einzelnen Zonenplatte (**62**) besteht.

Es folgen 10 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

FIG. 1

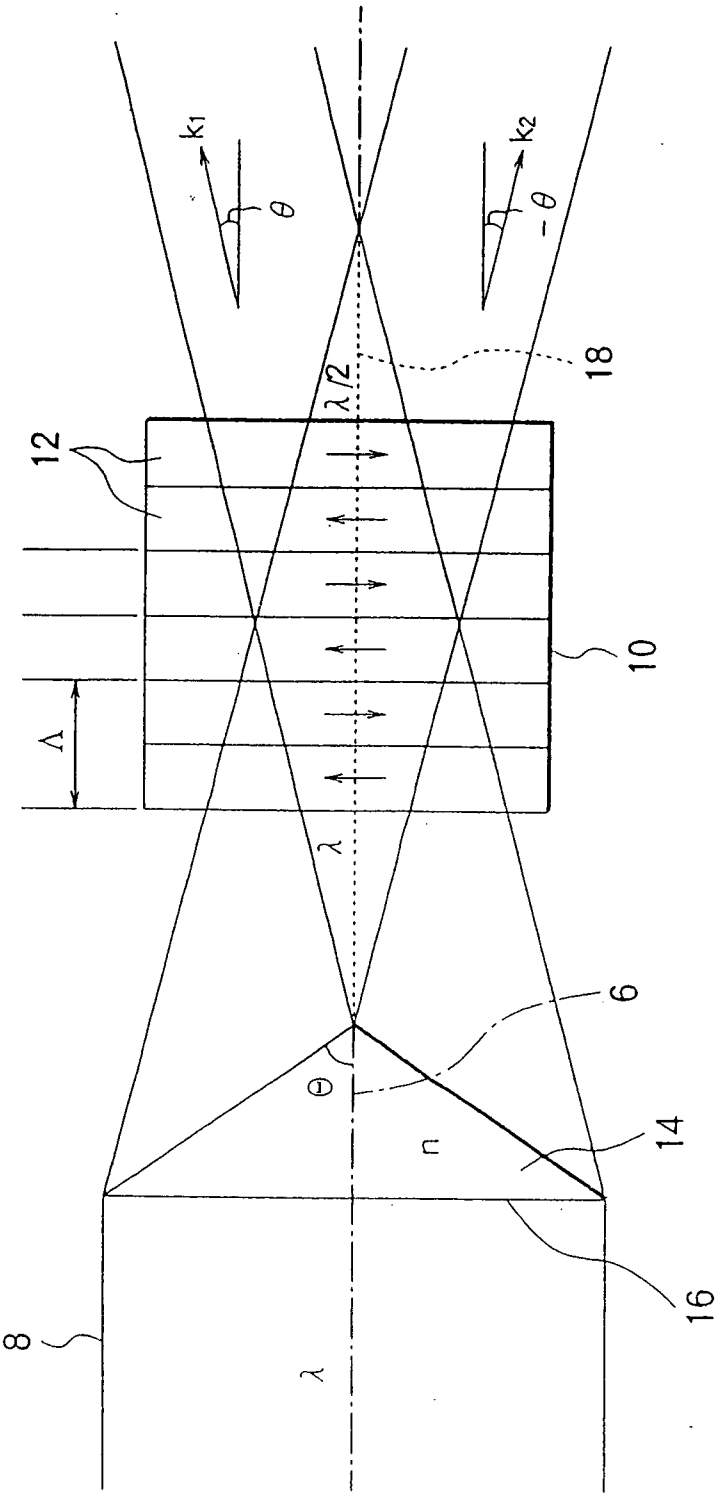

FIG. 2

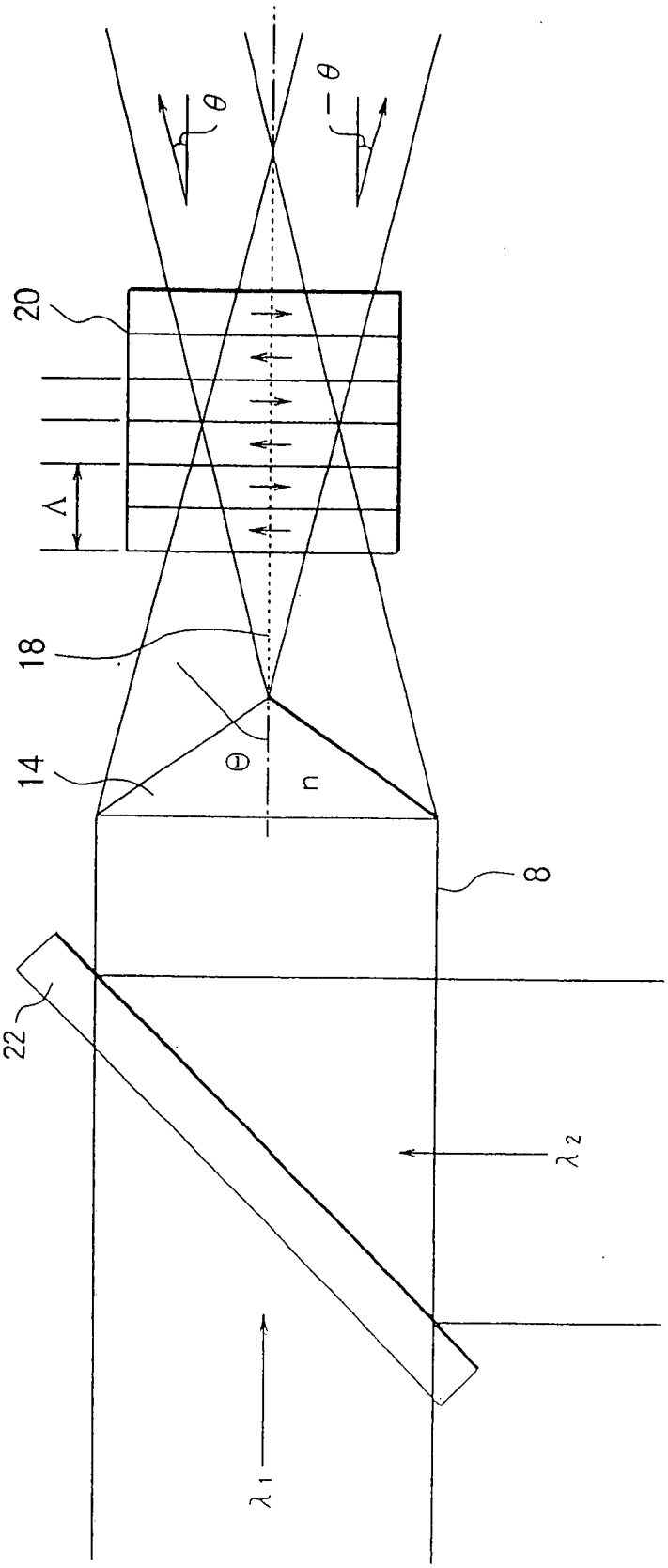

FIG. 3

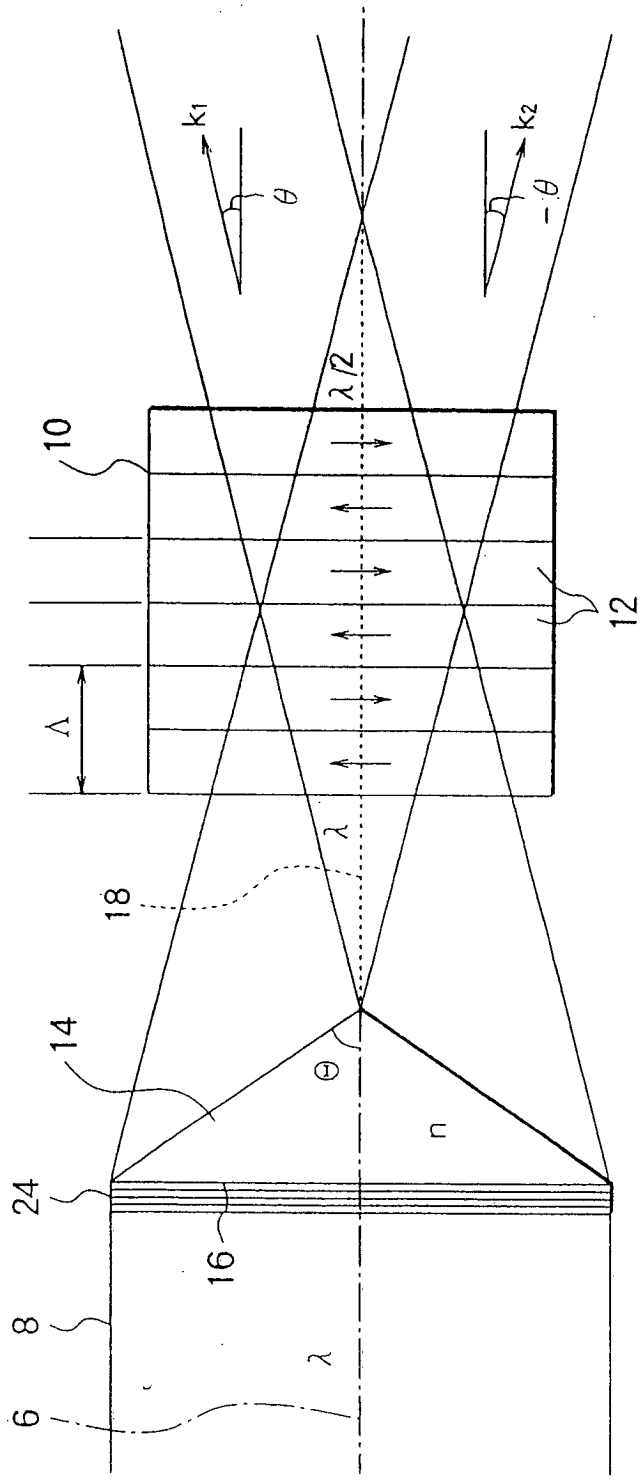

FIG. 4

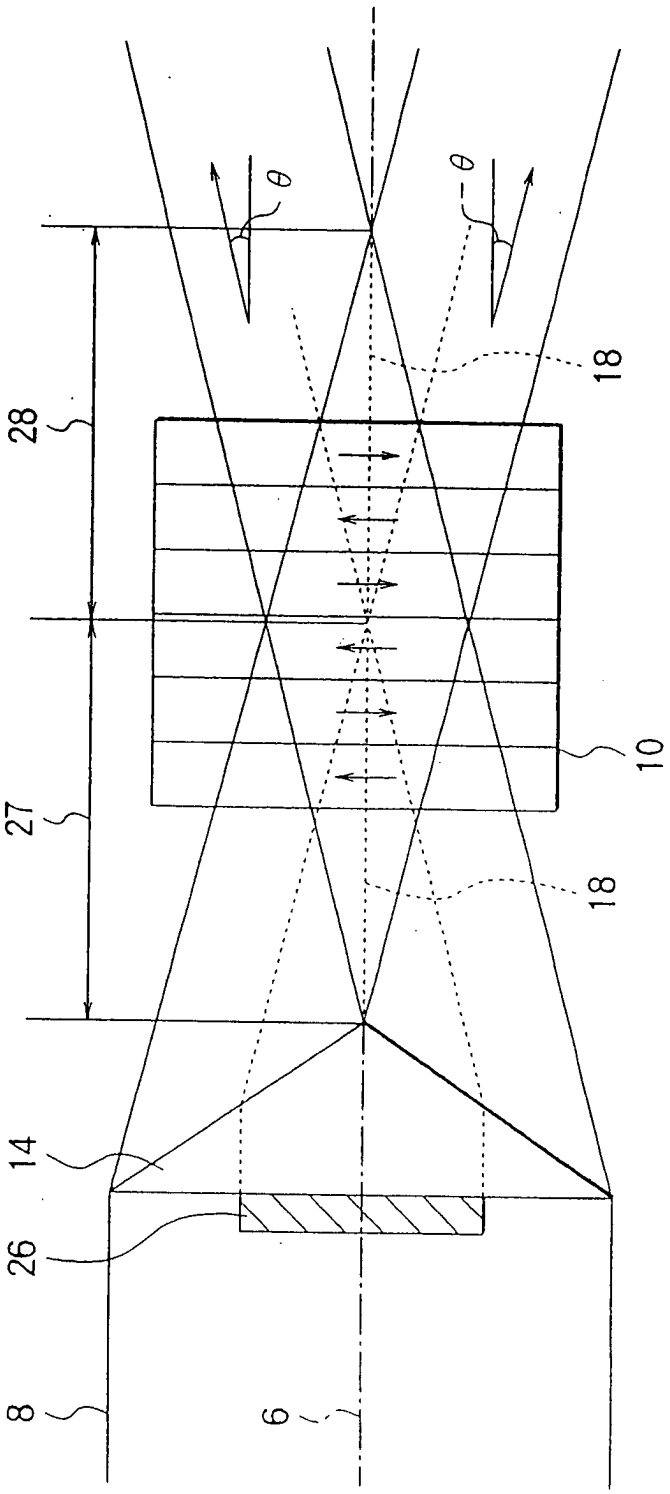

FIG. 5

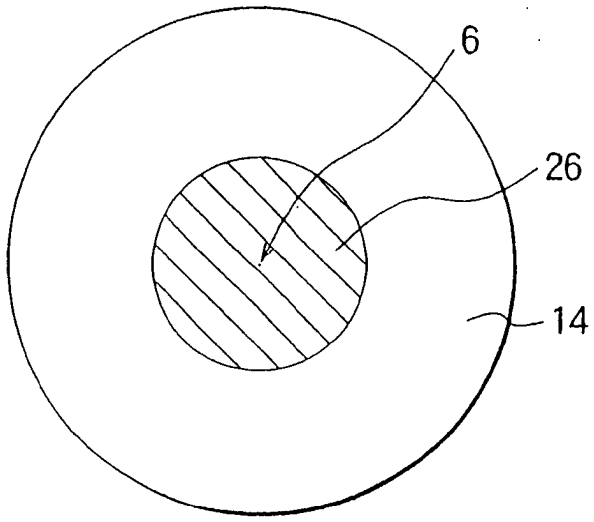

FIG. 6

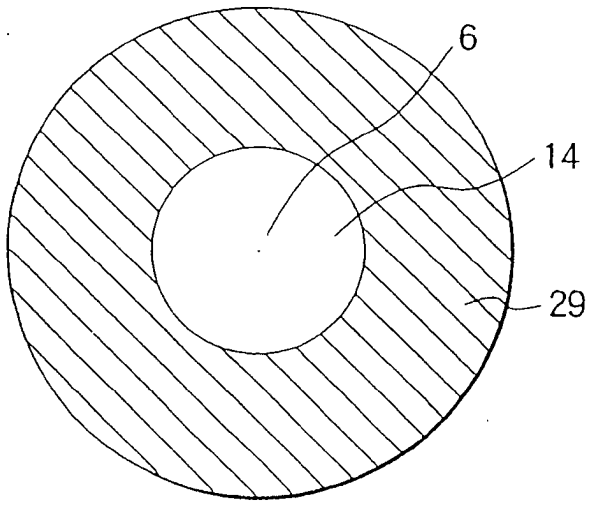

FIG. 7

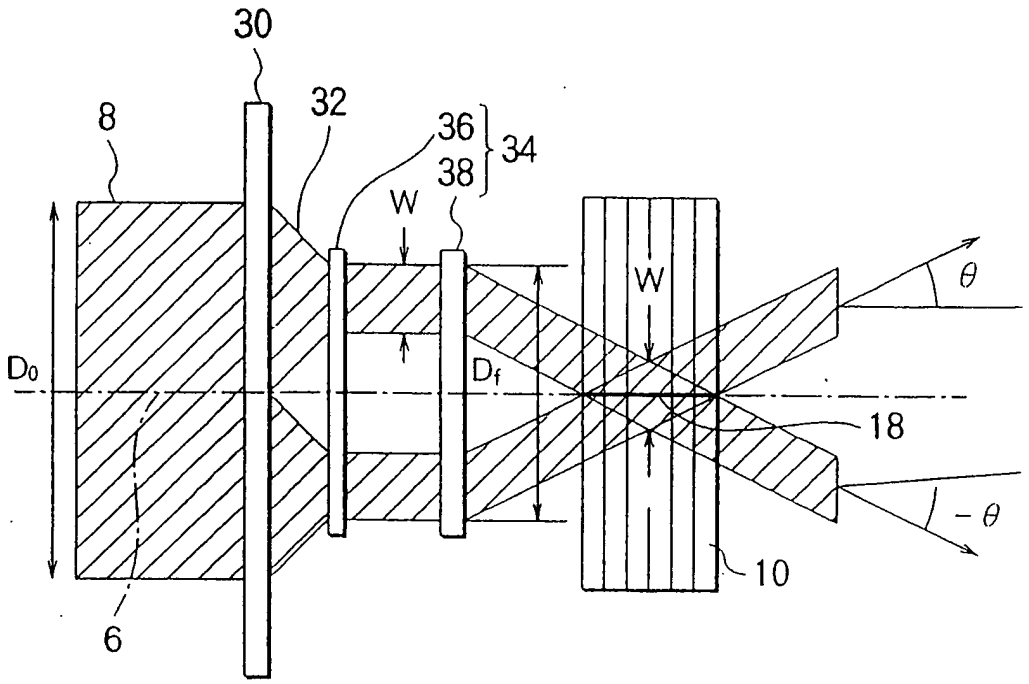
30
8
32
36
34
38
W
W
θ
D_0
D_f
18
−θ
10
6

FIG. 8

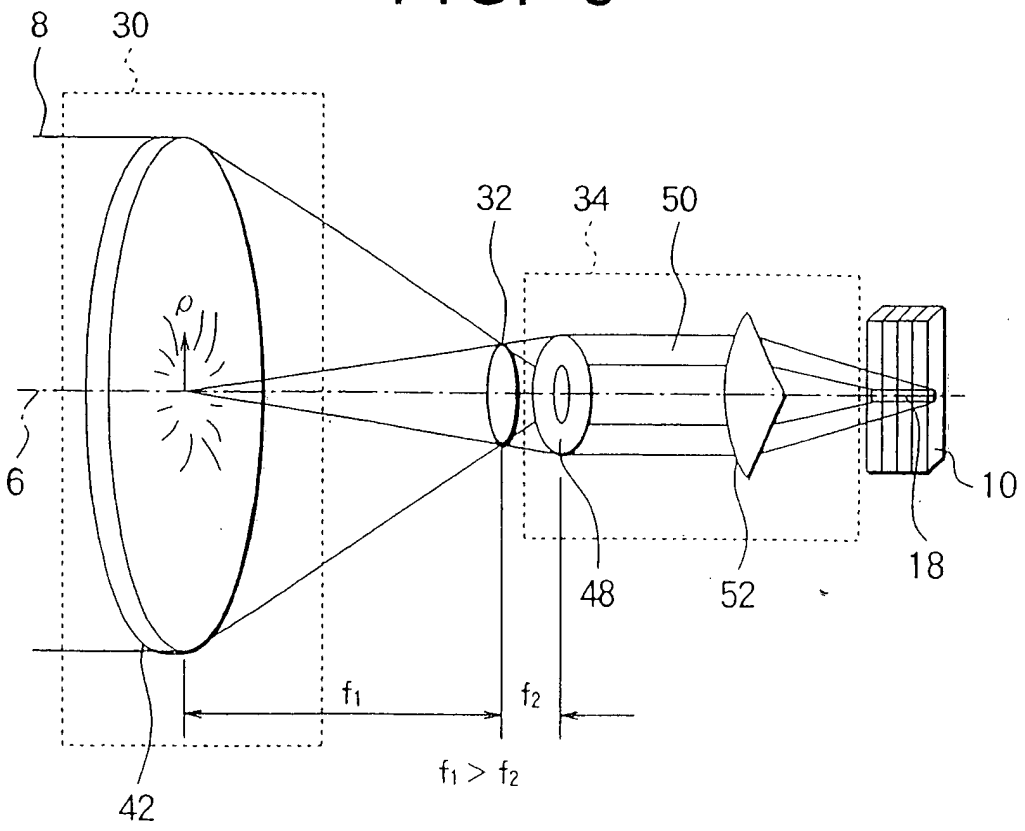
8
30
32
34
50
ρ
6
10
18
48
52
f_1
f_2
$f_1 > f_2$
42

FIG. 9

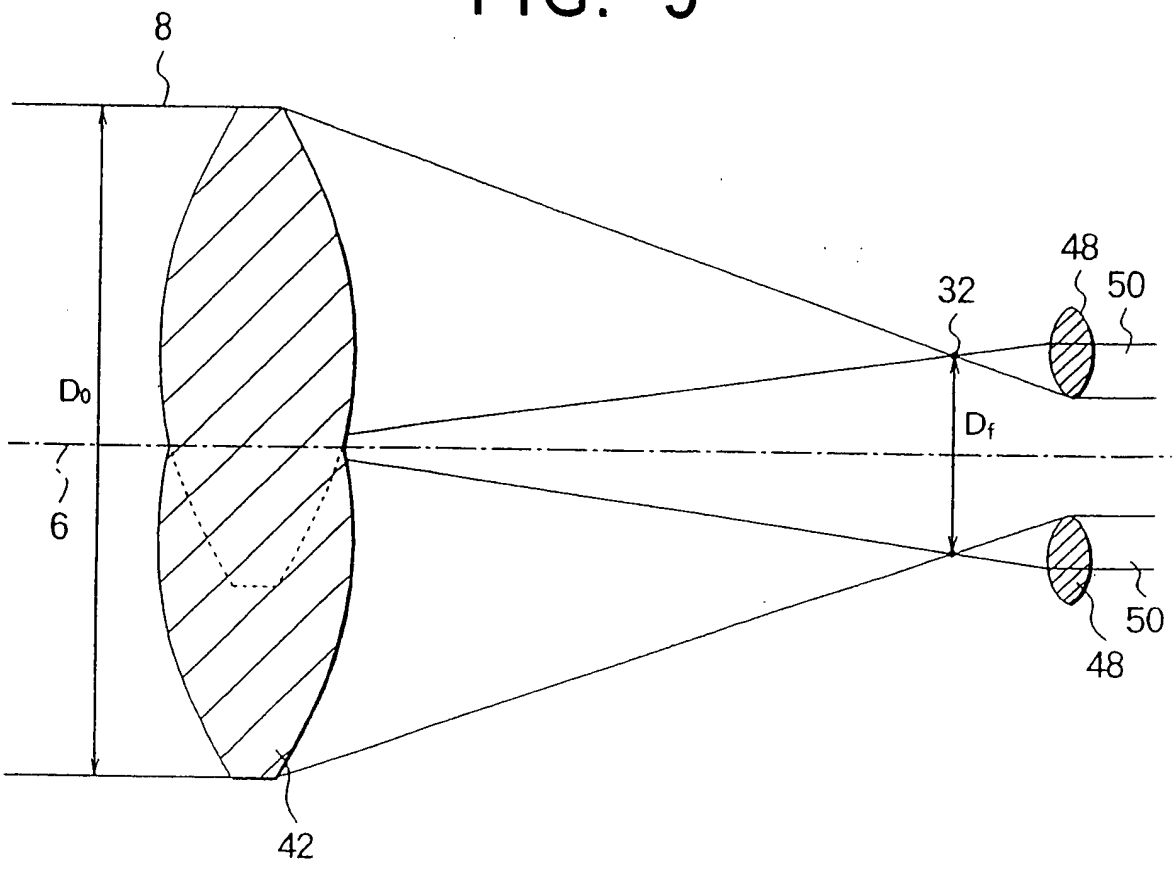

FIG. 10

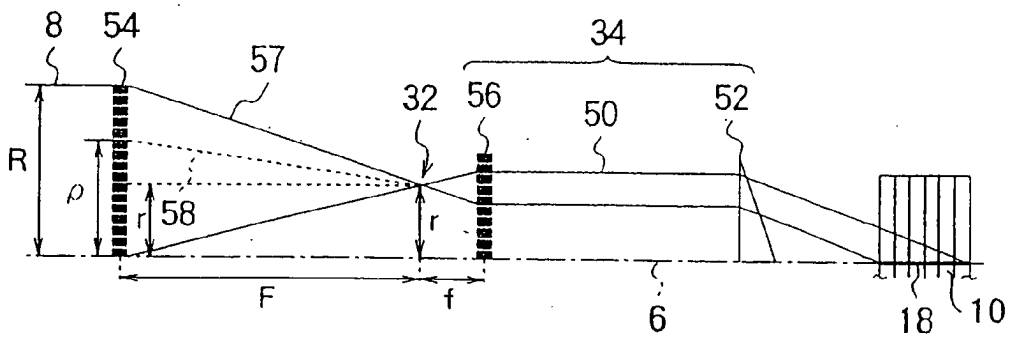

FIG. 11

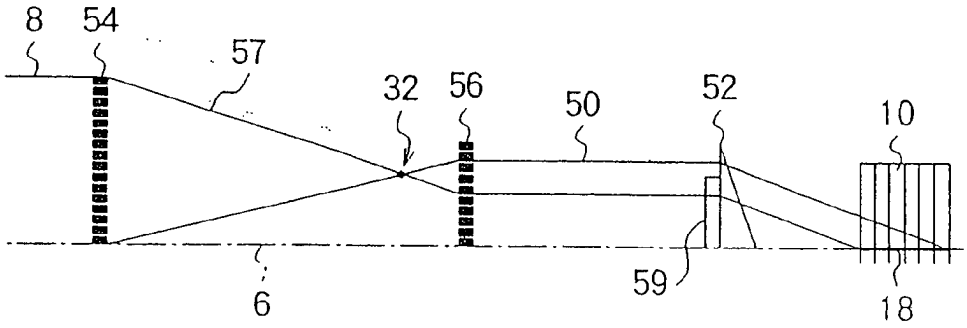

FIG. 12

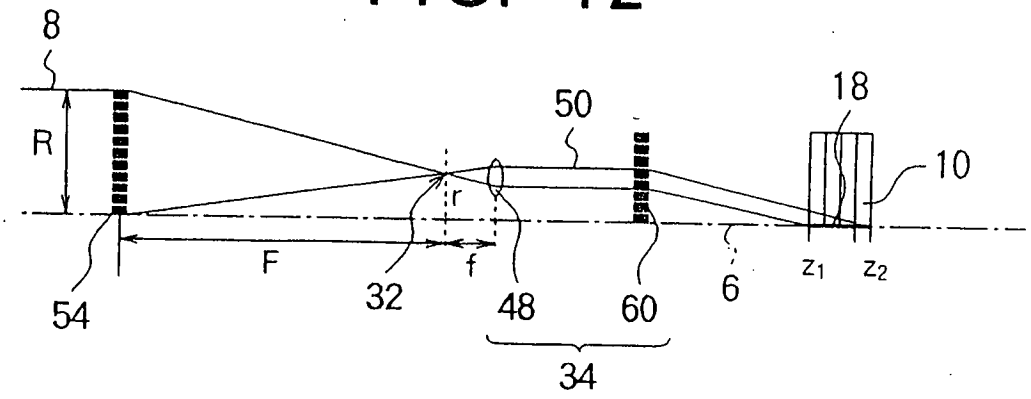

FIG. 13

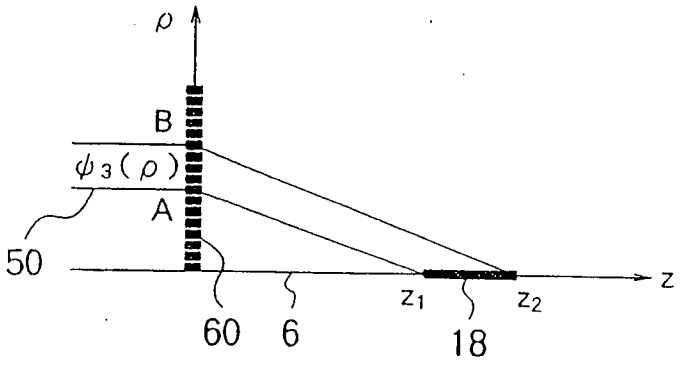

FIG. 14

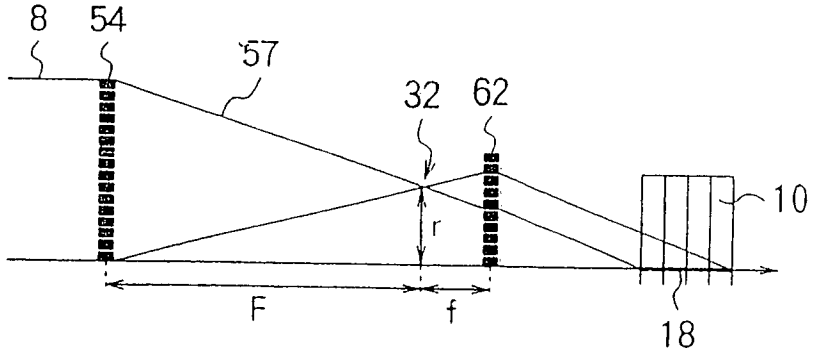

FIG. 15

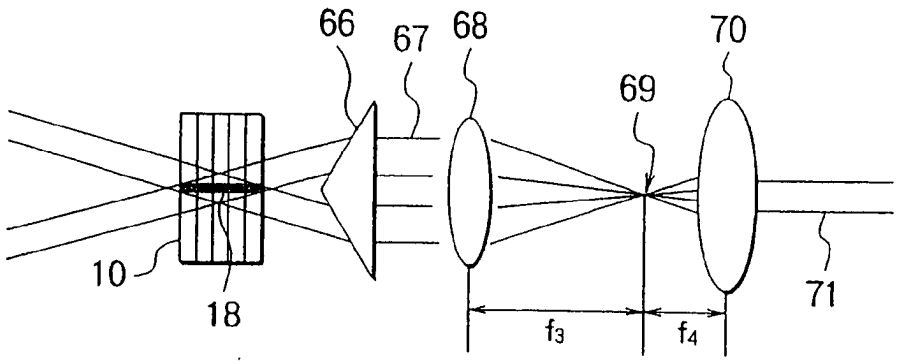

FIG. 16

