

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第3554324号
(P3554324)

(45) 発行日 平成16年8月18日(2004.8.18)

(24) 登録日 平成16年5月14日(2004.5.14)

(51) Int.C1.⁷

F 1

H O 1 S 3/05

H O 1 S 3/05

H O 1 S 3/08

H O 1 S 3/08

請求項の数 9 (全 16 頁)

(21) 出願番号 特願平6-525096

(86) (22) 出願日 平成6年4月8日(1994.4.8)

(65) 公表番号 特表平9-500494

(43) 公表日 平成9年1月14日(1997.1.14)

(86) 国際出願番号 PCT/GB1994/000748

(87) 国際公開番号 WO1994/027346

(87) 国際公開日 平成6年11月24日(1994.11.24)

審査請求日 平成13年2月27日(2001.2.27)

(31) 優先権主張番号 9309467.0

(32) 優先日 平成5年5月7日(1993.5.7)

(33) 優先権主張国 英国(GB)

(73) 特許権者

キネティック・リミテッド
イギリス国、ロンドン・エス・ダブリュ・
1・6・ティ・ディ、バッキンガム・ゲー
ト・85

(74) 代理人

弁理士 川口 義雄

(74) 代理人

弁理士 井上 滉

(74) 代理人

弁理士 一入 章夫

(74) 代理人

弁理士 大崎 勝真

(74) 代理人

弁理士 相馬 貴昌

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 ウェーブガイド・レーザ

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

第1および第2の反射手段(14、16)によって規定されるレーザ・レゾネータ空洞内にあるウェーブガイド(12)を含み、

(a) ウェーブガイド(12)が、実質上互いに平行で相互に距離 $2a$ だけ離れている、実質上平面状のガイド壁を少なくとも1対有し、

(b) 空洞は、ウェーブガイド端部開孔(20)の中心に値 $2w_0$ のビーム・ウェストが発生するように設計されており、 w_0 は $0.1a$ から $0.65a$ の範囲にあり、

(c) 第1の反射手段(14)が、ウェーブガイド(12)から発する放射線を端部開孔(20)を通して受け取る位置にあり、かつ少なくともガイド壁に直交する次元において、開孔(20)において前記のビーム・ウェスト値を有する TEM_{00} 形の振幅分布から受け取った放射線に位相合せされるようになされた収束・反射特性を有し、

(d) 空洞が、ウェーブガイド端部開孔(20)において電界を保持するように配置され、その結果、この開孔における、前記のビーム・ウェスト値を有する TEM_{00} 形の放射線振幅分布が、そこからの放射線がウェーブガイド(12)を通過して第2の反射手段(16)に到達し、戻ってきた後で再度生成されるようになされていることを特徴とする、ウェーブガイド・レーザ。

【請求項 2】

ビーム・ウェスト半径 w_0 が $0.3a$ から $0.5a$ の範囲にあることを特徴とする、請求の範囲第1項に記載のレーザ。

【請求項 3】

ウェーブガイド(12)内において の動作波長でゲインを提供するゲイン媒体をウェーブガイド(12)内に有し、ウェーブガイド(12)の断面が1辺が $2a$ の正方形で、長さが $4na^2 / (n \text{ は正の整数})$ であり、端部開孔(20)が第1の端部開孔であり、ウェーブガイド(12)が第2の端部開孔(20)をも有し、空洞が電界を第2の端部開孔(20)において保持するように配置されることを特徴とする、請求の範囲第1項または第2項に記載のレーザ。

【請求項 4】

ウェーブガイドが第1のウェーブガイド(142)であり、レーザ(10)が空洞内に第2のウェーブガイド(144)を含むことを特徴とする、請求の範囲第2項に記載のレーザ。 10

【請求項 5】

第1のウェーブガイド(142)から第2のウェーブガイド(144)へ放射線を結合する手段(148)を含み、この手段が、第1および第2のウェーブガイド(142、144)内で相互に傾いた光路を規定することを特徴とする、請求の範囲第4項に記載のレーザ。

【請求項 6】

ウェーブガイド内において の動作波長でゲインを提供するゲイン媒体をウェーブガイド(84)内に有し、第2の反射手段が、ウェーブガイド(84)にすぐ隣接した平面ミラー(82)であり、そのウェーブガイド(84)の断面が1辺が $2a$ の正方形で、長さが $2a^2 /$ あり、開孔が第1の端部開孔(88)であり、ウェーブガイドが第2の反射手段(82)にすぐ隣接して配置された第2の端部開孔(90)を有することを特徴とする、請求の範囲第1項に記載のレーザ。 20

【請求項 7】

ウェーブガイド内で の動作波長を有し、

(a) ウェーブガイド(12)が第1のウェーブガイド(142)であり、

(b) 開孔が第1のウェーブガイド(142)の2個の端部開孔のうちの一方であり、

(c) 2個の端部開孔を有する第2のウェーブガイド(144)が空洞内に配置されており、

(d) レーザ(140)が第1のウェーブガイド(142)の一方の端部開孔と第2のウェーブガイド(144)の一方の端部開孔の間で放射線を結合する手段を備えており、

(e) 両方のウェーブガイド(142、144)の断面が1辺 $2a$ の正方形で、長さが $4a^2 /$ であることを特徴とする、請求の範囲第1項に記載のレーザ。 30

【請求項 8】

放射線を結合する手段(148)が、第1および第2のウェーブガイド(142、144)内で相互に傾いた光路を規定することを特徴とする、請求の範囲第7項に記載のレーザ。

【請求項 9】

第1および第2の反射手段の少なくとも一方が、ミラーまたは回折格子(168)のどちらか一方と組み合わせて配置されたレンズ(166)を備えることを特徴とする、請求の範囲第1項から第8項のいずれか一項に記載のレーザ。

【発明の詳細な説明】

本発明はウェーブガイド・レーザに関する。

ウェーブガイド・レーザは従来技術で公知である。この種のレーザは通常、光学的レゾネータ空洞を規定する2枚のミラー(またはそれと等価な反射装置)と、リフレクタ間の光路の少なくとも一部分を規定するウェーブガイドとから構成される。このウェーブガイドは端部開孔を有し、そこまたはその近傍にリフレクタが置かれる。ウェーブガイドの曲率半径とそのウェーブガイドに対する相対位置は、下記の式(1)と(2)によって関係付けられる。

$$R = z_m + B^2 / z_m \quad (1)$$

$$w = w_0 [1 + (z^2 / B^2)]^{1/2} \quad (2)$$

上式において、

R は、それぞれのミラーの曲率半径、

z は、レーザ・ビームに沿って測定したそれぞれのミラーからそれに最も近いウェーブガイド端部開孔までの位置座標、

z_m は、それぞれのミラーにおける z の値、

B は、 $n w_0^2 / \lambda$ に等しい共焦点ビーム、

w は、ビーム強度が最大になる位置と最大値の $1/e^2$ になる位置の間で測定した、位置 z におけるビーム半径、

w_0 は、それぞれ近傍のウェーブガイド端部開孔において測定した TEM_{00} 強度プロファイルの 10 レーザ・ビームのウェスト(waist)半径、

は、ミラーとウェーブガイドの間のそれぞれの領域で測定したレーザ放射線の波長である。

式(1)と(2)は、半径 R のミラーが TEM_{00} ビームに位相合せされた状況を規定する。

ウェーブガイド・レーザのレゾネータには、従来技術でケースI、ケースII、ケースIIIと呼ばれるミラー構成が関連する。これらのケースは、上式(1)と(2)に関して定義されており、J.J.DegnanおよびD.R.Hall, IEEE, J.Quantum Electron, Vol QE - 9, pp901 - 91 20 0, 1973に記載されている。またD.R.HallおよびP.E.Jackson編 "The Physics and Technology of Laser Resonators", Adam Hilger刊の第3章 "Theory of Waveguide Laser Resonators"でも言及されている。ケースIのミラーは、曲率半径 R が大きく(場合によっては無限大、すなわち平面ミラーのこともあり得る)、 z の値が小さいもしくは0である。すなわち式(1)で z がゼロに近づくにつれて R は B^2/z に近づく。ケースIIのリフレクタは、曲率半径が大きく、その位置は、 z がほぼ R に等しくかつ B^2/z が無視できるような位置である。最後に、ケースIIIのリフレクタは、 z が R の値の約半分に等しく、 z がほぼ B に等しく、 w_0 は EH_{11} 基本ウェーブガイド・モードへの最適カップリングをもたらすように選んだものである。

ガス媒体を取り込んだウェーブガイド・レーザは、ウェーブガイドが放電のための冷却をもたらすので有利である。気体放電のスケーリング則により、ウェーブガイドでは降圧操作も可能になる。その上、特に CO_2 レーザは、動作圧の増加につれてレーザ線幅が増大し、したがってウェーブガイドの組込みにより潜在的チューニング・レンジが向上する。圧力の増加につれてレーザ線幅が増大する他のガスレーザでも同様のことがいえる。もう1つの潜在的利点は、ウェーブガイド・レーザのゲイン媒体を小寸法の光ウェーブガイドに閉じ込めることができ、そのため自由空間レゾネータに比べて非常にコンパクトにできることである。さらに、ウェーブガイドをレゾネータ・モードで有效地に充たすことができ、光フィールドとゲイン媒体の良好なオーバラップが得られる。その結果、光出力が効率的に取り出せる。自由空間レゾネータ設計のものでは必ずしもそうはない。

しかし、ウェーブガイド・レーザには、許容できる性能を得るのに十分な正確さで製造するのが難しいという欠点がある。典型的な CO_2 レーザは、長さ30cmの領域にアルミナ(Al_2O_3)のウェーブガイドを有し、その内部に一辺2mmの正方形断面のボアがついている。このような小寸法の内部ボアをウェーブガイドの全長にわたって正確に製作するのは非常に難しい。断面が不確実であると、レーザの横断モードの諸特性も不確実になる。またウェーブガイド・レーザは、基本レゾネータ・モード(通常は TEM_{00} の近傍)ではなく、望ましくない高次のレゾネータ・モードで動作する傾向があるという大きな欠点もある。ケースIの設計のものでは特にそうである。ケースIIIのものはこの点ではましであるが、凹面ミラーをウェーブガイドからずっと離して配置する必要があるという別の欠点がある。したがって、ケースIのものに比べてレーザの単位長当たりの有効出力が低くなる。

R.L.SinclairおよびJ.Tulipは、論文 "Radio Frequency Excited CO₂ Waveguide Lasers" Rev.Sci.Instrum.55 (1984), pp.1539 - 1541で、ほぼケースIに該当する2個のレゾネータを備えた正方形断面のウェーブガイドをベースとするウェーブガイド・レゾネータを記載している。このウェーブガイドは、それぞれ長さ29.5cmで1辺が2.0mmまたは2.5mmの

10

20

30

30

40

40

50

断面をもつ2個のセクションからなる。このウェーブガイドは、1辺のアルミニウムからなる壁面と残り3辺のアルミニウムからなる壁面によって規定される。リフレクタはそれぞれセレン化亜鉛でコーティングされ、ウェーブガイド開孔から2.0mmの位置にある。このレーザは、横断モードの識別があまりはっきりしないという欠点があり、レーザ放電またはレーザ光学系における振動によってレーザ出力のモード品質が劣化しやすい。

異なる形のウェーブガイド・レーザがJ.-L.BoulnoisおよびG.P.Agrawalによって“Mode Discrimination and Coupling Losses in Rectangular Waveguide Resonators”, J.Opt.Soc.Am., 72 (1982), pp.653 - 660に記載されている。これは、長さ200mmのアルミナ製ウェーブガイドと一辺2mmの正方形セクションを含んでいる。それぞれの曲率半径Rが1000mmの曲面ミラーがウェーブガイドのそれぞれの端部開孔から21mmの位置にある。このミラーは、ケースI、II、IIIのいずれにも該当しない。これらのミラーは、レーザ・レゾネータ空洞内かつウェーブガイドの外側で自由空間TEM₀₀モードに位相合せされている。この位相合せにより、ウェーブガイドの基本モードEH₁₁の励起が最大になり、TEM₀₀自由空間モードとEH₁₁ウェーブガイド・モードとの放射強度カップリングの効率が可能な限り高くなっている。このタイプのレーザは、その設計ではマルチモード・カップリングおよび伝播の効果が無視されるので、ウェーブガイドの製造誤差に対して寛容ではない。

S.N.Chirikov, S.T.Kornilov, E.D.ProtzenkoおよびM.I.Pschikovは論文“Formation Details of a Wareguide Gas Laser Intensity Distribution”, Infrared Phys., 30 (1990), p.455 - 464で、正方形断面のウェーブガイドと2枚の離れた平面ミラーとを備えるレーザ・レゾネータを記載している。しかし、モード位相シフトの研究においては、このミラーはケースIに相当するものとして扱われている。この著者等は、レゾネータ出力に対するウェーブガイドの長さを変えることの効果を調べた。具体的に言うと、様々なウェーブガイド・モードのレゾネータ・モードに対する寄与と、ウェーブガイドの長さ変化に応じたレゾネータ・モードの喪失について研究した。その結果、ミラーの位置ずれに対する感受性などある種のレーザ特性が、ウェーブガイドのフレスネル数Nに依存することが判明した。ただし、Nは a^2 / L と定義され、aはウェーブガイドの半幅、Lはウェーブガイドの長さ、Lは放射線の波長である。同様の結果が、C.A.Hill, P.MonkおよびD.R.Hall, IEEE J.Quantum Electron., Vol.QE - 23, pp1968 - 1973, 1987でも得られている。

C.A.Hillは、“Transverse Modes of Plane-Mirror Waveguide Resonators”, IEEE.J.Quantum Electron., QE - 24 (1988), pp.1936 - 1946で、平面ミラーを備えた正方形断面のウェーブガイドの理論について論じている。この種のレーザでは、ウェーブガイドの製造誤差に対する感度を上げることなしに、低い喪失と良好なモード識別を併せ得るのは難しいことが判明している。

また、円形ボアのウェーブガイドを備えたレーザを使用することも公知である。このレーザは、F.P.Rouillard IIIおよびM.BassによってIEEE J.Quantum Electron., Vol.QE - 13, pp.3684 - 3690, 1977に記載され、またM.Lyszyk等によってOpt.Commun., Vol.36, pp.327 - 330, 1981に記載されている。一般に円形ボア・ウェーブガイド・レーザは、レーザの出力モード特性が高性能の応用分野に十分なほど良好ではないという欠点がある。その上、円形ボア・ウェーブガイドは、平面状の平行壁面を有するウェーブガイドに比べて正確に製作するのがずっと難しい。

レーザ軸に沿って進み、遠視野における軸上強度が高い、出力ビームを発生することが、多くのレーザの非常に重要な要件である。これは、出力が、そのTEM₀₀強度プロファイルの単一ロープの中心がレーザ軸上にある、基本空間モードでなければならないことを意味する。これを確実に実現するのは一般に難しい。レーザは2種またはそれ以上の出力モードを発生することがあり、それらのモードは異なる周波数である可能性がある。また、軸外れのビーム・ロープを有する出力モードを発生することもある。その上、見かけ上同一のレーザが異なる出力を発生することがあり、また1つのレーザがウォームアップ中にあるいは周囲条件の変化により突然に単一ロープから多重ロープに変化することもある。レーザを含む大部分の光学系は、レーザ・ビームがレーザ軸に沿って進むように設計されているので、多重ロープ・パターンは、大部分の目的に有用でない。さらに、軸外れのレーザ

10

20

30

40

50

・ビームは、放射線が恐らくは光学系から外れた設計外の方向に進むため、潜在的に危険である。

本発明の目的は、別の形のウェーブガイド・レーザを提供することにある。

本発明は、第1および第2の反射手段によって規定されるレーザ・レゾネータ空洞内にあるウェーブガイドを含み、

(a) ウェーブガイドが、実質上互いに平行で相互に距離 $2a$ だけ離れている、実質上平面状のガイド壁を少なくとも1対有し、

(b) 空洞は、ウェーブガイド端部開孔の中心に値 w_0 のビーム・ウェストが発生するよう設計されており、 w_0 は $0.1a$ から $0.65a$ の範囲にあり、

(c) 第1の反射手段が、ウェーブガイドから発する放射線を端部開孔を通して受け取る位置にあり、かつ少なくともガイド壁に直交する次元において、開孔において前記のビーム・ウェスト値を有する TEM_{00} 形の振幅分布から受け取った放射線に位相合せされるようになされた収束・反射特性を有し、

(d) 空洞が、ウェーブガイド端部開孔において電界を保持するように配置され、その結果、この開孔における、前記のビーム・ウェスト値を有する TEM_{00} 形の放射線振幅分布が、そこからの放射線がウェーブガイドを通過して第2の反射手段に到達し、戻ってきた後で再度生成されるようになされていることを特徴とする、ウェーブガイド・レーザを提供する。

本発明は、基本モードにおける TEM_{00} モードの含有量が従来技術よりも高い、出力ビームを提供できるという利点をもたらす。また、特定の実施例においては、製造誤差に対するより大きな非感受性を示すことができる。また、望ましくないウェーブガイド入力エッジ効果が回避され、したがって高次モードの不相応な減衰も回避されるという利点を有する。

好ましい実施形態においては、ビーム・ウェスト半径 w_0 は $0.3a$ から $0.65a$ の範囲にある。すなわち、このレーザは、ウェーブガイド内においての動作波長でゲインを提供するゲイン媒体をウェーブガイド内に有し、ウェーブガイドの断面は1辺が $2a$ の正方形で、長さは $4na^2 / (n$ は正の整数)であり、開孔は第1の端部開孔であり、ウェーブガイドは第2の端部開孔をも有し、空洞が電界を第2の端部開孔において保持するように配置されている。

このウェーブガイドを第1のウェーブガイドとして、レーザが空洞内に第2のウェーブガイドを含むこともできる。レーザは第1のウェーブガイドから第2のウェーブガイドへ放射線を結合する手段を含むこともでき、この手段は、第1および第2のウェーブガイド内で相互に傾いた光路を規定することができる。

またレーザは、平面ミラーを備える第2の反射手段を含むこともできる。そのウェーブガイドの断面は1辺が $2a$ の正方形で、長さは $2a^2 /$ とすることができます、開孔を第1の端部開孔とし、ウェーブガイドが第2の反射手段にすぐ隣接して配置された第2の端部開孔を有することもできる。

本発明のレーザのもう1つの実施形態においては、

(a) ウェーブガイドが第1のウェーブガイドであり、

(b) 開孔が第1のウェーブガイドの2個の端部開孔のウェーブガイドであり、

(c) 2個の端部開孔を有する第2のウェーブガイドが空洞内に配置されており、

(d) レーザが第1のウェーブガイドの一方の端部開孔と第2のウェーブガイドの一方の端部開孔の間で放射線を結合する手段を備えており、

(e) 両方のウェーブガイドの断面が1辺 $2a$ の正方形で、長さが $4a^2 /$ であり、

(f) 空洞が第2のウェーブガイドの他方の端部開孔において電界を保持するように配置されている。

この別の実施形態では、放射線を結合する手段は、第1および第2のウェーブガイド内で相互に傾いた光路を規定することができる。

本発明がより完全に理解できるように、次に添付の図面を参照しながら、その実施の形態について説明する。

10

20

30

40

50

第1図は、同一の2枚の凹面レゾネータ・ミラーを組み込んだ、本発明のウェーブガイド・レーザの概略側面図である。

第2図は、第1図のレーザのウェーブガイド内における電界強度分布を示す図である。

第3図および第4図は、それぞれ平面レゾネータ・ミラーと凹面レゾネータ・ミラーを組み込んだ、本発明のウェーブガイド・レーザの概略側面図である。

第5図は、ウェーブガイド内の TEM_{00} 伝達の忠実度をウェーブガイドの長さの関数としてプロットしたグラフである。

第6図は、レゾネータの往復損失をレーザ内にウェーブガイドの長さの関数としてプロットしたグラフである。

第7図は、レーザ・ビームのウェスト位置に対するウェーブガイドの長さの変化の効果を示す概略図である。 10

第8図は、光学的に結合した2個のウェーブガイドを組み込んだ、本発明のレーザの概略図である。

第9図は、レンズと格子の組合せを組み込んだ、本発明のレーザの概略側面図である。

第10図は、2枚のレンズと1枚の平面ミラーで光学的に結合した2個のウェーブガイドを組み込んだ、本発明のレーザの概略側面図である。

第1図を参照すると、総括的に10で示される本発明のウェーブガイド・レーザの断面図が示されている。レーザ10は正確な縮尺で示されているものではない。レーザ10には第1および第2収束ミラー14および16の間に配置された光ウェーブガイド12（以下、「ガイド」と呼ぶ）が組み込まれている。ミラー14および16はそれぞれ全反射鏡と部分反射鏡である。ガイド12とミラー14および16は共通光軸18を有しており、該光軸は図面の面にある。 20

導波管12は一辺が $2a$ （=2mm）の方形断面を有する中空のアルミニウム・チューブである。その長さは L で、以下の式で与えられる。

$$L = 4a^2 / \quad (3)$$

ただし、 L はガイド12内で測定したレーザ作動波長である。

レーザ10は $10.59 \times 10^{-4} \text{ cm}$ という自由空間波長で作動するように設計されている。ガイド12内のCO₂媒体の反射率はほぼ1に等しく、したがって、ガイド内の波長 λ はその自由空間値に等しくなる。式(3)から計算されるように L は37.8cmである。

ミラー14および16の曲率半径はそれぞれ R_1 および R_2 であり、本例では、両方とも29cmである。これらミラーはそれぞれのガイド端部開孔20および22から、それぞれ距離 z_1 および z_2 だけ離隔している。本例において、 z_1 および z_2 は両方とも4.7cmである。レーザ10は軸18に対して直角な面内で強度プロファイルが TEM_{00} で、以下の式で定義される放射線を発生するように設計されている。 30

$$I_r(z) = I_0(z) e^{-2r^2/w^2} \quad (4)$$

ただし、

$I_r(z)$ はウェーブガイドから軸18に沿って距離 z のミラー14または16とウェーブガイド12の間の任意の平面における放射線強度である。

$I_0(z)$ は軸18上の点 z で測定した放射線強度である。

r は $I_r(z)$ を決定した点の軸18からの半径方向距離である。

w は軸方向位置 z におけるレーザ・ビーム半径であり、 $I_r(z)/I_0(z)$ が e^{-2} となる r の値と定義される。これはガイド12とミラー14または16の間の距離の関数である。 40

レーザは第1および第2ガイド端部開孔20および22のそれぞれにおいて、かつこれらと同心状に設計半径 w_0 （直径 zw_0 ）の2つの最小ビーム幅（ビーム・ウェストと呼ぶ）を発生するように設計されている。これらの開孔は鎖線24および28で示され、かつ図面の面に対して直角に延びている平面24および28内にある。設計ビーム・ウェスト直径 zw_0 は、便宜のため以下にもう一度示す式(1)によるミラーの曲率およびミラー・ガイド間隔に関連づけられている。

$$R = z + B^2/z \quad B = w_0^2 / \quad (1)$$

第1図の例において、 $R = R_1 = R_2$ である。 50

Bを消去する。

$$R = Z + \frac{\pi^2 w_0^4}{z \lambda^2} \quad (5)$$

式(5)にR、zおよび λ を代入すると、次式が得られる。

$$w_0 = 0.6\text{mm} \quad (6)$$

レーザ10はしたがって、面24および28内に設計ビーム・ウェスト半径0.6mm(1.2mmの直径 $2w_0$)を有する放射線30を発生するように設計されている。ウェーブガイド直径に対する設計ビーム・ウェスト直径の比 w_0/a は0.6である。すなわち、 $w_0 = 0.6a$ である。 10

各ミラー14または16の曲率半径Rはそれぞれの平面z4またはz8に置かれ、端部開孔20または22を中心とする強度プロファイルがTEM₀₀の平面波面によってそれぞれのミラーに生じる概念上の球面波面と正確に位相が合うように選択される。1次の近似に対して、ガイド開孔20または22におけるTEM₀₀ガウス波面は、ミラー14または16にほぼ球面の波面を生じる。各ミラーはしたがって、それぞれの場合に、入射波面を横切る入射放射線の再帰反射を発生する。このような球面波面を受光した場合、各ミラー14または16はしたがって、それぞれのガイド開孔20または22へ、ほぼ完全に位相が逆転されたビームを返し、該ビームは該当する開孔でTEM₀₀平面波形を再度作成する。上述のように、第2のミラー16は部分反射を行うものであり、これを透過することによって、出力ビーム32が増加する。

それぞれのガイド開孔20または22からの各ミラー14または16の距離zは、それぞれの場合に、関連する開孔とミラーの間に大幅な回折を、したがって、レーザ・ビームの散乱をもたらすように選択される。このような回折は、一部は有利なモード選択特性によるものであって、開孔20または22から出て、ミラー14または16から該当する開孔へ戻るTEM₀₀モードの好ましい再発生を含んでいる。関連するTEM₀₀モードはミラーが式(1)にしたがって選択されている設計ビーム・ウェスト w_0 を有している。ビーム・ウェストが w_0 と等しくないモードのミラー14または16によって反射された後の再発生は精度が低く、通常は関連する共振モードに対して高い損失をもたらす。本発明によれば、Rは5B以下、2B以上でなければならない。ただし、Bは式(1)のコンフォーマル・ビーム・パラメータである。これによって、妥当なコンパクトさのレーザと組み合わされた、上述のような認容可能な回折特性がもたらされる。本発明のレーザはしたがって、事例I($R > > B, z < < B$)および事例II(z およびRは両者とも $>> B$)の両方の外部のものとなる。 30

後で詳述するが、ガイド12は開孔20または22の一方において、他方のガイド開孔22または20に対する任意の電界振幅分布入力を再現するが、ただし、入力分布がガイドの対称モードだけに存在していることを条件とする。軸上の位相のあった平面波は対称モードだけに存在している。結果として、基本共振モード(他の態様におけるものではないが)の形態に関して、レーザ共振器10は実質的に、平面24および28が一致するまで、ガイド12を除去し、ミラー14および16と一緒に除去したかのようにして挙動する。さらに、ミラー14および16は、開孔20または22にビーム・ウェストを有するTEM₀₀強度プロファイルのビームであって、相対的な横方向位相および振幅プロファイルを変化させずに、それぞれのミラー14および16によって該当する開孔へ戻されるビームをもたらすように設計された曲律半径および位置を有している。これはそれぞれの場合に式(1)を満たすミラー半径 R_1 および R_2 を与え、かつ曲率中心(図示せず)がガイドの軸18上にあるミラー14および16を設けることによって達成される。すなわち、ガイド12とミラー14および16は十分に整合した同軸系を形成する。式(1)はR、zおよび λ の所与の値に対する設計ビーム・ウェスト半径 w_0 を決定する。 40

ガイド12とミラー14および16の配置および寸法の正味の効果は、選択されたレーザ・ビーム・ウェストを有するTEM₀₀ビームに対するレーザ10の損失が比較的少ないが、それ以外の場合には、比較的高いことである。ガイド12内のCO₂レーザ媒体が励起された場合、損失対利得比が最も高い共振モードが、発生するレーザのモードである。より高い利得/損失比の他のレーザ空間モードは抑制される。本発明のレーザは基本疑似TEM₀₀モードであ

る、損失の最も少ないモードである。

ガイド12内でのきわめて高次の空間モードの伝播を回避し、ガイド開孔20および22におけるエッジ効果を回避することが有効であることが判明した。これを達成するためには、開孔20および22の縁部における放射線強度を各ビーム・ウェストにおける軸18上の最大強度の1%未満にしなければならない。このことは0.65という開孔サイズに対するビーム・ウェストの比、すなわち w_0/a に対する上限を設定する。このような上限は開孔縁部における TEM_{00} ビームの入力放射線強度を最大軸上ビーム強度の1%未満とする。

比 w_0/a が0.1以上であるが、0.65以下である場合には、ガイド12内でのきわめて高次の空間モードの励起がわずかなものとなる。すなわち、mおよびnが11以上であるガイド・モード EH_{mn} の励起はとるに足らない程度となる。 w_0/a が0.3以上で、0.65以下である場合、 EH_{77} を超えるガイド・モードの強度は総放射線強度の0.5%未満となる。きわめて高次のガイド・モードを避けるのが有利であるが、これはこれらのモードがガイド12に沿って伝播する際に不釣り合いに大きな減衰を被るからである。これらのモードは低次のモードよりも強くガイド壁と相互に作用する。これは電界の再生性を低下させる位相誤差を導く。結果として、このようなきわめて高次のモードを、開孔22または20のそれぞれに当初入力された電界分布の開孔20または22における再生に対して適正な相対比で利用することができなくなる。入力開孔サイズに対する入力放射線ビーム・ウェストの比 w_0/a は、したがって、きわめて高次のモード($m, n > 11$)の励起を判別するのに適当なものでなければならぬ。 w_0/a はしたがって、受光する EM_{77} 超のモードを総放射線強度の1%未満とするためには、0.1ないし0.65の範囲、好ましくは0.3ないし0.65の範囲でなければならない。本発明の装置は0.4ないし0.55の範囲の w_0/a を有しているのが有利である。

装置10において、 w_0/a は0.6、 R_1 および R_2 は29cm、 z_1 および z_2 は4.7cmである。したがって、式(1)は満たされる。このウェスト・サイズを特徴とし、ミラー14および16のいずれかに向かってガイド12から出る TEM_{00} 電界強度分布は、ほとんど変化することなく、ガイドに戻される。これは関連するミラーの不完全度およびこれらミラーにおけるエッジ効果を無視したものであるが、これらは適切な直径のミラーの場合、実用上ほとんど影響を及ぼさない。さらに、開孔20および22の一方でガイド12に進入する電界分布は、他の開孔において大幅な変化を受けることなく再生され、他のミラーに伝わって再帰反射され、以前と同様ガイド12を通って戻るように設計されている。

ここで、第2図を参照すると、ガイド12に沿って1回通過した際の放射線の伝播による横方向電界強度分布の、ガイドの長さLに沿ったいろいろな点において計算されたプロットが示されている。本図において、長手方向座標zはガイド12に沿って測定されており、0およびLという値はそれぞれの端部開孔面24および28におけるものである。プロットには40ないし48という参照符号が付けられており、ガイド12に沿ったL/8という間隔に対応している。すなわち、プロットNは(N-40)L/8というzの値における横方向電界強度分布I(x,y)である。ただし、Nは40ないし48の範囲のプロット参照番号である。

プロット40は第1ミラー14から第1ガイド開孔20で受光した TEM_{00} 形式の入力励起を示す。この入力励起はガイド12のモードの線形の組合せに分解される。上述したように、対称モードだけが励起される。モードは異なる速度でガイド12に沿って伝播する。すなわち、モードの分散が生じる。その結果、zがL/2であるガイド12の中間点において、強度分布はモード間に生じる位相差によるモード間干渉によって生じる4ロープのパターン44を有するようになる。zがLであるガイド12の遠端において、対称モードは再度位相が合い、40に等しい單一ロープの強度分布48まで増加する。入力強度分布40はしたがって、第2ガイド開孔22において48として再生成される。

作動時に、レーザ共振器で発生する放射線は共振器のキャビティを複数回通過して生じる。これはキャビティを往復するために位相および振幅を合わせて反復するつじつまのあつた電界を確立する。レーザ10は放射線が第2開孔22から單一ロープの疑似 TEM_{00} モードとして第2ミラー16へ伝播し、かつ一部が透過し、一部が反射されて、出力ビーム32をもたらすように設計されている。したがって、このビームはほぼ單一のロープのものであり、レーザ軸18上で強度が最大となっている。第2ミラー16で反射された放射線はビーム30の

10

20

30

40

50

経路を戻る。ビームはガイド12内で強度分布48ないし40を逆の順序で再生成してから、第1ミラー14に達し、再度戻る。本発明の重要な利点は、出力ビームが疑似TEM₀₀モードで生じることであるが、これはこのことが装置の軸18上で最も強度の高い単一ロープの放射線をもたらすからである。高次の共振モードは軸から外れたロープを生じ、これはほとんどの光学的用途に余り役にたたず、有害なことすらある。

方形断面ガイド12の電界再生特性は矩形ウェーブガイドの一般的な伝播特性から生じるものである。後者のウェーブガイドは高さが2a、幅が2bであり、複素誘電率 ϵ を有する一様な誘電体を境界としている。また、この誘電体（ウェーブガイドの壁となる）が反射率が高く、必要な伝播モードに対して大幅な減衰を行わないものとする。ウェーブガイドの高さ、幅、および長さはそれぞれx、y、およびz軸と平行である。これはEH_{mn}という正規化された線形偏光モードを有している。点(x, y, z)におけるmn番目のモードEH_{mn}の電界寄与EH_{mn}(x, y, z)はAppl.Opt.Vol.15, No.5, 1334 - 1340においてLaakman他によって次のように計算されている。

$$E_{mn}(x, y, z) = \frac{1}{\sqrt{(ab)}} \left[\cos\left(\frac{mnx}{2a}\right) \right] \left[\cos\left(\frac{n\pi y}{2b}\right) \right] e^{iY_{mn}^z} \quad (6)$$

ただし、

mはx軸に沿った電界依存性に関するモード番号である。

nはy軸に沿った電界依存性に関するモード番号である。

zはz軸（第1図の軸18と同等である）に沿った距離である。

$\lambda_{mn} = (\omega_{mn} + i\beta_{mn})$ はmn番目のモードの伝播定数であり、 ω_{mn} および β_{mn} はmn番目のモードの位相および減衰係数である。

上下におかれたcosおよびsinは前者が奇数のモード番号（適宜、mまたはnである）に適用され、後者が偶数のモード番号に適用されるものである。

位相係数 ω_{mn} は次式で与えられる。

$$\beta_{mn} = \frac{2\pi}{\lambda} \left[1 - \left\{ \left(\frac{\lambda m}{4a} \right)^2 + \left(\frac{\lambda n}{4b} \right)^2 \right\} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (7.1)$$

式(7.1)のかっこ内の負の項が、低次のモードについて実用上満足のいく1（近軸放射線近似）に比較して小さい場合には、二項定理を使用して、式(7.1)を次のように書き直してもよい。

$$\beta_{mn} = \frac{2\pi}{\lambda} \left[1 - \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{\lambda m}{4a} \right)^2 + \left(\frac{\lambda n}{4b} \right)^2 \right\} \right] \quad (7.2)$$

ただし、a、b、mおよびnは上記で定義した通りであり、 λ はウェーブガイド内を伝播する放射線の自由空間波長である。

式(6)は矩形ウェーブガイドのすべての線形偏光モードから得ることのできる電界寄与を表している。各モードの電界寄与が矩形ウェーブガイドの側壁、すなわち、y = +bまたは-b（ただし、軸18の同等物においてy = 0である）においてゼロであることに基づいて計算される。この式は反射性の側壁を有する矩形ウェーブガイドについて、少なくとも近似的に満たされる。必ずしもすべてのウェーブガイド・モードが所与の入力で励起されるわけではない。第1図の装置10の場合、ガイド12は方形断面のものであるから、矩形ウェーブガイドの特別な場合である。ガイド12は開孔20および22からTEM₀₀形式の入力を受け取る。この入力励起はガイド12の各種のEH_{mn}モードに結合される。入力TEM₀₀の電界分布E₀は、その結果として、複素複数キャビティ係数A_{mn}を有するEH_{mn}モードの線形の組合せに分解される。これは次のように表される。

10

20

30

40

50

$$E_G = A_{mn} \cdot E H_{mn} \quad (8)$$

本質的に、 A_{mn} 振幅結合係数はガイド開孔20または22のいずれかにおける電界を表すフーリエ級数の係数である。 $E H_{mn}$ モードは互いに直交しており、その結果、係数 A_{mn} を矩形ウェーブガイドの場合、次式の形態である重なりの積分によって計算することができる。

$$+ b - a$$

$$A_{mn} = \int_{-b}^{+b} \int_{-a}^{+a} E_G \cdot E H_{mn} \cdot d y \cdot d x. \quad (9)$$

式(7)ないし(9)より、励起ガイド・モードの振幅係数が w_0/a 、すなわち開孔サイズに対するビーム・ウェストの比が関数としてどのように変化するかを計算することができる。

式(7.2)を用いて、矩形ウェーブガイド内でのモードの分散、およびこれによって生じる電界再生現象を実証することができる。式(7.2)で $m = 1$ 、 $n = p$ と置くと、ガイド・モード $E H_{1p}$ の位相係数 β_{1p} は次のようになる。

$$\beta_{1p} = \frac{2\pi}{\lambda} \left[1 - \frac{1}{2} \left\{ \left[\frac{\lambda}{4a} \right]^2 + \left[\frac{\lambda p}{4b} \right]^2 \right\} \right] \quad (10)$$

また、ガイド・モード $E H_{1q}$ の位相係数 β_{1q} は次のようになる。

$$\beta_{1q} = \frac{2\pi}{\lambda} \left[1 - \frac{1}{2} \left\{ \left[\frac{\lambda}{4a} \right]^2 + \left[\frac{\lambda q}{4b} \right]^2 \right\} \right] \quad (11)$$

式(10)から式(11)を引いて、まとめると、ガイド長 z におけるモード $E H_{1p}$ と $E H_{1q}$ の間の位相差は、次式で与えられる x_z となる。

$$x_z = \beta_{1p} - \beta_{1q} = \frac{\pi \cdot \lambda \cdot z}{16 \cdot b^2} \cdot (p^2 - q^2) \quad (12)$$

モード間に2の位相差が存在する必要があるという条件を加えると、式(12)は次式のようになる。

$$x_z = \frac{\pi \cdot \lambda \cdot z}{16 \cdot b^2} \cdot (p^2 - q^2) = 2\pi \quad (13)$$

また、モード $E H_{1p}$ と $E H_{1q}$ の間の2の位相差に増加する矩形ウェーブガイドにおける式(13)の伝播距離 z (たとえば、 z_2)は次式で与えられる。

$$z_2 = \frac{32 \cdot b^2}{(p^2 - q^2) \cdot \lambda} \quad (14)$$

$E H_{11}$ および $E H_{1n}$ モード(すなわち、基本モードと n 次の奇数モード)の場合、 z_2 は次式で与えられる。

$$z_2 = \frac{32 \cdot b^2}{(n^2 - 1) \cdot \lambda} \quad (15)$$

10

20

30

40

50

式(2)と(13)を組み合わせると、次のようになる。

$$z_{2\pi} = \frac{B L'}{(n^2 - 1)}, \text{ ただし } L' = 4 b^2 / \lambda \quad (16)$$

$n = 3, 5, 7, 9, 11\dots$ の場合、 z_2 は、 $L', L'/3, L'/6, L'/10, L'/15\dots$ となる。これは矩形ガイドの EH_{1n} モードの間には調和関係があることを示している。式(16)は基本 EH_{11} モードと次の最高次の EH_{13} モードとの間の位相シフトを2に増加させる伝播距離 z_2 が、基本モードとすべての他の EH_{1n} モード(n は奇数である)との間の位相シフトも2に増加させることを示している。これによって、距離 z_2 後の任意の対称入力電界が再生される。ただし、偶数番号の EH_{1n} モードの励起がないことを条件とする。十分な長さのウェーブガイドを利用する場合には、対称入力電界が $t z_2$ (ただし、 t は整数である)の距離で周期的に発生する。10

同様なことを矩形ウェーブガイドの直交次元のモード(モード番号 m)に適用されることを示すことができる。すなわち、 m が奇数である対称モードだけを励起した場合、これらのモードはウェーブガイドの長さ $4a^2 /$ (ただし、 $2a$ はモード番号 m の方向でのウェーブガイドの断面の範囲(幅または高さ)である)においても互いに位相が合うことになる(位相差 $2r$ 、 $r = 0, 1, 2, \dots$)。ガイド12は辺が $2a$ (すなわち、 $a = b$)、長さ $L = 4a^2 /$ の方形断面のものである。このガイドは各開孔20または22においてそれぞれのミラー-14または16から疑似 TEM_{00} の入力を受け取る。この入力は、したがって、対称モードのみを励起する(m および n は両方とも奇数である)。ウェーブガイド内の1点で位相が合っている対称モードは、式(16)によりこの点から L の倍数離隔した位置においても位相が合っている。その結果、式7.2からの逸脱および異なるモードの減衰の差が大きくなることを条件として、ガイド12に対する、軸上にあり、開孔20および22の一方における電界分布入力はこれらの開孔の他方において再生される。ただし、ガイドの対称モードだけが励起されることを条件とする。20

ここで、第3図を参照すると、総括的に60で示される本発明のウェーブガイド・レーザの他の実施例が示されている。レーザ60は第1図の実施例と同等であるが、一方の凹面ミラー-14がガイド64にきわめて近接されて配置された平面ミラー-62と置き換えられている。ガイド64および凹面ミラー-66は同一の寸法を有しており、互いに關して、第1図の同等な要素12および16と同様に配置されている。30

平面ミラー-62のガイド64からの離隔距離は5mm未満である。したがって、これは上記で定義した事例Iミラーのクラスに属するものである。凹面ミラー-66は事例Iでも、事例IIでも、事例IIIでもない位置におかれている(第1図の場合と同様である)。該ミラーは媒体フィールドにおいて位相のマッチしたミラーである。

レーザ60は第1図を参照して記載されたものと同様に作動する。第1のガイド端部開孔68に集中された TEM_{00} 強度分布は位相の合致した凹レンズ66へ回折し、第1の開孔68に戻される。ガイド64は、実用的な目的でガイドから全く分離されていない平面ミラー-62に隣接する第2の端部開孔70でこの電界分布を再生する。従って、第2の開孔70における電界分布は第1の開孔68において再形成され、更なる光学的往復が始まる。40

第4図を参照すると、80により示されている本発明の別のウェーブガイドレーザが示されている。ウェーブガイド・レーザ80は全反射平面ミラー-82、ガイド84および部分反射凹ミラー-86を有する。レーザ80は、ガイド84の長さが $2a^2 /$ であり、前述の同様のガイド64の半分であることを除いて、図4を参照してまさに記載されたとおりである。レーザ60とレーザ80の類似性を考慮して、作動上に相違のみが以下に論議される。ガイド84は、式(1)と図2の名称を用いて、 $L/2$ の長さである。ガイド84は従って第1の端部開孔(右手)88における準- TEM_{00} の強度分布を第2の端部孔90において4ロープ強度分布に分割する。後者の分布は図2において44に示される。平面ミラー-82における逆反射により4ロープ強度分布は第1の孔88における単一ロープ準 TEM_{00} 強度分布を再形成する。平面ミラー-82の逆反射はガイド84の有効な長さを二倍にし、従って準 TEM_{00} 強度分布はガイド内の L また50

は $4a^2/$ の光路長にわたり再形成される。平面ミラー82が部分的に反射するのであればレーザ80は4ロープ出力を提供する。

図5を参照すると、12、64、84のごときガイドの伝送特性を示す計算により得られた二つのグラフが示されている。ガイド断面は辺2mmの正方形であり、放射波長は前述の実施例のように10.59ミクロンである。 $TEM_{0,0}$ の伝送忠実度はガイドの長さの関数として表される。“伝送忠実度”的言葉は、水平軸上の関連位置により示されたガイド長の伝送後の $TEM_{0,0}$ モードの出力中に存在する入力強度の割合として定義される。入力放射はガイド入力開孔においてビーム・ウエスト w_0 を有すると考えられ、出力放射はガイド出力開孔において疑似ビーム・ウエストを有すると考えられる。損失はアルミナのガイド壁を基礎に評価された。グラフ100および102から、ビームウエスト対ガイド開孔の比 w_0/a はそれぞれ0.3および0.5であることが考えられる。グラフ100および102は、 $2a = 2\text{mm}$ および $= 10.59$ に対し $4a^2/$ または L であるガイド長37.8cmにおいて集中された各ピーク104および106の伝送忠実度が95%を越えることを示している。これはガイド長 L の $TEM_{0,0}$ モードの再生の正確さを証明する。

第6図を参照すると、レーザの内部光路の一往復のレーザ放射を行ったウェーブガイドレーザ・レゾネータ共振器における、ガイド長さの関数として理論的に計算した損失が図解されている。第1図において、往復とは、空洞ミラー14及び16の間のレーザ共振器を2回通過すること(行きと戻り)であり、往復は、 $2(Z_1 + Z_2 + L)$ の長さである。

グラフ110に示された往復損失は、最低のオーダの共振モードに関するものである。グラフ112に示された往復損失は、2番目のオーダの共振モードのものである。

グラフ110は、ガイド長さがそれぞれ18.9cmと37.8cmとの付近の広い範囲の値に対して、最低のオーダの共振モードに対しては、往復損失が低く、10%より小さいことを示している。これらのガイド長さは、第4図及び第3図における、ガイド84及び64のものであり、それぞれ $2a^2/$ と $4a^2/$ に対応する。 $n = 3, 4 \dots$ として $2na^2/$ のガイド長さに対しても、同様の結果を得ることができる。グラフ110は、ガイド長さが $2a^2/$ の倍数であれば、往復損失は、ガイド長さが不正解であっても影響されないことを示している。さらに、ガイド長さは、 $a^2/$ に関係しているので、ガイドの断面が多少不正解であっても、往復損失に影響を与えない。 $2ma^2/$ ($m = 1, 2, 3 \dots$)に等しい L を有する本発明のウェーブガイド・レーザは、相当の許容範囲内で製造が不正解であっても、実質的に單一ロープで軸に沿った出力を生成することが保証されるので、このことは、本発明の主要な利点である。ガイドの断面の誤差に対して、本発明が相対的に影響されないことは、2mm角の範囲のガイドの場合には、特に重要である。というのは、20cm又は40cmの範囲のガイド長さにわたって、このような小断面の精度を維持することは、非常に困難だからである。例えば、断面の不正確さが5%、すなわち、幅が $100\mu\text{m}$ 変化すれば、式(3)によって、ガイド長さの10%の誤差(3.8cm)に相当する。

グラフ110と112とは、ガイド長さの18.9cmと37.8cmとの範囲において、はっきり分離しており、往復損失の差は5%の範囲である。この結果、18.9cmの約±10%及び37.8cmの約±5%の範囲内のガイド長さに対して、レーザの作用は、グラフ110が関係する、より低い損失の基本共振モードで優先的に発生し、好ましいモードの識別が得られる。同様な見解は、 $2a^2/$ の倍数よりも大きなガイド長さの許容範囲を減少させることにも当てはまる。

第7図を参照すると、ガイドの長さが異なる第1、第2及び第3のウェーブガイドレーザ120a、120b及び120c(120と総称する)の概略図が示されている。上記レーザはそれぞれ、ガイド121a、121b及び121c(121と総称)と、集光する空洞ミラー122a/123a、122b/123b及び122c/123cを有している。線124a、124b及び124cは、強度が最大強度の $1/e^2$ の割合になる放射強度の輪郭線を示している。ガイド121は、面2aの内部断面が四角形である。第1のガイド121aは長さが $12a^2/$ であり、第2のガイド121bはこれより短く、第3のガイド121cはこれより長い。125aのような、強度輪郭線の分離度が最大の縦方向位置は、121aのようなガイドの長さの横方向面にあり、強度が4ロープパターンに分割される境界がある。126a及び127aのような輪郭線の分離度が最小の縦方向位置では、レーザビームのウエストが起こる、すなわち横方向強度パターンが单一口径でウェーブガイドの軸上にある

10

20

30

40

50

。

第7図は概略図であり、ガイド120の長さの差は、はっきりさせるために誇張されているが、122a/123a等のミラー対で規定されるレーザ空洞内の放射強度分散を大きく変えることなく、ガイド長さを変化させることができることを示している。

しかしながら、ガイド長さを変えた結果、最も外側のビームのウエスト位置126b及び126cは、それぞれのガイド121b及び121cの外側及び内側になる。これは、ガイド長さの精度が悪くなると、ガイド開孔面（すなわち第1図の20又は22）における設計位置からビームのウエスト位置がシフトすることを示している。これによりビームのウエストのサイズも多少変更される。ガイド長さはガイド断面の四角形の幅に式(18)のように比例するので、ガイド断面の精度が悪いとビームのウエスト位置のシフトに影響がある。その結果、ビームのウエストの位置及びサイズは製造誤差により設計値から変化するので、ビームのウエストの位置及びサイズは単に設計値として規定することが可能である。ミラー位置の誤差についても同様の所見を適応する。10

第8図に、符号140で全体を表す本発明のウェーブガイドレーザの他の実施例を示す。この実施例は、第1、第2、及び第3の凹形ミラー146、148、150に加えて第1及び第2のガイド142、144を有する。レーザ140は、重ね合わされ、互いに結合された2つのレーザ10と等価であり、一方のガイド142または144から他方のガイド144または142に放射を反射させる傾斜した第2のミラー148を備えている。ミラー146、148、150の中の一つは部分反射ミラーであり、他の2つは全反射ミラーである。もし、第1及び第3のミラーのいずれかが部分反射ミラーであれば、レーザ出力ビームはそこから現れる。もし、第2のミラー148が部分反射ミラーであれば、相互に傾斜している2つの出力ビームが存在し、各ビームはそれぞれのガイドと同軸であり、他方のビームに対し位相が固定されている。20

第9図に、符号160で全体を表す本発明の更なる実施例を示す。この実施例は凹形ミラー162、ガイド164、レンズ166、及びレーザビーム170に対し、リトロー角度だけ傾いた回折格子168を有する。は下記の式

$$= \sin^{-1} (\lambda / 2d) \quad (17)$$

で与えられ、ここで λ はレーザ波長であり、 d は格子のラインの間隔である。

レンズ166と格子168の組み合わせは、実質的に位相の整合した第1図のミラー16に等価な逆反射ミラーとして機能する。位相の整合は、前に述べた理由及びビーム170に対する格子の傾斜という理由から精密なものではない。ミラーと等価なレンズ・格子の組み合わせは、レーザの分野では周知であり、これ以上の説明は行わない。30

第10図には、第8図を参照して記述した実施例と等価な本発明の実施例が全体的に180にて示されている。第8図の実施例と該実施例との相違は、前者の実施例における傾斜した第2ミラー148が後者においては2つのレンズ182、184と傾斜した平面ミラー186とに置き換えられていることである。第10図に示される実施例は第8図に示される同等物と同一の第1及び第2の凹面ミラー188、190と第1、第2のウェーブガイド192、194とを有する。これは凹面ミラーと均等なレンズと平面ミラーとの組み合わせの例である。更なる変更は、レンズと曲面ミラーの組み合わせである。

ガイド12、64、142、144、164、192、194は全て正方形の断面を有している。 $2a \times 2b$ ($b > a$) の側面を有する矩形断面を有するガイドを使用することも可能である。この場合、電界保存を得るために、ガイド長 L 、ガイド幅、ガイド内の波長の間の関係は、パラメータ b 及び a の両方に關し同時に満足させられなければならない。従って、内部寸法 $2a \times 2b \times L$ の矩形断面ガイドに関しては、40

$$L = 4 m b^2 / \lambda = 4 n a^2 / \lambda \quad (18)$$

$$\therefore b / a = \sqrt{(n / m)} = \sqrt{n} \quad (m = 1 \text{ の場合})$$

$$(19)$$

式19は、矩形ガイドの横寸法 $2b$ 、 $2a$ が整数比の平方根となる比を有しているならば、式1850

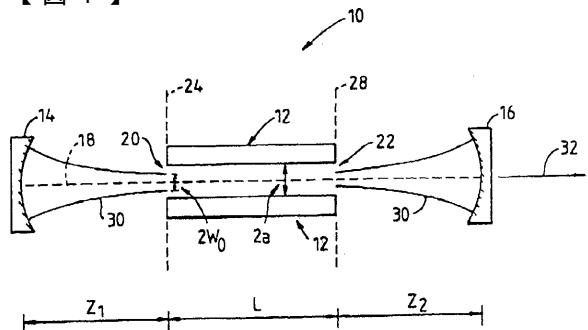
に従う矩形ガイドが電界を保持することを示している。そのようなウェーブガイドを使用するレーザのレーザビーム・ウエストの半径 w_0 は側面 $2b$ の幅寸法において $0.1b$ から $0.65b$ の範囲であり、側面 $2a$ の幅寸法において $0.1a$ から $0.65a$ の範囲であることが要求される。第4図の装置 80 に類似のレーザにおいて、式18及び19と等価な式は、以下の通りである。
 $L = 2 \text{ m } b^2 / \lambda = 2 \text{ n } a^2 / \lambda$ (20)

$$b/a = \sqrt{(n/m)} \quad (21)$$

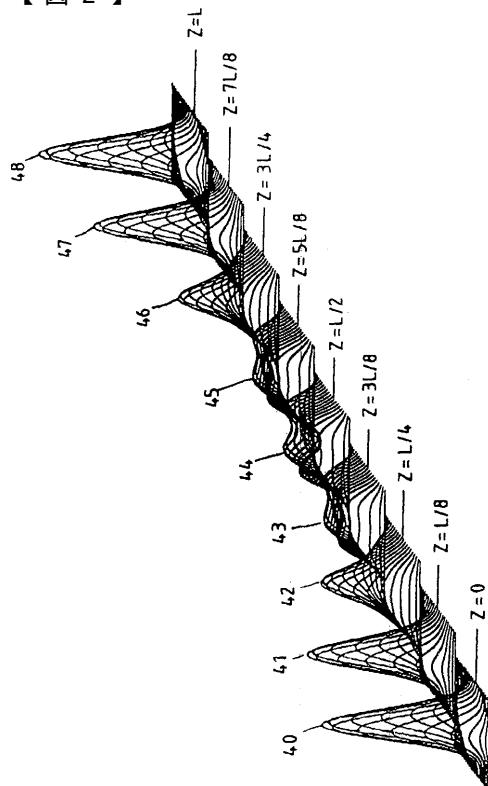
本発明のレーザにおいて、一次元のガイドを使用することも可能である。そのようなガイドは2つの実質的に平坦な壁を有し、これらの壁は実質的に互いに平行である。壁は、一つの横方向の次元に関し、ウェーブガイドを与える。直交する横方向の次元にはガイド壁又はウェーブガイド効果は無く、この次元においては、レーザは反射手段とゲイン媒体是有するがガイドを有さない従来の自由空間レゾネータとして働く。この実施例では、ビーム・ウエストでの強度分布はレーザの光学軸の回りでの回転に関し対称ではないので、レーザビーム・ウエスト($2w_0$)の大きさは最小ビーム幅として解釈すべきである。

更なる実施例として、本発明のレーザは、本発明に従い、1つの横方向次元においては形成されるが、他の次元においては形成されなくともよい。この実施例では、1つの横方向次元のミラーとガイドの幾何学的配置は前述した一次元の場合におけるのと同じである。他の横方向次元においては、レゾネータの幾何学的配置は先行技術のレーザ配置におけるものと同じであってもよい。例えば、1次元の場合のガイド壁とは等価的に位置しないガイド壁をふくんでもよい。

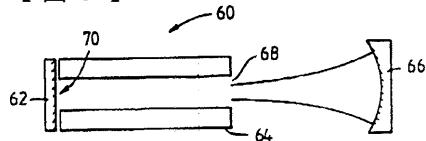
【図1】



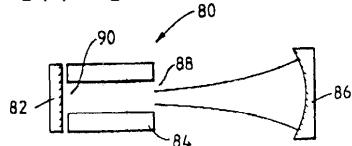
【図2】

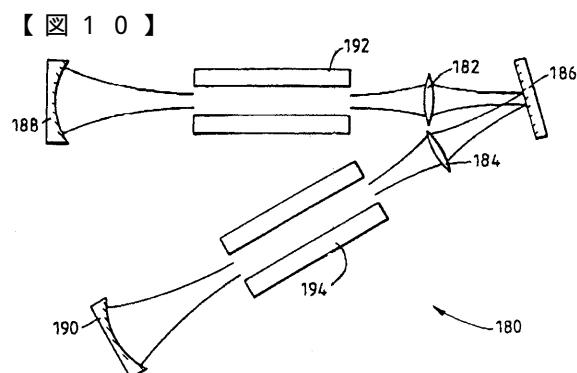
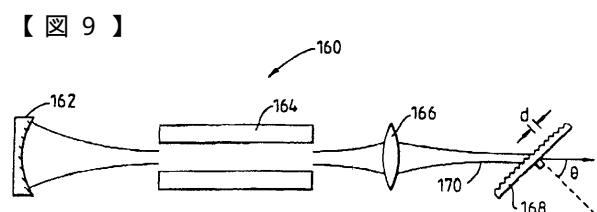
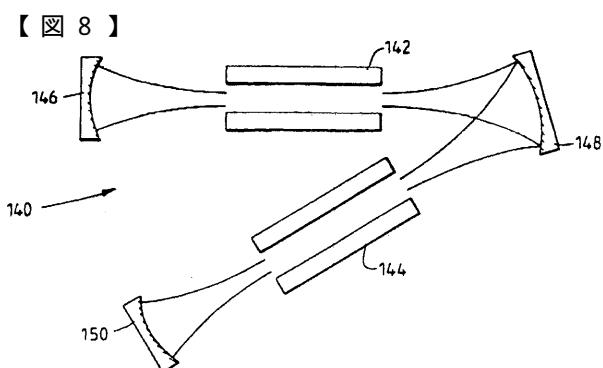
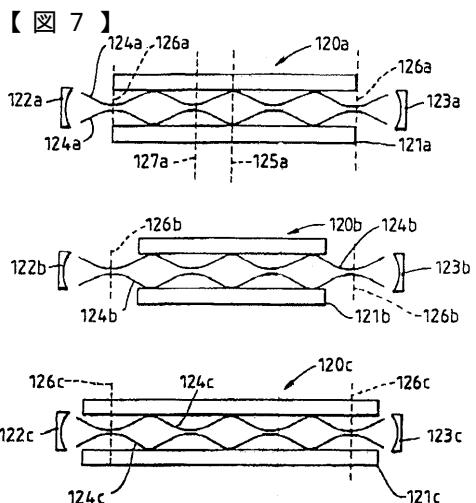
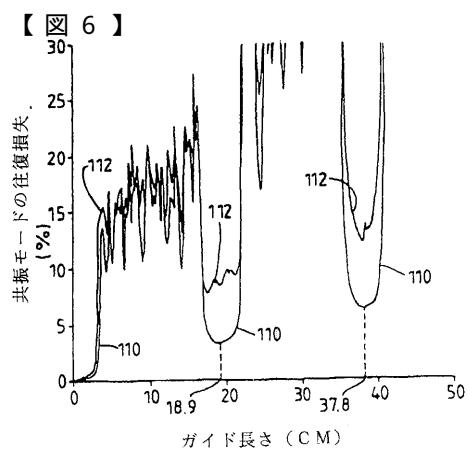
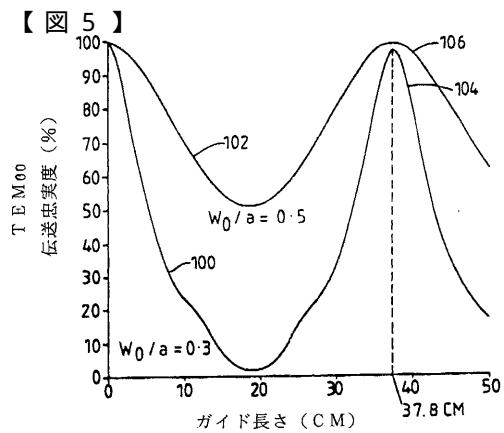


【図3】



【図4】





フロントページの続き

(72)発明者 ジエンキンス , リチャード・マイケル
イギリス国、ウスター・シヤー・ダブリュ・アール・14・3・ピー・エス、マルバーン、セント・
アンドリュース・ロード、デイフエンス・リサーチ・エージェンシー(番地なし)

(72)発明者 ヒル , クリストファー・アレクサンダー
イギリス国、ウスター・シヤー・ダブリュ・アール・14・3・ピー・エス、マルバーン、セント・
アンドリュース・ロード、デイフエンス・リサーチ・エージェンシー(番地なし)

審査官 柏崎 康司

(56)参考文献 特開昭56-055085(JP,A)
特開平03-071683(JP,A)
特開平04-233288(JP,A)
米国特許第3961283(US,A)
欧州特許第698306(EP,B1)
IEEE Journ.of Quantum Electronics, 1977年10月, QE13/10, 813-818
J.Opt.Soc.Am., 1982年 7月, 72/7, 853-860
Infrared Phys., 1990年, 30/6, 455-464
Journal of Modern Optics, 1990年, 37/4, 473-481
IEEE Journal of Quantum Electronics, 1988年 9月, 24/9, 1936-1946
Applied Optics, 1985年 5月 1日, 24/9, 1283-1289
IEEE Journal of Quantum Electronics, 1990年 2月, 26/2, 323-328
IEEE Journal of Quantum Electronics, 1987年11月, qe-23/11, 1968-1973
IEEE Journal of Quantum Electronics, 1990年 2月, 26/2, 323-328
IEEE Journal of Quantum Electronics, 1988年10月, 24/10, 1976-1980

(58)調査した分野(Int.Cl.⁷, DB名)

H01S 3/00-3/30