

(19)日本国特許庁 (J P)

(12) 特 許 公 報 (B 2)

(11)特許番号

第2981543号

(45)発行日 平成11年(1999)11月22日

(24)登録日 平成11年(1999)9月24日

(51)Int.Cl.⁶

識別記号

F I

H 0 1 S 3/30

H 0 1 S 3/30

A

G 0 2 F 1/01

G 0 2 F 1/01

C

H 0 1 S 3/0959

H 0 1 S 3/09

C

請求項の数4 (全 6 頁)

(21)出願番号 特願平9-293819

(22)出願日 平成9年(1997)10月27日

(65)公開番号 特開平11-135861

(43)公開日 平成11年(1999)5月21日

審査請求日 平成9年(1997)10月27日

(73)特許権者 591006335

金沢大学長

石川県金沢市角間町(番地なし)

(72)発明者 山田 実

石川県金沢市寺町4丁目5番10号

(74)代理人 弁理士 杉村 暁秀 (外8名)

審査官 河原 正

(56)参考文献 特開 昭56-50591 (J P, A)

特開 平2-106726 (J P, A)

特開 昭63-240091 (J P, A)

電子情報通信学会技術研究報告 V o

1. 197 N o. 360 p. 39-44 電気

学会 自由電子レーザ調査専門委員会編

「自由電子レーザとその応用(1990年8

月18日) コロナ社 p. 1-5

(54)【発明の名称】 電子管型一方向性光増幅器

(57)【特許請求の範囲】

【請求項1】 電子ビームを放射する電子放射部と、該電子放射部から放射される電子ビームを利用して光を一方向に増幅する増幅部とを真空中に配置して成る電子管型一方向性光増幅器であって、

前記増幅部は、電子ビーム走行部が形成されるように所定距離離間させて配置した2枚の波形状鏡より成り、該増幅部の電子ビーム走行方向には、増幅すべき光を入力される光入力部と、該光入力部から出射する光を前記電子ビームから受けたエネルギーを利用して一方向に増幅する光増幅部と、該光増幅部から出射する光を外部に出力する光出力部とが順次形成され、前記2枚の波形状鏡の間の空間には、光の波数を大きくするような波形状光導波路が形成されるようにしたことを特徴とする電子管型一方向性光増幅器。

【請求項2】 前記2枚の波形状鏡は、前記光入力部では入射側に向かうに連れて鏡間距離が増大し、前記光増幅部では鏡間距離が一定に維持され、前記光出力部では出射側に向かうに連れて鏡間距離が増大するようにしたことを特徴とする請求項1記載の電子管型一方向性光増幅器。

【請求項3】 前記2枚の波形状鏡は、全範囲において鏡間距離が一定に維持されるとともに、前記光入力部では入射側に向かうに連れて波形状の周期が増大し、前記光出力部では出射側に向かうに連れて波形状の周期が増大するようにしたことを特徴とする請求項1記載の電子管型一方向性光増幅器。

【請求項4】 前記2枚の波形状鏡は、銀等の金属または誘電体多層膜より成ることを特徴とする請求項1~3の何れか1項記載の電子管型一方向性光増幅器。

【発明の詳細な説明】**【0001】**

【発明の属する技術分野】本発明は、電子工学、量子電子工学、光エレクトロニクス、レーザ工学等の多くの分野に適用可能な、光を一方向のみに増幅する電子管型一方向性光増幅器に関するものである。

【0002】

【従来の技術】光増幅を行う従来技術としては、各種レーザ、進行波管等があり、これらを用いて光の一方向性増幅を実現しようとする種々の試みがなされてきた。

【0003】現在実用化されているレーザとしては、例えば、気体レーザ、固体レーザ、液体レーザ、半導体レーザがある。これらのレーザは、光の発生や増幅を行う代表的な光エレクトロニクス素子あるいは光エレクトロニクス装置であるが、レーザ材料中の原子や分子に拘束されている電子のエネルギーを使用するため、増幅される光の方向は可逆であり、前進波および後進波の両方が増幅される。したがって、出射した光がレンズや光ファイバあるいは光ディスク等の表面で反射されて戻り、レーザ内に再入射すると、この戻り光も増幅してしまう。そのため、レーザの発振特性や増幅特性を不安定に劣化させるとともに、過剰な雑音を発生してしまう。

【0004】現在までに提案されている上記不具合の対策としては、光を一方向に通過させるアイソレータをレーザの出射側に設けることにより戻り光の再入射を防止する手法が一般的である。しかし、光アイソレータは磁性材料を主材としてバルク形状で作製することしかできず、また、その価格が高価であるため、利用範囲が制限されることになる。このため、光学分野での基礎的研究や大容量の光ファイバ通信システムには光アイソレータを利用することができるが、光ディスク技術のように小型でかつ安価なことを要求される用途には光アイソレータを利用することができず、上記戻り光による特性劣化や雑音発生がレーザを採用する際の技術的な障害となる。

【0005】また、レーザ光発生部、光増幅部、変調部等を光集積回路として一体化し、光による高速の情報処理を行う方式も提案されているが、この方式は、次段部から前段部へ光が戻るため、複合的な機能を有する光回路としての合成ができないという問題がある。

【0006】また、広範囲な波長で発振可能な光発生装置として自由電子レーザが開発されている。この自由電子レーザは、他種類のレーザとは異なる動作原理を用いており、真空中で一方向に伝搬する電子ビームのエネルギーを光に与えるようにしているため、電子ビームと同一方向に伝搬する光成分のみを増幅する特性を有している。しかし、自由電子レーザは、光の発生に主眼を置いて開発されたものであるため、上記一方向性増幅特性を生かすような設計は行われていない。さらに、自由電子レーザでは、電子ビームの励起電圧が10MV以上と極

めて高く、また電子ビームに振動を与えるために超高磁場を必要とすることから、特殊な高エネルギー用途を目標に開発されているため、信号増幅を目的とするエレクトロニクス分野には適していない。

【0007】また、一方向性の機能電子素子である通常の電子管やトランジスタの動作可能周波数の上限値(1GHz程度)を上回る、最も高い動作可能周波数を有する一方向性の電子管としては進行波管がある。この進行波管は、金属による遅延伝送路を用いて電磁波の伝搬速度を低下させ、この電磁波に電子銃から放射された電子ビームがエネルギーを与えるものであり、周囲を真空にすることにより、電子が周囲物質と衝突して散乱することに伴うエネルギー損失を抑制している。この進行波管では、電子ビームの速度および電磁波の伝搬速度が一致したときに電磁波が増幅されるため、逆方向へ伝搬する電磁波は増幅されない。しかし、波長は高周波になるほど短くなり、進行波管の使用周波数の上限値は伝送路の金属加工技術により決定されるため、進行波管は数十GHz以上の周波数(波長;数cm以下)では使用できない。したがって、波長が1 μ m以下となる光に適用し得る進行波管を作製することは、現在の金属加工技術の限界を遥かに越えることになり、現時点では不可能である。

【0008】上述した種々の問題を解決するため、本願発明者は、先に、特願平9-71147号明細書において、固体中の電子ビームを用いた一方向性光増幅器を提案済みである。この一方向性光増幅器では、固体中に放射される電子ビームを走行させるための電子ビーム走行路と、増幅すべき光を遅延させるための誘電体遅延導波路とを組み合わせることにより、光の一方向性増幅が実現可能であることを理論的に示している。

【0009】

【発明が解決しようとする課題】上記一方向性光増幅器にあっては、電子ビーム走行部を例えばZnSeで構成した場合には加速電圧が2.5Vを超えると電子が走行できなくなるため、電子ビームの加速電圧を大きくすることができず、電磁界の空間的位相変化が極めて微細になり、遅延導波路の作製をnm以下の精度で行う必要がある。そのため、今後の作製技術の進展を待たなければ上記一方向性光増幅器を実現できないという問題がある。

【0010】本発明は、真空中の電子を用いた増幅によりこれまで不可能とされていた光の一方向性増幅を実現する装置を電子管型一方向性光増幅器として具体化することにより、上述した問題を解決することを目的とする。

【0011】

【課題を解決するための手段】この目的のため、本発明の請求項1の構成は、電子ビームを放射する電子放射部と、該電子放射部から放射される電子ビームを利用して光を一方向に増幅する増幅部とを真空中に配置して成る

電子管型一方向性光増幅器であって、前記増幅部は、電子ビーム走行部が形成されるように所定距離離間させて配置した2枚の波形状鏡より成り、該増幅部の電子ビーム走行方向には、増幅すべき光を入力される光入力部と、該光入力部から出射する光を前記電子ビームから受けたエネルギーを利用して一方向に増幅する光増幅部と、該光増幅部から出射する光を外部に出力する光出力部とが順次形成され、前記2枚の波形状鏡の間の空間には、光の波数を大きくするような波形状光導波路が形成されるようにしたことを特徴とするものである。

【0012】本発明の請求項1においては、真空中に配置される増幅部の光入力部に入力される光は、前記増幅部を構成する2枚の波形状鏡の間の空間に形成される波形状光導波路を蛇行して伝搬する際に速度が遅延され、光の波数が大きくなり、前記光増幅部を伝搬する際に前記2枚の波形状鏡間に形成される電子ビーム走行部を走行する電子ビーム（真空中を走行するため、周囲物質との衝突による散乱に伴うエネルギー損失が抑制されている）から受けたエネルギーを利用して一方向に増幅され、光出力部から外部に出力される。

【0013】本発明の請求項1によれば、増幅部に形成される波形状光導波路において電子走行方向への光の伝搬速度を遅延させて光の波数を大きくするようにしたため、真空中の電子を用いた増幅により光の一方向性増幅を実現する装置を電子管型一方向性光増幅器として具体化することができる。

【0014】本発明の請求項2の構成は、前記2枚の波形状鏡は、前記光入力部では入射側に向かうに連れて鏡間距離が増大し、前記光増幅部では鏡間距離が一定に維持され、前記光出力部では出射側に向かうに連れて鏡間距離が増大するようにしたことを特徴とするものである。

【0015】本発明の請求項2によれば、前記2枚の波形状鏡により構成される増幅部において、入射側に向かうに連れて鏡間距離が増大するようにした光入力部に所定入射角で入力した入射光は、前記所定入射角よりも小さい反射角および入射角で反射を繰り返しながら鏡間距離が一定に維持されるようにした光増幅部の中を蛇行する間に電子ビームから受けたエネルギーを利用して一方向に増幅された後、出射側に向かうに連れて鏡間距離が増大するようにした光出力部から前記所定入射角とほぼ等しい所定出射角で外部に出力されるから、電子走行方向への光の伝搬速度を遅延させて光の波数を大きくする波形状光導波路を実現することができる。

【0016】本発明の請求項3の構成は、前記2枚の波形状鏡は、全範囲において鏡間距離が一定に維持されるとともに、前記光入力部では入射側に向かうに連れて波形状の周期が増大し、前記光出力部では出射側に向かうに連れて波形状の周期が増大するようにしたことを特徴とするものである。

【0017】本発明の請求項3によれば、全範囲において鏡間距離が一定に維持される前記2枚の波形状鏡により構成される増幅部において、入射側に向かうに連れて波形状の周期が増大するようにした光入力部に所定入射角で入力した入射光は、前記所定入射角よりも小さい反射角および入射角で反射を繰り返しながら前記光増幅部の中を蛇行する間に電子ビームから受けたエネルギーを利用して一方向に増幅された後、出射側に向かうに連れて波形状の周期が増大するようにした光出力部から前記所定入射角とほぼ等しい所定出射角で外部に出力されるから、電子走行方向への光の伝搬速度を遅延させて光の波数を大きくする波形状光導波路を実現することができる。

【0018】本発明の請求項4の構成は、前記2枚の波形状鏡は、銀等の金属または誘電体多層膜より成ることを特徴とするものである。

【0019】本発明の請求項4によれば、前記2枚の波形状鏡を銀等の金属または誘電体多層膜により構成したため、所望の通りの鏡面反射作用を得ることができる。

【0020】

【発明の実施の形態】以下、本発明の実施の形態を図面に基づき詳細に説明する。図1は本発明の第1実施形態の電子管型一方向性光増幅器の基本構造を示す原理図である。本実施形態の電子管型一方向性光増幅器は、図1に示すように、電子ビーム1を放射する電子放射部である電子銃2と、電子銃2から放射される電子ビーム1を利用して光を一方向に増幅する増幅部3とを図示しない真空容器中に配置して、電子管型装置として構成されている。なお、上述したように電子銃2および増幅部3の周囲を真空にした理由は、電子銃2から放射された電子が電子ビーム走行部に存在する周囲物質に衝突して散乱することによりエネルギー損失が生じるのを抑制するとともに、電子銃2の印加電圧（加速電圧）の高電圧化を可能にするためである。

【0021】上記増幅部3は、電子ビーム走行方向（図示z軸方向）に電子ビーム走行部が形成されるように所定距離（例えば電子ビーム1のビーム幅よりも若干大きい距離）離間させて配置した2枚の波形状鏡4,5より成る。波形状鏡4,5はそれぞれ、増幅部3の電子ビーム走行方向に順次形成される、光入力部4a,5aと、光増幅部4b,5bと、光出力部4c,5cとから成る。上記波形状鏡4,5の間の空間は、光の波数を大きくするような波形状光導波路6を形成している。波形状鏡4,5の材料としては、銀等の金属または誘電体多層膜を用いる。

【0022】上記光入力部4a,5aはそれぞれ、増幅すべき光（入射光）7が所定入射角で入力できるように、入射側に向かうに連れて鏡間距離が増大するようになっている。また、上記光増幅部4b,5bはそれぞれ

れ、光入力部4 a, 5 aの射出光が波形状導波路6を構成する鏡の反射により前記所定入射角よりも小さい反射角および入射角で反射を繰り返しながら蛇行して電子ビーム走行方向(z軸方向)に伝搬する間に、前記電子ビーム走行部を走行する電子ビーム1から受けたエネルギーを利用して前記射出光を一方に増幅できるように、鏡間距離が一定に維持されている。さらに、光出力部4 c, 5 cはそれぞれ、光増幅部4 b, 5 bの射出光を前記所定入射角とほぼ等しい所定出射角で外部に出力できるように、出射側に向かうに連れて鏡間距離が増大するようになっている。なお、光入力部4 a, 5 aおよび光出力部4 c, 5 cでは電子ビーム1の走行速度と光の速度とが一致しないため、電子ビーム1からエネルギーを受けて光増幅を行うことができない。したがって、鏡間距離を一定にした領域である光増幅部4 b, 5 bのみで光増幅を行うことになる。

【0023】次に、第1実施形態の電子管型一方向性光増幅器の動作原理を説明する。光(入射光)7の角周波数および波数をそれぞれ ω および k とし、電子銃2により放射される電子のエネルギーおよび波数をそれぞれ W および k_b とし、光7にエネルギーを与えた後の電子のエネルギーおよび波数をそれぞれ W_a および k_a とし、プランク定数を h とすると、以下の式(1)および(2)の関係が満たされる場合に光7が増幅される。

$$W_b - W_a = h \cdot \omega / 2 \quad (1)$$

$$k_b - k_a = \quad (2)$$

光の速度は c であるため、自由空間では光の波数が小さくなり過ぎることから、式(2)が成立しない。そこで、本実施形態では、図1に示すように2枚の波形状鏡4, 5を用いて構成した波形状導波路6により光7を蛇行させて減速させ、光の波数 k を大きくしている。

【0024】上述した増幅部3の光増幅部4 b, 5 bでの光増幅作用は、量子力学の解析手法の1つである密度行列法を用いて理論解析され、光の利得定数 g は、次式で表わされる。

【数1】

$$g = \frac{2}{\pi} \sqrt{\frac{\mu_0 \xi}{\epsilon_0}} \frac{e^2 \lambda J V_e}{m c^2 \Delta E} \quad (3)$$

ここで、 μ_0 は真空中の透磁率、 ϵ_0 は真空中の誘電率、 e は電子の電荷、 λ は光の波長、 m は電子の質量、 c は真空中の光速、 ξ は光および電子ビームの結合率、 J は電子ビームの電流密度、 V_e は電子銃の加速電圧、 ΔE は放射された電子ビームのエネルギー広がり幅である。

【0025】光増幅部4 b, 5 bの長さを L とすると、光増幅部4 b, 5 bの増幅率 A は、次式で表わされる。

$$A = \exp(gL) \quad (4)$$

この光増幅に必要な加速電圧 V_e は、次式で表わされ

る。

【数2】

$$V_e = \frac{m}{2e} \left(\frac{\omega}{\beta} \right)^2 \quad (5)$$

【0026】次に、本実施形態の電子管型一方向性光増幅器の作用を説明する。電子銃2に加速電圧 V_e を印加して電子を放射するとともに光7を光入力部4 a, 5 aから増幅部3内に入力させると、2枚の波形状鏡4, 5より成る波形状導波路6により光7が蛇行して減速されて光7の波数 k が大きくなるため、電子ビーム1から受けたエネルギーを利用して光増幅部4 b, 5 bで増幅された光が光出力部4 c, 5 cより得られる。この場合、波形状鏡4, 5の波形状の周期を短くすればするほど、光の速度を遅くすることができるため、低い加速電圧で動作させることが可能になる。

【0027】図2は本発明の第2実施形態の電子管型一方向性光増幅器の基本構造を示す原理図である。本実施形態の上記第1実施形態との相違点は、2枚の波形状鏡の形状を変更したことであり、その他の部分は第1実施形態と同様に構成する。本実施形態の2枚の波形状鏡14, 15はそれぞれ、図2に示すように、増幅部3の電子ビーム走行方向に順次形成される、光入力部14 a, 15 aと、光増幅部14 b, 15 bと、光出力部14 c, 15 cとから成り、波形状鏡14, 15の鏡間距離は全範囲において一定に維持されている。上記波形状鏡14, 15の間の空間は、光の波数を大きくするような波形状光導波路6を形成している。波形状鏡14, 15の材料としては、銀等の金属または誘電体多層膜を用いる。

【0028】上記光入力部14 a, 15 aはそれぞれ、増幅すべき光(入射光)7が所定入射角で入力できるように、入射側に向かうに連れて波形状の周期が増大するようになっている。また、上記光増幅部14 b, 15 bはそれぞれ、光入力部14 a, 15 aの射出光が波形状導波路6を構成する鏡の反射により前記所定入射角よりも小さい反射角および入射角で反射を繰り返しながら蛇行して電子ビーム走行方向(z軸方向)に伝搬する間に、前記電子ビーム走行部を走行する電子ビーム1から受けたエネルギーを利用して前記射出光を一方に増幅できるように、鏡間距離が一定に維持されている。さらに、光出力部14 c, 15 cはそれぞれ、光増幅部14 b, 15 bの射出光を前記所定入射角とほぼ等しい所定出射角で外部に出力できるように、出射側に向かうに連れて波形状の周期が増大するようになっている。なお、上記形状とした本実施形態の波形状鏡14, 15は、第1実施形態の波形状鏡4, 5よりも作製し易い。

【0029】本実施形態の電子管型一方向性光増幅器によれば、上述したように、2枚の波形状鏡14, 15

の波形状の周期を、波形状導波路6の両端部に向かうに連れて増大するように連続的に変化させたため、上記第1実施形態と同様の作用をなす。

【0030】次に、一方向性光増幅を実現する上記各実施形態の電子管型一方向性光増幅器と、上述した従来技術および本願発明者の先願（特願平9-71147号明細書）とを比較して、両者の共通点および相違点を説明する。第1に、上記各実施形態は光を一方にのみ増幅する素子または装置であるため、双方向への可逆増幅を行う従来技術である「レーザ」とは本質的に異なる機能を有している。第2に、上記各実施形態における光増幅作用は、上記本願発明者の先願と同様に、発明者による新たな理論解析により予見される現象である。

【0031】第3に、上記本願発明者の先願の「一方向性増幅器」とは、電子ビームによる光増幅である点で共通している。しかし、上記本願発明者の先願が固体中の電子を使用しているのに対し、上記各実施形態は真空中の電子を使用している点で両者は相違している。さらに、上記各実施形態は波形状鏡を遅延導波路として使用している点で上記本願発明者の先願と相違している。

【0032】第4に、上記各実施形態は、真空中で電子銃から放射される電子ビームを用いる電磁波増幅である点および電磁波の遅延導波路を有している点で、マイクロ波領域の「進行波管」と類似している。しかし、進行波管では電磁波の遅延を螺旋状（コイル状）線路で行っているが、上記各実施形態では波形状鏡で光（電磁波）の遅延を行っている点で両者は相違している。また、進行波管はマイクロ波領域では使用できるが、上記各実施形態で使用される光領域では使用できない。さらに、進行波管の動作理論では、金属の遅延導波路に「誘起された電流によって、電磁波が増幅される」ことを理論的な裏付けとしている。しかし、上記各実施形態では、電子ビームによって光が直接的に増幅されることを量子力学に基づいて理論的に示しているため、遅延導波路が金属より成ることが必須条件ではない。したがって、遅延導波路を誘電体多層膜により作製することも可能である。

【0033】以上説明したように、上記各実施形態によれば、現在までに実現されていない単一方向性の光増幅を実現することができる。このような電子管型一方向性光増幅器の出現は、いわば光周波数領域における電子管やトランジスタの発明に相当するようなものであり、現状の光通信技術、光計測技術、光記録技術等の信号処理を中心とした光エレクトロニクス分野の継続的な発展の他に、電気工学、電子工学、情報工学の分野の飛躍的な発展が期待できる。さらに、上記各実施形態の電子管型一方向性光増幅器は、材料加工や核融合等の高エネルギー

光の用途の利用も期待できる。

【0034】上記電子管型単一方向性光増幅器の実現による最大の利点は、光信号を用いた回路合成が可能になることであり、これにより、光発振器、光増幅器、光変調器、光スイッチ、光メモリ等の各種の光機能素子を光回路として構成することができる。例えば、上記電子管型単一方向性光増幅器を光ファイバ通信の光源に適用したり、各種光計測器に適用した場合、光アイソレータを用いなくても、反射戻り光の障害が生じなくなる。また、光ディスクにおける光ピックアップに適用した場合、反射戻り光の影響はなくなり、高品位の光信号を維持することができる。また、増幅条件を適宜変更することにより、光変調器や光スイッチの構成になる等、幾多の光機能素子への応用が可能である。また、CD（コンパクトディスク）装置に適用した場合、レーザ光を一方向で増幅することにより低雑音化することが可能になる。

【0035】また、レーザ光のエネルギーを利用したレーザ加工機やレーザメス等においては、レーザ発振器からのレーザ光を上記電子管型一方向性光増幅器で増幅して出射するように構成することにより、対象物からの反射戻り光があっても動作が変動しない安定化されたシステムとすることができる。

【0036】

【実施例】図1の構成において、波形状鏡4, 5の波形状の周期を $0.4\ \mu\text{m}$ とする。この構成において理論解析を行うと、波長 $\lambda = 0.63\ \mu\text{m}$ の光で、印加電圧 V_e を $100\ \text{KV}$ とし、電流密度 J を $10\ \text{KA}/\text{cm}^2$ とすると、光増幅部4b, 5bの長さ L を $3\ \text{mm}$ とした場合には、10倍以上の増幅率 A が得られる。

【図面の簡単な説明】

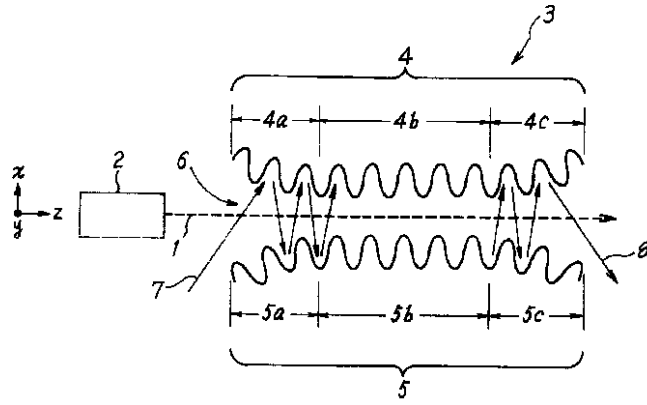
【図1】本発明の第1実施形態の電子管型一方向性光増幅器の基本構造を示す原理図である。

【図2】本発明の第2実施形態の電子管型一方向性光増幅器の基本構造を示す原理図である。

【符号の説明】

- 1 電子ビーム
- 2 電子銃（電子放射部）
- 3 増幅部
- 4, 5, 14, 15 波形状鏡
- 4a, 5a, 14a, 15a 光出力部
- 4b, 5b, 14b, 15b 光増幅部
- 4c, 5c, 14c, 15c 光出力部
- 6 波形状導波路
- 7 入射光
- 8 出射光

【図1】



【図2】

