

誘電体装荷による自由電子レーザーの特性改善



研究ノート

塩 沢 俊 之*

自由電子レーザーというのは、光の速度に近い高速度で真空中を走行する相対論的電子ビームの運動エネルギーを直接、電磁波のエネルギーに変換することによってミリ波から光波の領域において大強度の電磁波を発生する新しいタイプの波長可変レーザーである。最近、自由電子レーザーの導波構造に誘電体を装荷することにより、誘電体を装荷しない場合と同じエネルギーの電子ビームを用いて、より短い波長のレーザー発振を得る試みがなされている。このような試みの代表的なものとしては、スタンフォード大学において提案された、水素などの中性気体を封入した可視領域における波長可変のコプトン型レーザーがある。本稿では、ミリ波からサブミリ波の領域において発振するラマン型レーザーの場合に、導波構造として真空の導波管のかわりに誘電体を装荷した導波管を用いることによってレーザーの特性が大幅に改善されることを示す。

本稿で考察する誘電体を装荷したラマン型自由電子レーザーの2次元モデルを図1に示す。図1では、平行平板導波管(導体板間隔 $2a$)に

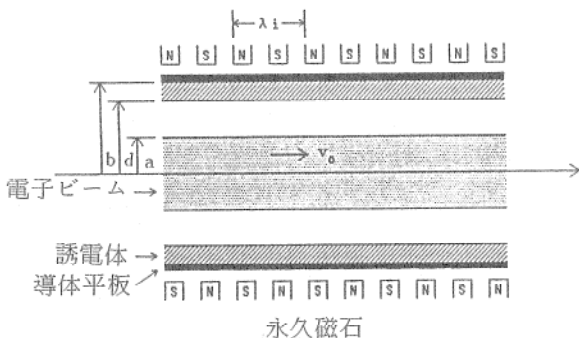
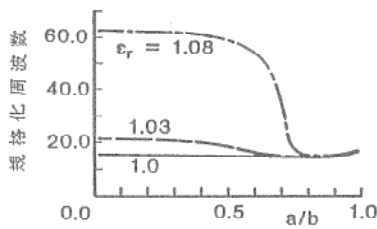


図1 誘電体を装荷したラマン型自由電子レーザーの2次元モデル

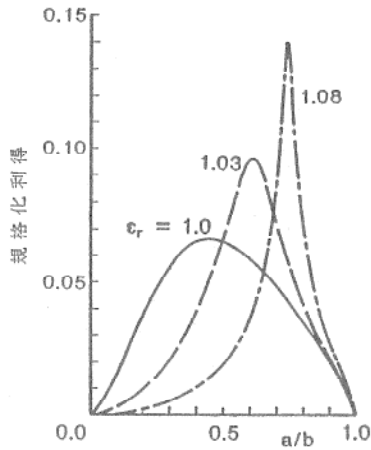
比誘電率 ϵ_r の誘電体を装荷し、その中を一定の速度 v_0 で厚さ $2a$ の平板状の相対論的電子ビームを走行させ、これに、永久磁石の配列によって、ビームの進行方向に大きさが周期 λ_1 で変化する静磁界を加えるものとする。このとき、位相整合条件が満たされると、周期静磁界が媒介となって、誘電体を装荷した平行平板導波管を伝搬する電磁波と相対論的電子ビームに沿って伝搬する空間電荷波との間に非線形結合が生じ、相対論的電子ビームの運動エネルギーが電磁波のエネルギーに変換される。ラマン型自由電子レーザーは、このような過程によって、自然放射で得られた雑音レベルの微小な電磁波の成分を増幅し、大強度のコヒーレントな電磁波を発生させる。

平行平板導波管に誘電体を装荷することによってラマン型自由電子レーザーの特性がどのように改善されるかを定量的に知るために、レーザーの発振周波数および利得と、平行平板導波管の導体板間隔に対する電子ビームの厚さの比との関係を、誘電体の比誘電率 ϵ_r をパラメータとして図示すると、図2および図3のようになる。ただし、電磁波モードとしては、奇対称の最低次モードである TE_1 モードを考えている。また、上の数値例では電子ビームの速度が誘電体中の光速よりも小さい場合を取り扱っているので、誘電体の比誘電率 ϵ_r の取り得る値には、 $\beta \sqrt{\epsilon_r} < 1$ なる制限がある。ここで、 $\beta = v_0/c$ であり、 c は真空中の光速を表す。図2の数値例では $\beta = 0.95$ ($\gamma = 3.2$)であるから、上の条件から、 ϵ_r の取り得る値の上限は $\epsilon_r = 1.1$ となる。また、図3の場合には $\beta = 0.67$ ($\gamma = 1.35$)であるから、 ϵ_r の取り得る値の上限は $\epsilon_r = 2.2$ となる。ただし、 $\epsilon_r = 1$ は真空を表す。また、 γ は電子の静止エネルギーに対する全エネルギー(静止エネルギーと運動エネルギーの和)の比を表し、

*塩沢俊之 (Toshiyuki SHIOZAWA), 大阪大学工学部通信工学科, 助教授, 工学博士, 電磁波工学

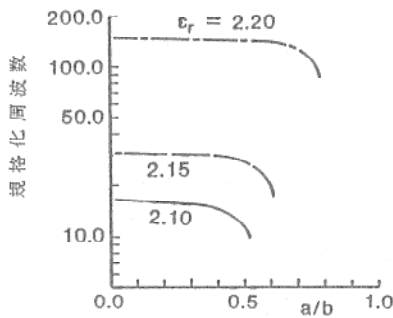


(a) 発振周波数

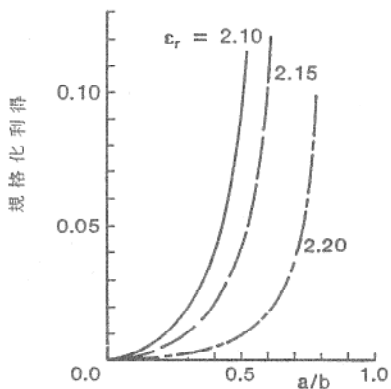


(b) 利 得

図2 発振周波数と利得 ($\gamma=3.2$)



(a) 発振周波数



(b) 利 得

図3 発振周波数と利得 ($\gamma=1.35$)

β と $\gamma = 1/\sqrt{1-\beta^2}$ なる関係にある。

図2からわかるように、導波構造として誘電体を装荷した導波管を用いると、同じ速度(β)あるいは同じエネルギー(γ)をもつ電子ビームに対して発振周波数は高くなり、レーザの利得は大きくなる。一方、図2と図3の結果を比べてみると、図3の場合には電子ビームのエネルギーがかなり小さくなっているにもかかわらず、 a/b の値を適当に選ぶと、図2に示した真空の導波管($\epsilon_r=1$)を用いる場合とほぼ同じ大きさの発振周波数と利得が得られることがわかる。このように、ラマン型自由電子レーザの導波構造として誘電体を装荷した導波管を用いることによりレーザの特性が大幅に改善されるのは次のような理由による。即ち、導波管に誘電体を装荷すると導波管を伝搬する電磁波の位相速度が遅くなり、その結果、電磁波と相互作用する電子ビームの速度も遅くすることができるようになる。従って、誘電体を装荷した場合には、誘電体を装荷しない場合と同じ速度の電子ビームを用いると得られる周波数は高くなり、一方、誘電体を装荷しない場合と同じ周波数を得るためにはビームの速度を遅くすることができる。また、導波管に誘電体を装荷すると、電磁波の電磁界は誘電体の近傍に集中する。一方、空間電荷波の電磁界は電子ビームの表面近くに集中するので、電子ビームの表面を誘電体の表面に近づけることにより電磁波と空間電荷波の相互作用を強めることができ、その結果、レーザの利得を大きくすることができる。

ところで、図1に示したような、中心を通る平面に関して対称な構造をもつレーザでは、偶対称と奇対称の二種類の空間電荷波のモードが同時に伝搬可能であり、これらの空間電荷波のモードと結合する電磁波のモードはほぼ等しい周波数と利得の特性を示す。即ち、図1の系を伝搬する電磁波の基本モードと高次モードは同時に発振可能となる。このように基本モード以外の高次モードが同時に発振することはレーザの効率的利用のために好ましいことではない。図1に示した対称構造のレーザがもつこのような欠点を取り除くためには、図4に示すようにレーザの構造を非対称にすればよい。このよう

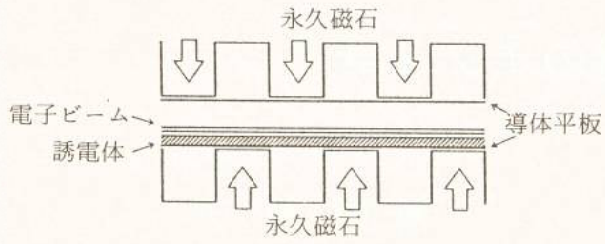


図4 非対称構造のラマン型自由電子レーザーのモデル
 にレーザーの構造を非対称にすると、上記の二種類
 の空間電荷波のモードの一方と結合する電
 磁波モードの成長が抑制され、電子ビームから
 電磁波へのエネルギー変換の効率が改善される。
 また、電磁波と空間電荷波の電磁界は誘電体と

電子ビームの表面近くの狭い領域に集中するの
 で、図4に示したような構造はレーザー装置を小
 型化するのに適している。

文 献

- 1) Y. Shibuya and T. Shiozawa, IEEE J. Quantum Electron. QE-24, 1235 (1988).
- 2) 渋谷 雄, 塩沢俊之, 電子情報通信学会論文誌, J72-C, 223 (1989).
- 3) 渋谷 雄, 塩沢俊之, 電気学会電磁界理論研究会資料, EMT-89-100 (1989).

