



自由電子レーザー

塩 沢 俊 之*

1. はじめに

自由電子レーザーというのは、相対論的な速度、すなわち光の速度に近い高速度で真空中を走行する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新しいタイプの大出力レーザーである。従来のレーザーが物質中の原子あるいは分子のエネルギー準位間の遷移を利用するのに対して、自由電子レーザーでは真空中に取り出された自由電子の運動エネルギーを利用するところから、その名前がつけられた。自由電子レーザーの特徴として期待できることは、短ミリ波、サブミリ波のあたりから可視領域にわたって大出力が得られること、広帯域にわたって連続的に波長可変であること、ならびに高いエネルギー変換効率を得られること等である。このようにすぐれた特徴をもつために、1977年、スタンフォード大学（波長3.4 μm 、出力7kW）ならびに米国海軍研究所（波長400 μm 、出力1MW）において最初の実験に相次いで成功するや、自由電子レーザーは、にわかに関心を集めるようになった。ここ数年来、量子エレクトロニクスあるいはプラズマ理工学関係の国際会議、ワークショップ等において報告される自由電子レーザーの研究発表は増加の一途をたどっている。また、IEEE（米国電気電子学会）の量子エレクトロニクス専門誌においても、これまでに2回自由電子レーザーの特集号が生まれ、本年7月には3回目の特集号が出る予定である。わが国においても、昨年10月、宝塚において第9回赤外とミリ波に関する国際会議が開催され、自由電子レーザーに関する特別講演および一般講演のセ

ッションがもたれた。このような時期に自由電子レーザーの技術解説を行うことは時宜を得たものであると考えられる。

さて、自由電子レーザーの出力のエネルギーは、相対論的電子ビームによる電磁波の誘導散乱という過程を通じて、相対論的電子ビームの運動エネルギーから供給される。自由電子レーザーは、レーザー作用にあずかる散乱過程の違いによって、大別して、コンプトン型とラマン型に分かれる。低密度の電子ビームを用いる場合には、電子ビームを構成する個々の電子と電磁波との間でエネルギーの授受が行われ、この場合の散乱過程は誘導コンプトン散乱と呼ばれる。誘導コンプトン散乱を用いる自由電子レーザーがコンプトン型レーザーである。高エネルギーの電子ビームを用いるレーザーでは、どうしても電子密度は低くなるので、コンプトン型となる。一方、高密度の電子ビームを用いる場合には、電子ビームを構成する個々の電子と電磁波との相互作用よりも、電子ビーム中を伝搬する集団的な振動モード（電子プラズマ振動）と電磁波との相互作用の方がはるかに大きくなる。電子プラズマ振動による電磁波の誘導散乱は誘導ラマン散乱と呼ばれ、この過程を用いる自由電子レーザーをラマン型レーザーという。ところで、自由電子レーザーは、真空中を走行する電子ビームと電磁波との相互作用によって、そのエネルギーが取り出されるところから、レーザーというよりむしろマイクロ波電子管の一種と考えることもできる。実際、その動作原理は、マイクロ波電子管の場合と同様に、全く古典的に説明することができる。但し、自由電子レーザーは大電流あるいは高エネルギーの相対論的電子ビームを用いるビッグ・プロジェクトであり、この点がマイクロ波電子管と異なる点

*塩沢俊之 (Toshiyuki SHIOZAWA), 大阪大学, 工学部, 通信工学科, 工学部講師, 工学博士, 電磁波工学

である。本稿では、自由電子レーザーの動作原理を古典論の立場から説明し、コンプトン型ならびにラマン型レーザーの実例についてその概要を述べる。

2. 自由電子レーザーの原理

自由電子レーザーの構成図を図1に示す。図

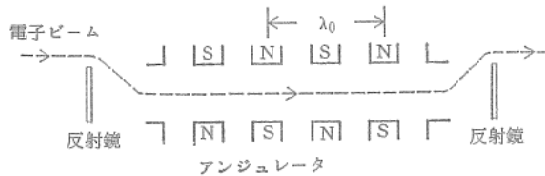


図1 自由電子レーザーの構成

1の主な構成要素は、相対論的電子ビーム、永久磁石の配列からなるアンジュレータおよび二枚の反射鏡からなる共振器である。アンジュレータというのは、電子ビームの進行方向に周期的に変化する横向きの静磁界によって、電子ビームに横方向の振動を与える装置である。自由電子レーザーでは、同じ目的のために、アンジュレータの代わりに、二重らせんのコイルに電流を逆向きに流して作るヘリカル・ウィグラー、あるいは電子ビームの進行方向とは反対の方向に伝搬する大強度の電磁波を用いることもある。本稿では、図1の構成をもとに自由電子レーザーの原理を述べる。さて、図1において、加速器から出てきた相対論的電子ビームがアンジュレータ中を通過するとき、電子ビームを構成する個々の電子は、横向きの周期磁界の影響を受けて、図2に示すように、磁気力線に垂直な面内において周期運動を行う。各電子は、図2の

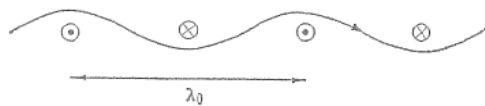


図2 周期磁界中における電子の軌道

ような加速度運動を行うと、制動放射によって電磁波を放射するが、この放射は、相対論的効果によって、電子の進行方向のまわりの狭い空間の領域に集中する傾向がある。いま、アンジュレータのピッチを λ_0 とすると、各電子から放射される電磁波（基本波）のスペクトルの中心波長 λ_{s0} は、 $\lambda_{s0} = \lambda_0 (1 + K^2) / 2r^2$ とな

る。ここで、 r 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）の比を表わし、 K はアンジュレータの構造によってきまる定数である。上式からわかるように、アンジュレータ中を高速度で走行する電子から放射される電磁波の波長は、相対論的ドップラ効果によって非常に短くなり得る。一般に、電子ビームを構成する個々の電子の速度の大きさと方向には、ある平均値のまわりにバラツキがあるので、これらの電子による放射を合成して得られる波はインコヒーレント（非可干渉性）な波となり、そのスペクトルの広がりには各電子の放射スペクトルよりも広くなる。このように位相がバラバラの各電子からの放射を合成して得られる放射は自然放射と呼ばれる。

さて、自然放出によって生じた電磁波の強度がある程度の大きさになると、この電磁波とアンジュレータの周期磁界が電子ビームを介して結合することにより、縦方向の力（ローレンツ力）が発生し、この力によって、電子ビームは密度変調を受ける。この作用をバンチング（集群作用）という。いま、このようにして生じた力のポテンシャルのある時刻における分布を示すと、図3(a)のようになる。図において、 z は電子ビームの進行方向を示す。電子ビーム中の電子には、図3(a)のポテンシャルの負の勾

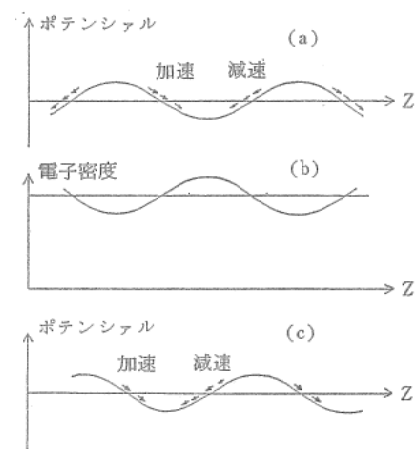


図3 電子のバンチングと誘導放出

配に比例する力が働くので、ポテンシャルの谷の左側にある電子は加速され、またポテンシャルの谷の右側にある電子は減速されて、それぞ

れの電子はポテンシャルの谷に集まろうとする。このようにして電子密度は、図3(b)のように、変調を受ける。いま、もし、ポテンシャルの波の位相速度が電子ビームのz方向の平均速度に等しくなると、加速される電子の数と減速される電子の数はちょうど等しくなり、電子ビームと電磁波との間ではエネルギーの授受は行われない。このような状態は、先に述べた自然放射のスペクトルの中心波長 λ_{s0} の波に対して起こる。一方、ポテンシャルの波の位相速度が電子ビームのz方向の平均速度よりもわずかに小さい場合には、加速される電子よりも減速される電子の方が多くなり、電磁波は増幅される(図3(c))。これを誘導放出という。逆にポテンシャルの波の位相速度が電子ビームのz方向の平均速度よりもわずかに大きい場合には、加速される電子の方が減速される電子よりも多くなり、電磁波は減衰する。これを誘導吸収という。誘導放出は λ_{s0} よりわずかに大きい波長の波に対して起こり、誘導吸収は λ_{s0} よりわずかに小さい波長の波に対して起こる(図4参照)。最初バラバラであった各電子の位相はバ

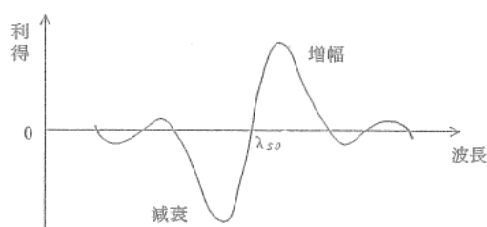


図4 誘導放出と誘導吸収

ンチングによって揃えられるようになり、その結果として、誘導放出によって得られる電磁波はコヒーレント(可干渉性)な波となる。誘導放出によって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ていくと、電子ビームの平均速度は次第に小さくなり、また電子の速度分布の広がりも大きくなっていく。そして、遂には誘導放出は起こらなくなり、飽和状態に達する。

3. コンプトン型レーザーの実例

コンプトン型レーザーの実例として、1977年最初の発振に成功したスタンフォード大学のレーザー¹⁾についてその概要を述べる。まず、レ

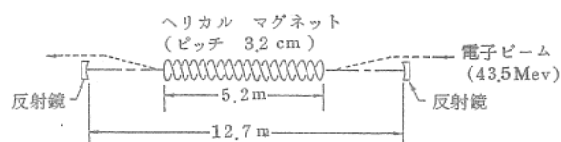


図5 コンプトン型レーザーの実例

ーザーの構成を図5に示す。この実験では、電子に横向き振動(回転)を与えるために、二重らせんの超電導コイルに3kAの電流を流して作るヘリカル・マグネットが用いられている。そのピッチは3.2cm、全長は5.2m、内径は0.5cmであり、中心軸の近傍で大きさ2.4kGの回転周期磁界を発生する。電子ビームは、超電導線形加速器からのパルス・ビームを用いる。電子のエネルギーは43.5MeV、電流は2.6A、パルス幅は4.3psであり、84.6ns毎に1個のパルスが送られてくる。43.5MeVのエネルギーは $\gamma=85$ に相当し、このとき自然放射によって得られる放射スペクトルの中心波長 λ_{s0} は3.4 μm となる。図5に示したレーザーにおいて、まず最初の電子ビームのパルスがやってきて、ヘリカル・マグネット中を通過すると、自然放射によって波長3.4 μm の近傍の電磁波が放射される。この電磁波の強度がある大きになると、ヘリカル・マグネットの周期磁界との結合によって、電子ビームに誘導放出を起こさせ、自らは増幅される。この増幅された波は、ヘリカル・マグネットを出ると、反射鏡によって反射され反対方向に進み、もう一方の反射鏡によって反射された後、再びヘリカル・マグネット中に入る。このとき、次の電子ビームのパルスが同時にヘリカル・マグネット中に入り、先ほどと同じようにして電磁波が増幅される。以下同様の過程が繰り返され、電磁波が電子ビームから得るエネルギーと、回折損、レーザー出力による損失等が釣り合って、定常的なレーザー発振が実現される。上の過程では、電子ビームのパルスと電磁波のパルスが重なってヘリカル・マグネット中を走行することが不可欠である。このように電子ビームのパルスと電磁波のパルスの同期をとるために、電子ビームのパルスの間隔は反射鏡の間隔の2倍、すなわち25.4mに選ばれている。この距離は時間に換算すると84.6nsとなる。

さて、このようにして得られたレーザー出力の中心波長は $3.417\mu\text{m}$ 、平均電力は 0.36W 、尖頭値電力は 7kW であった。反射鏡の透過係数は 1.5% であるから、尖頭値電力約 500kW の電磁波のパルスがレーザー内部を往復していることになる。誘導放射および自然放射のスペクトルは、それぞれ図6(a)、(b)のようになる。

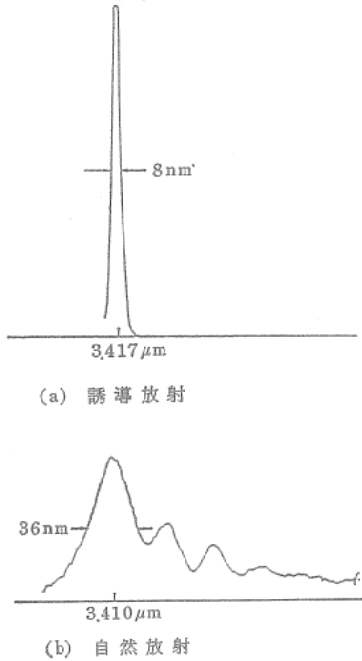


図6 誘導放射と自然放射のスペクトル

誘導放射の電力は自然放射の電力の約 10^8 倍程度になる。また、誘導放射は、自然放射のスペクトルの中心波長 $3.4\mu\text{m}$ よりもわずかに長い波長 $3.417\mu\text{m}$ において最大となり、スペクトルの半値幅は 8nm (200GHz) となる。

4. ラマン型レーザーの実例

ラマン型レーザーの一例として、コロンビア大学と米国海軍研究所が共同で行った実験²⁾ についてその概要を説明する。まず、実験の概略図を図7に示す。グラファイトの陰極から電界

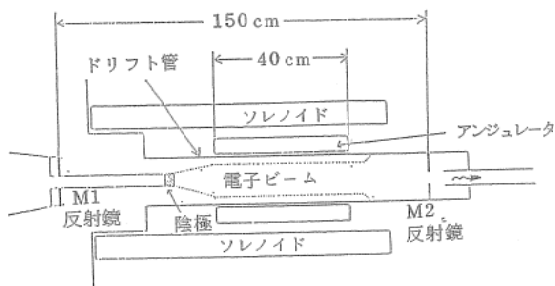


図7 ラマン型レーザーの実例

放出によって取り出された電子ビームは、ソレノイドの作る磁界によって、金属導波管（ドリフト管）とアンジュレータからなる相互作用領域に導かれる。電子ビームは、相互作用領域において、外径 4.5cm 、厚さ 1mm の中空ビームを形成しており、電流は 25kA 、エネルギーは 1.2MeV ($\gamma=3.4$) である。また、電子ビームのパルス幅は 40ns である。アンジュレータは、アルミニウムのリングを周期的に配列し、これらに電流を交互に逆向きに流して作られる。このアンジュレータのピッチは 8mm 、全長は 40cm であり、これによって、振幅 400G までの周期磁界が生じる。 M_1 と M_2 は反射板であり、これによって共振器が形成される。 40ns の電子ビームのパルスが相互作用領域を通過する間に、自然放射のスペクトルの中から成長した電磁波の成分は、 M_1 M_2 の間を4回往復し、その間に電子ビームからエネルギーをもらって増幅される。このようにして増幅された電磁波は反射板 M_2 の中央にある直径 1.8cm の開口から取り出される。このレーザーの出力は波長 $400\mu\text{m}$ のサブミリ波であり、その尖頭値電力は 1MW である。出力の波形は図8のようになる。図8(a)は、反射板 M_1 、 M_2 の調整が正確に行われて、これらが共振器として働いた場合の出力の波形であり、図8(b)は、 M_1 M_2 が共振器

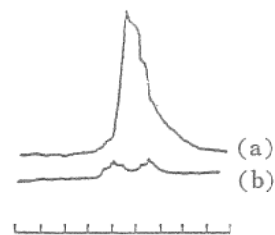


図8 レーザー出力の波形
(スケールの一目盛は 20ns)
(a) 相互作用長 $40 \times 4 = 160\text{cm}$
(b) 相互作用長 40cm

として働かない場合の出力の波形である。この図からわかるように、共振器を正確に調整することにより、レーザー出力の特性は大幅に改善される。以上述べたように、ラマン型レーザーでは、比較的低いエネルギー (γ 小) の大電流電子ビームを用いるために、発振波長は長い、増幅率および出力は大きくなる。一方、コ

ンプトン型レーザーでは、高エネルギー（ γ 大）、低密度の電子ビームを用いるために、発振波長は短くなるが、増幅率および出力は小さくなる。

5. おわりに

本稿では、自由電子レーザーの原理を簡単に説明し、実例についてその概要を述べた。上の実例からもわかるように、自由電子レーザーの研究はまだ初期の段階にあり、文字通り大出力、高効率の波長可変レーザーが実現されるまでにはもう暫くかかりそうである。特に、上の実例では、電子ビームは一回の発振毎に使い捨てになるためにエネルギー変換効率は非常に悪い。そこで、一旦レーザー発振によってエネルギーの一部を失った電子ビームを RF 加速によってもとのエネルギー状態にもどして再利用するための研究が現在進められている。これにより、エネルギー変換効率は大幅に改善されるものと期待される。また、レーザー出力のスペ

クトルの特性を改善するためには、速度の大きさと方向のよく揃った電子ビームを発生する技術の確立も不可欠である。この他にも、大電力広帯域のレーザー出力用の導波路、種々のコンポーネントの開発、あるいはレーザー装置の小型化等、解決すべき問題はたくさんある。しかしながら、自由電子レーザーは将来に期待のもてるテーマであるから、これからも地道な基礎研究が望まれる。

文 献

- 1) D.A.G. Deacon, L.R. Elias, J.M.J. Madey, G.J. Ramian, H.A. Schwettman, and T.I. Smith, "First operation of a free-electron laser", *Phys. Rev. Lett.*, 38, 16, pp. 892-894 (April 18, 1977).
- 2) D.B. McDermott, T.C. Marshall, S.P. Schlesinger, R.K. Parker, and V.L. Granatstein, "High-power free-electron laser based on stimulated Raman backscattering", *Phys. Rev. Lett.*, 41, 20, pp. 1368-1371 (Nov. 13, 1978).