

## 講座

# プラズマ利用ミリ波・サブミリ波帯 パルス電磁波放射入門

## Introduction to Pulse Radiation of Millimeter and Submillimeter Waves Using Plasma

( Received 12 December 2002 )

### 1. はじめに

周波数が 300 MHz ~ 300 GHz の電磁波はマイクロ波と呼ばれる。その中で波長がミリのオーダ ( 周波数は 30 GHz ~ 300 GHz ) の電磁波がミリ波である。サブミリ波はその上の周波数帯 ( 300 GHz ~ 3 THz ) の電磁波で、遠赤外線とも呼ばれる。今日、ミリ波・サブミリ波領域の電磁波源としては電子管や半導体発振器などがある。前者は電子ビームを用いたもので、装置が大きく使いこなすのは大変であるが、1 MW 以上という大電力での発振も可能である。例えばジャイロトロン ( Gyrotron )、自由電子レーザー ( Free Electron Laser )、後進波発振器 ( Backward Wave Oscillator ) がある [ 1 8 ]。特にジャイロトロンは、電力 100 kW - 1 MW で準定常的に発振が得られ、今やプラズマの研究に欠かせないミリ波源であり、本学会誌でも解説 [ 5 7 ] や小特集 [ 6 ] で取り上げられている。半導体発振器にはダイオードを用いたガン ( Gunn ) 発振器や電子回路を集積回路化したモノリシックなマイクロ波集積回路 ( Monolithic Microwave Integrated Circuit ) などがあり、本学会誌の講座 [ 9 ] や小特集 [ 10 ] に詳しく述べられている。1 W 以下の低電力ではあるが、何と云っても小型で使い勝手がよい。また、ミリ波・サブミリ波は高温プラズマの加熱・制御や計測のみならず通信や地球・宇宙観測の分野などで非常に重要であり、その応用と関連技術についても本学会誌の講座 [ 9, 11 ] と小特集 [ 10 ] に取り上げられている。ここに挙げた講座・解説・小特集では、担当された方々の経験と知識が、テーマごとに豊富な資料とともに説明されている。最近では、電子化を担当されている方々の献身的な努力により、本学会のホームページより各号の内容にアクセスが可能となっ

OGURA Kazuo, Niigara University, Niigata 950-2181 Japan

た。大変便利で、今回、私も大いに活用させていただいた。

電磁波と言えば、電磁気学の講義で学ぶマクスウェルの方程式より導かれる。1873年に公表されたものであるが、現実の境界条件の下で解こうとするとずいぶん複雑となる。1887年~1891年のヘルツ ( Hertz ) の実験で電磁波の存在が実証され、1899年にはマルコーニ ( Marconi ) がイギリス海峡を越えての長距離無線電信の実験に成功した。マルコーニは1909年に無線電信の開発への貢献でノーベル物理学賞を受賞している。その後、無線通信技術はめざましく進歩し、ラジオ放送は1920年頃から、またテレビ放送は1930年中頃から開始されている。このような20世紀前半の電磁波の利用に欠かせないものとして、1890年代のエジソン ( Edison ) の2極管に始まる真空管の進歩がある。陰極から陽極に流れている電子電流を陰極・陽極間にある格子 ( Grid ) で制御する電子管 ( Gridded Tube ) である。しかし、電子が陰極から陽極に達するまでの時間 ( 走行時間 ) は有限であるため、周波数が高くなると格子への入力信号と陽極からの出力信号との位相差が問題となってくる。さらに回路のインダクタンスや分布容量も無視できなくなる。電磁波の波長が真空管や回路の寸法に近くなると、電磁波の発生・増幅の効率が極端に下がる。実用的な真空管回路の周波数の上限は100 MHz程度である。テレビ放送のVHF ( Very High Frequency: 54 MHz - 88 MHz ) 帯はこの上限に近い。

レーダーや高品質の画像を扱う情報通信分野などで電磁波を利用するためには、マイクロ波領域まで周波数を上げ、指向性の向上や帯域幅を増加させることが必要で

author's e-mail: teogura@eng.niigata-u.ac.jp

ある．そこで格子を介した回路に依らず，電子ビームを発振・増幅回路とすることが考えられた．この発想に基づく電子管が1940年前後に次々と開発された．電子ビームと電磁波を直接に相互作用させるため，遅波構造を用い電磁波の位相速度を電子ビームの速度まで遅くする遅波マイクロ波源である．その一つとしてクライストロン (Klystron) がある．この装置は，複数の空洞共振器とその間のドリフト管により構成されている．電子ビームは最初の空洞内で電磁波との相互作用により速度変調を受け，ドリフト管を伝搬しながら走行時間の差により集群 (bunching) して密度変調を形成する．そこに空洞共振器を置くことで増幅された信号が電磁波として得られる．クライストロンでは速度変調と密度変調は別々の空洞で起こるが，両者が遅波構造中に分散して渾然一体で起こる電磁波源も開発された．マグネトロン (Magnetron)，進行波管 (Traveling Wave Tube)，後進波発振器などである．このように電子ビームの速度変調と密度変調を使うことで，周波数の上限は 10 GHz 程度まで上昇した．1940年代のレーダー開発に欠かせない電磁波源である．その後，1960年代以降の半導体技術の進歩で，小型で軽量のマイクロ波システムが可能となった．またレーザーや光ファイバー通信などの技術開発もあり，1970年代以降通信分野における電子管の研究開発は一時下火になった．しかし電力が kW 級前後あるいはそれ以上のマイクロ波源としては優れており，例えば，今や生活の必需品ともいえる電子レンジでは，2.45 GHz のマイクロ波源としてマグネトロンが用いられている．

レーザーは可視光や赤外線領域で重要な電磁波源であるが，個体や分子あるいは原子における電子のエネルギー状態の転移を利用しており，ミリ波・サブミリ波帯では特性が悪くなる．光源として使うにはエネルギーの高い状態の電子数を相対的に多くした反転分布を作る必要がある．このために放射電磁波の光子エネルギーが熱エネルギーより十分大きいことが要求される．例えば，常温 (300 K) の熱エネルギーに対応する光子エネルギーを持つ電磁波の周波数は数 THz 程度となり，サブミリ波領域である．この領域より周波数を下げたレーザー動作は困難と言える．電子ビームを用いる電子管では自由電子の運動エネルギーを用いるためこのような問題は生じない．しかし，遅波電磁波源では動作周波数帯の波長程度の遅波構造が必要となる．このためミリ波・サブミリ波帯での大電力電磁波発生は困難で，1 W 程度あるいはそれ以下の小電力に限られていた．

1960年代に入りパルスパワー技術が開発され，電圧 1

MV 以上で電流 1 kA 以上の電源が可能になった．10ナノ秒～100ナノ秒の短パルスであるが電力では 1 GW 以上である．日本や世界全体で消費する電力に相当する数 100 GW や数 TW を超えることも可能となった．この技術は，核融合科学の分野に限らず産業応用などさまざまな分野で新しい領域を切り開いていった [12, 13]．電磁波源においては，それまでにない大強度相対論的電子ビーム (Intense Relativistic Electron Beam) を用いた電子管が登場した [13, 4]．後進波発振器やマグネトロンなどの遅波マイクロ波源を相対論的領域で動作させ，ミリ波帯でピーク電力が GW 級の発振も可能となった．大強度相対論的電子ビームを用いることで入射電力が増加することに加えて，電子ビームと電磁波の相互作用領域も改善される．電子ビームの速度が遅いとそれと相互作用する電磁波は遅波構造近くに集中する．効率的な相互作用のためには電子ビームを遅波構造すぐ近くの限られた領域に集中させる必要があり，大電力での動作は困難であった．これに対し光速に近い相対論的電子ビームと相互作用する電磁波は共振空洞内で比較的広く分布するためこの問題が緩和される．

遅波ではなく速波を利用したのが自由電子レーザーとジャイロトロンである．電子ビームには周期的固有運動 (角周波数  $\Omega$ ) が必要である．この運動に適当なものを選ぶことで，電磁波と相互作用することになる．その同期条件 (共鳴条件) は  $\omega = k_z v_z + n\Omega$  で与えられる．ここで， $v_z$ ,  $n$ ,  $\omega$ ,  $k_z$  はそれぞれビームの伝搬速度，電子固有振動のハーモニック数，電磁波の角周波数，伝搬方向の波数である．右辺第 1 項はよく知られているドップラー効果，第 2 項が電子の固有運動の効果である．固有運動のない ( $\Omega = 0$ ) 場合がすでに述べた遅波電磁波源に対応する．固有運動として磁場中の相対論的電子サイクロトロン運動を使うのが電子サイクロトロンメーザー (ECM)，周期的磁場や周期的電場による電子の固有運動を用いるのが自由電子レーザーである．電子ビームの固有振動による項 ( $n\Omega > 0$ ) のため同期する電磁波の位相速度  $\omega/k_z$  は光速より早くなる．ジャイロトロンは  $k_z = 0$  に近い領域つまり位相速度  $\omega/k_z = n\Omega/k_z$  は無限大に近い領域で動作する ECM である．ドップラー効果による影響が少なく，ビーム速度  $v_z$  に広がりがあったとしても同期を保つことが容易である．したがって発振効率も高く，30%～50%のものが実用化されている．

遅波や速波を使う電磁波源とは機構の異なるものも登場した．大電流電子ビームの空間電荷効果を利用する仮想陰極発振器 (Virtual Cathode Oscillator) あるいはバル

カトール (Vircator) と呼ばれている電磁波源である。ビーム密度すなわちビーム電流が上がると、空間電荷による電位も大きくなり、対応してビーム速度は減少する。ビーム電流が空間電荷制限電流 (Space Charge Limiting Current) に達すると、ビーム速度はゼロとなり仮想陰極 (Virtual Cathode) が形成される。仮想陰極と仮想陰極の影響を受けた電子ビームはともに電子ビームのプラズマ周波数に近い周波数で振動し電磁波を放射する。大強度相対論的電子ビームにより、20 GHz程度までの周波数帯において広帯域発振が可能である。代表的な効率率は数%であるが、GW級の発振が得られている。原理的には磁場を必要とせず構造が比較的単純であるため、コンパクトな大電力広帯域電磁波源として研究が進められている[18]。

電磁波を時間的に集約することで、同じエネルギー量で電力を高めることができる。いわゆる放射電磁波のパルス化である。レーザーや電子ビームを用いた電子管による高出力パルス電磁波発生については、本学会誌の講座11Jで取り上げられている。高出力パルス電磁波発生の基礎と計測および応用例について詳しく説明されているので参照して頂きたい。既に述べたように、現在のミリ波・サブミリ波帯の大電力電磁波源は電子ビームを用いた電子管である。1GW級以上の大電力動作においては、途中で発振が止まるパルスショートニング (pulse shortening) と呼ばれる特性劣化の問題があるが[8]、電子ビームは同期条件が満たされる限り電磁波と相互作用するため、原理的にCW動作が可能な電磁波源である。従って電磁波のパルス化は、エネルギー源である電子ビームをパルス化することで実現するのが一般的である。電子ビームのパルス化としては、以下の方法が考えられる。

1. 陰極電圧制御による電子ビームのパルス化
2. 高周波電場利用によるパルス電子ビームの生成
3. 電子ビーム伝搬制御によるパルス化

陰極電圧制御による電子ビームのパルス化では、パルスパワー電源でパルス圧縮した高電圧を陰極に加えて、電子ビームパルスを取り出すものである。通常、パルス幅10ナノ秒～100ナノ秒程度である。さらなる短パルス化を実現する時の問題点としては、電源や陰極のインダクタンスの影響が考えられる。また、数100A以上の大電流電子ビーム発生には通常冷陰極が使われるが、陰極表面での電子放出面の形成にも時間を要する。これらの影響を考えると陰極電圧制御でサブナノ秒の電子ビームパルスを実現することは非常に困難であると言える。

高周波電場を利用したパルス電子ビーム発生では、マイクロ波空洞を電子ビームダイオードとして使用するMPG (Micro-Pulse Gun) が提案されている[14]。電子は空洞内を高周波電場に同期して往復するが、そのとき空洞両端の壁に衝突し2次電子を放出しながら増殖していく。一方の壁を格子とすることで、空洞内に貯まった電子の一部がビームとして取り出される。1GHz～12GHzのマイクロ波を使い1ピコ秒～100ピコ秒 (マイクロ波周期の約5%程度) の電子ビームパルスが得られている。エネルギーと電流値はそれぞれ300keVと50A程度である。比較的大電流でピコ秒の電子ビームパルスが得られる。今後の開発が期待される。また、高強度レーザー光 (UV領域) を使うフォトカソード (Photo-cathode) がある。この場合、電子発生機構は2次電子ではなくレーザー光照射による光電子放射となる。

伝搬制御による電子ビームのパルス化としては、電子ビームと伝搬空洞との相互作用による自動変調がある。速度変調を利用した電子ビームの収群によるパルス圧縮である。速度変調は、前述したクライストロンのような電磁波源に使われているが、逆に電磁波を利用して電子ビームを束ねることも可能である。電子ビーム入射時に励起される電磁波を利用しパルス圧縮するのが自動変調方式である。本講座の第4章にわかりやすく説明するので参照していただきたい。

1995年、Mori等によりプラズマを利用したパルス電磁波発生の実験が報告された[15]。プラズマ密度の時間的な不連続性による電磁波発生であり、本質的にパルス動作となる。実験では、電磁波の周期あるいはそれ以下の短い時間スケールで変化するプラズマを使っている。CW動作が可能な電子ビームを用いる電磁波源とは電磁波発生の原理が全く異なるものである。時間的に変化するプラズマと電磁波が相互作用した場合、プラズマ中の電磁波の周波数は変化する[3のChapter4, 16, 17]。これを時空間での電磁波の反射・透過の視点から見る。まず空間的不連続の場合、よく知られているように電磁波は反射あるいは透過する。そのとき変化するのは波数である。時間的不連続の場合も電磁波の反射・透過は起きる。ただし、この場合に変化するのは波数ではなく周波数である。反射・透過の際に電磁波のエネルギー源となる機構を加えることで、ゼロから有限な値への周波数上昇つまり電磁波発生 (発振) が可能となる[15]。この原理によりパルス幅がナノ秒あるいはサブナノ秒のミリ波・サブミリ波帯電磁波パルスを得ることができる。興味ある原理・機構を含んでおり、プラズマ物理さらにはプ

ラズマ応用の視点からも重要で積極的に研究が進められている。

この講座の目的は、プラズマを利用したパルス電磁波放射の物理と機構の基礎を提供することである。全体の構成は以下の予定である。

- 2月号 1. はじめに (新潟大:小椋一夫)  
 2. プラズマ利用パルス電磁波発生の基礎<sup>(1)</sup>  
 (宇都宮大:湯上 登)
- 3月号 3. プラズマ利用パルス電磁波発生の基礎<sup>(2)</sup>  
 (宇都宮大:湯上 登, 金沢大:鎌田啓一)  
 4. サブナノ秒領域パルス電子ビームの生成と電磁波発生  
 (金沢大:鎌田啓一)
- 4月号 5. 放電プラズマによるパルス電磁波発生  
 (宮崎大:東口武史, 宇都宮大:湯上登)  
 6. プラズマ利用パルス電磁波発生の現状と将来展望  
 (宇都宮大:湯上 登)

第2章では、時間変化するプラズマによる周波数上昇の原理を述べる。第3章は、それを利用したパルス電磁波発生とパルス電子ビームを用いた電磁波発生の原理的な説明である。第4章と第5章では、実例を示し原理との対応および原理を実現するための技術について解説する。第6章は、まとめである。

(新潟大学工学部 小椋一夫)

## 参考文献

- [ 1 ] V.L. Granatstein and I.A. Alexeff (edited), *High-Power Microwave Sources* (Artech House, Boston, 1987).
- [ 2 ] 電気学会自由電子レーザー調査専門委員会 編:「自由電子レーザーとその応用」(コロナ社, 1990).
- [ 3 ] A.V. Gaponov-Grekhov and V.L. Granatstein (edited), *Application of High-Power Microwaves* (Artech House, Boston, 1994).
- [ 4 ] J. Benford and J. Swegle, *High-Power Microwaves* (Artech House, Boston, 1994).
- [ 5 ] 坂本慶司, 今井 剛:「解説:EC加熱用ジャイロトロンの高出力と高効率化」, プラズマ・核融合学会誌 71, 5 (1995).
- [ 6 ] 出原敏孝編:「小特集:高出力ジャイロデバイスの最近の展開」, プラズマ・核融合学会誌 73, 273 (1997).
- [ 7 ] 出原敏孝:「解説:遠赤外領域光源 - ジャイロトロン

の開発と応用 - 」, プラズマ・核融合学会誌 77, 3 (2001).

- [ 8 ] R.J. Barker and E. Schamiloglu (edited), *Application of High-Power Microwave Sources and Technologies* (IEEE Press Series on RF and Microwave Technology, 2001).
- [ 9 ] 間瀬 淳 編:「講座:ミリ波・サブミリ波計測の基礎と応用」, プラズマ・核融合学会誌 71, No.1-6 (1995).
- [ 10 ] 間瀬 淳 編:「小特集:大型装置計測のためのミリ波技術の開発」, プラズマ・核融合学会誌 74, 1382 (1998).
- [ 11 ] 西田 清 編:「講座:高出力超短パルス電磁波とプラズマの相互作用」, プラズマ・核融合学会誌 73, No.4-10 (1997).
- [ 12 ] 秋山秀典 編:「小特集:パルスパワー技術開発の現状」, プラズマ・核融合学会誌 69, 191 (1993).
- [ 13 ] 電気学会パルスパワー放電とその高度利用技術調査専門委員会 編「パルスパワー放電の物理とその高度応用研究の動向」, 電気学会技術報告 793 (2000).
- [ 14 ] F.M. Maco and L.K. Len, "Self-Bunching Electron Guns," *High-Energy Density Microwaves*, edited by R.M. Phillips, pp.41-50 (Pajaro Dunes, California, 1998).
- [ 15 ] W.B. Mori, T. Katsouleas, J.M. Dawson and C.H. Lai, *Phys. Rev. Lett.* 74, 542 (1995).
- [ 16 ] S.C. Wilks, J.M. Dawson and W.B. Mori, *Phys. Rev. Lett.* 61, 337 (1988).
- [ 17 ] D.K. Kalluri, *Electromagnetics of Complex Media (Frequency Shifting by a Transient Magnetoplasma Medium)*, (CRC Press, Boston, 1998).



おぐら かず お  
小椋 一夫

平成元年に新潟大学に着任、現在は同大学工学部電気電子工学の教授。電磁波によるプラズマ加熱、プラズマ制動X線計測を経て、現在は主に電磁波源。クリスマスにサンタさんが来ますようにと、お願いの手紙とねぎらいのアメを用意した息子。アメがなくなり、ハムスターが!。ミミズ、ダンゴムシの小動物から馬、猫まで動物が大好きな息子は大喜び。アメはサンタさんが食べた!?