

添付資料 (4)

3.16 マイクロ波発生

3.16.1 はじめに

大強度電子ビームを用いた大電力マイクロ波源の研究は、近年のパルスパワー放電技術の進歩にともない著しく進展している⁽¹⁾。この章では、パルス放電により得られる電子ビームを用いたマイクロ波発生について述べる。電子ビームと電磁波の共鳴相互作用は、 $\omega = k_z v_z - s\Omega$ を満たす場合に起こる。ここで、 ω と k_z は電磁波の角周波数と軸方向の波数、 v_z はビームの軸方向速度、 Ω はビーム電子の相対論的サイクロトロン角周波数である。 s は任意の整数で、正(負)の場合、速波(遅波)サイクロトロン共鳴、零ではチェレンコフ共鳴と呼ばれている。

チェレンコフ共鳴による大電力遅波マイクロ波源としては、後進波発振器やチェレンコフメーザが研究されている。また、近年になり大電力遅波サイクロトロンメーザ実験が報告され⁽²⁾、遅波サイクロトロン共鳴による遅波マイクロ波源についても注目されるようになった。遅波サイクロトロン共鳴とチェレンコフ共鳴の特徴は、電子の軸方向エネルギーを電磁波エネルギーに変換できることであり、垂直方向の電子エネルギーを必要とする速波サイクロトロンメーザとは本質的に異なる。これらの共鳴による遅波マイクロ波源は、垂直方向にビームエネルギーを与えるための複雑な構造を必要とせず、大電流電子ビームを用いる場合に非常に有利である。

3.16.2 遅波導波管

遅波マイクロ波源においては、マイクロ波の位相速度を電子ビームと相互作用する速度まで減じるために、遅波構造を用いる。誘電体を用いた構造と周期的構造の2種類があるが、大電流電子ビームを通すことを考慮して、帯電の問題の無い周期的管壁を有する導波管とした(図3-16-1)。周期的遅波導波管の構造は3つのパラメータで決まる。すなわち、平均半径 R_0 、コルゲート周期長 z_0 およびコルゲート振幅 h である。以下の実験で使用した大口徑遅波導波管では、 $R_0=30\text{mm}$ 、 $z_0=3.41\text{mm}$ 、 $h=1.7\text{mm}$ である。このパラメータは、基本モードである TM_{01} モードでの20GHz帯の発振が得られるように設定された。実験的研究の進んでいるXバンド後進波発振器(8GHz帯)の代表的遅波導波管パラメータと比較して、大電力化の基礎実験のため口径を大きくし、高周波数化のために周期長と振幅を小さくしている。また、全長は $L=70z_0$ である。コルゲート周期長およびコルゲート振幅を小さくすると、チェレンコフ共鳴によるビーム・マイクロ波相互作用は弱くなり、それによる発振は期待できなくなる。このような場合でも、遅波サイクロトロン共鳴を利用することで大電力マイクロ波の発生が可能となる。

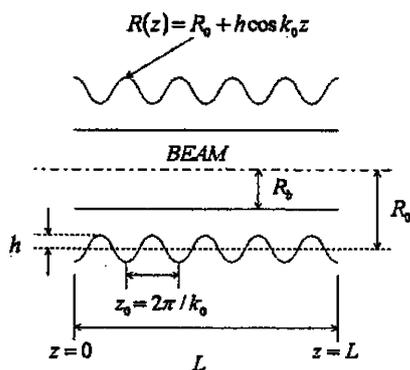


図3-16-1 周期的遅波導波管

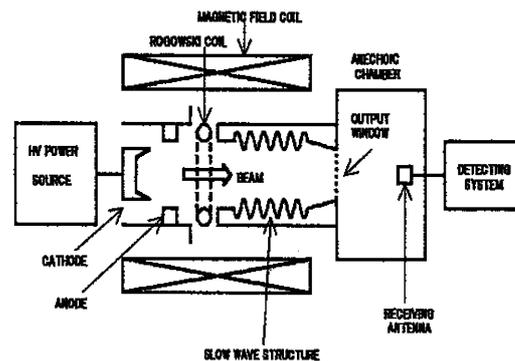


図3-16-2 実験装置の構成

3.16.3 大電流パルス電子ビームを用いた遅波サイクロトロンメーザ実験

大口徑遅波導波管に大電流パルス電子ビームを入射した場合のマイクロ波発生の実験を行った。図3-16-2に実験装置の構成を示す。軸方向の磁場は陰極から遅波導波管の終端まで約5%以内で均一である。電子ビーム源には冷陰極を用いているが、その表面にはベルベットを張り付けている。これにより、印加電圧が30kV程度でも比較的安定な電子ビームを発生することができた。電流値は約150A、パルス幅は約100nsであった。陽極より取り出した電子ビームは、円環状で半径約26mm、厚み1mm程度である。電子ビームは、大口徑遅波導波管内で遅波と相互作用しマイクロ波を発生する。

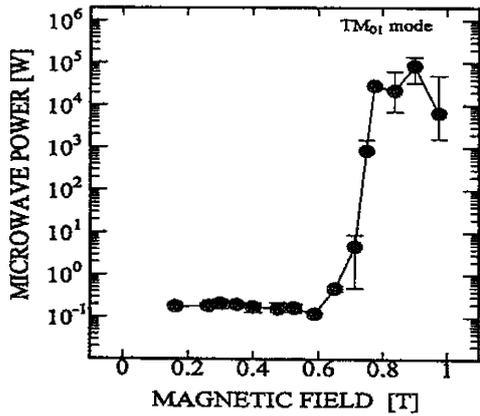


図 3-16-3 遅波サイクロトロンメーザ実験

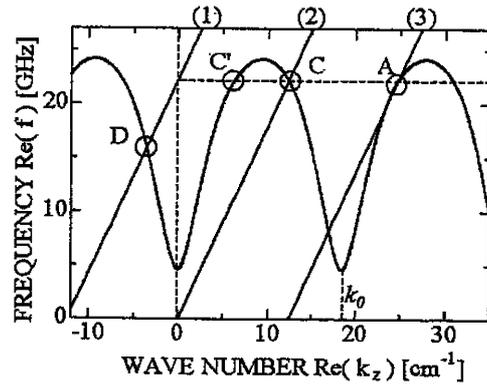


図 3-16-4 遅波サイクロトロンメーザの動作原理

図 3-16-3 に軸方向磁場強度とマイクロ波出力の関係を示す。マイクロ波の共鳴的増加が観測された。周波数は 20GHz 帯である。マイクロ波出力の放射パターンと偏波特性から、 TM_{01} モードでの発振といえる。これは、図 3-16-4 に示すようにチェレンコフ共鳴と遅波サイクロトロン共鳴の 2 つの共鳴が同時に起きる遅波サイクロトロンメーザ動作で説明できる。図の周期的曲線は TM_{01} モード、直線 (1), (2), (3) は、それぞれ $\omega = k_z v_z - \Omega$, $\omega = k_z v_z$, $\omega = k_z v_z + \Omega$ のビームモードである。C 点のチェレンコフ共鳴によるマイクロ波出力は、図 3-16-3 の低磁場領域のマイクロ波出力レベルで、非常に小さい。このマイクロ波が A 点の遅波サイクロトロン共鳴で増幅されるようになると、C 点のチェレンコフ共鳴と協調して大電力マイクロ波発生に至ると考えられる。電子ビームの垂直方向エネルギーが必要な、D 点の速波サイクロトロン共鳴の影響は見られなかった。

3.16.4 磁場ゼロにおける後進波発振器

遅波サイクロトロンメーザでは、電子ビームを伝搬させるために軸方向磁場を用いている。この場合、磁場コイルとその電源のため、システム全体は大型、複雑になる。装置をコンパクトにするために磁場を用いない後進波発振器が考えられる。磁場ゼロで大電流電子ビームを伝搬させるためにプラズマを用いる。この実験では、電子ビームを中性ガス中に入射し、ビーム伝搬に必要なプラズマを生成している。磁場ゼロの後進波発振器は、磁場コイルが不要であるという実用面での利点に加え、チェレンコフ共鳴と遅波・速波サイクロトロン共鳴が縮態した相互作用を利用しており、物理的にも興味のあるテーマである。

大口径遅波導波管を用いたマイクロ波発生の実験結果を図 3-16-5 に示す。印加電圧約 50kV で、ビーム電流は約 150A である。マイクロ波出力に適した中性ガス圧が存在する。周波数は 20GHz 帯であったが、発振電力は、最大で 1kW 程度と見積もられ、遅波サイクロトロンメーザの場合と比べて 2 桁程度低かった。

出力マイクロ波の放射パターンと偏波特性から、軸対称 TM モードと非軸対称 TE モードでの発振が確認された。Xバンド領域以下の周波数帯でも、同様の発振モードが報告されている⁽³⁾。軸方向入射電子ビームによる TM モードの発振はチェレンコフ共鳴と遅波・速波サイクロトロン共鳴が縮態したビーム・電磁波相互作用によるものと考えられる⁽⁴⁾。しかし、 TE モードでの発振機構については、現時点では、明らかでない。

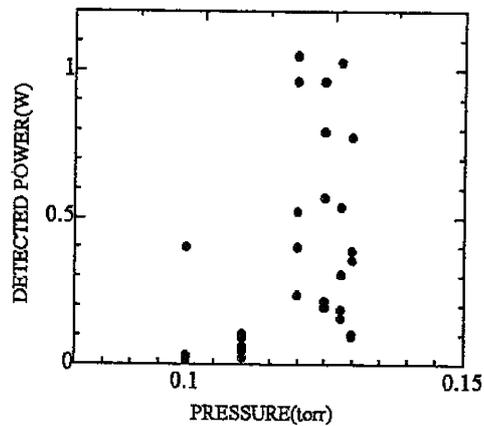


図 3-16-5 磁場ゼロにおける後進波発振器実験

3.16.5 まとめ

誘電体装荷の遅波導波管を用いた遅波サイクロトロンメーザにおいては、チェレンコフ共鳴と遅波サイクロトロン共鳴は競合すると考えられていた⁽⁵⁾。周期的遅波導波管を用いた遅波サイクロトロンメーザにおいては、2 つの共鳴が互いに協調して大電力マイクロ波の発生が可能であることが示された。この協調には、図 3-16-4 に示すように、電磁波分散特性が波数空間内で周期的であることが重要と考えられるが、

さらに定量的な実験・研究が必要である。

磁場ゼロにおける後進波発振器においては、電子ビームの形状は円環状ではない。半径 10mm 程度で全体に広がった分布をしている。この場合、遅波サイクロトロンメーザ実験に比べビームと遅波導波管管壁との距離は大きい。このためビームと電磁波との相互作用は弱くなり、発振出力も下がったと思われる。プラズマを用いた電子ビームの空間分布制御が必要である。また、軸対称 TM モードと非軸対称 TE モードの発振機構については、軸方向およびそれと垂直方向の電子ビームの擾乱を取り入れたセルフコンシステントな解析が必要と考えられる。電子ビームを含むセルフコンシステントな導波管モードは、純粋な TM や TE モードではない可能性がある。実験により発振モードの成分比を正確に決定し、理論と比較検討する必要がある。

報告した遅波サイクロトロンメーザや磁場ゼロでの後進波発振器の実験は、30~50keV と比較的低エネルギーで 100~200A の大電流電子ビームを用いている。放電に必要な電源は比較的小型であり、パルス放電の応用分野として今後の発展が期待できるテーマである。

参考文献

- (1) J.N.Benford and J.A.Swedge: High Power Microwaves (Artech House, 1992).
- (2) K.Ogura, M.R.Amin, K.Minami, X.D.Zheng, Y.Suzuki, W.S.Kim, T.Watanabe, Y.Carmel, and V.L.Granatstein: "Experimental Demonstration of a High-Power Slow-Wave Electron Cyclotron Maser Based on a Combined Resonance of Cherenkov and Anomalous Doppler Interactions", *Phys. Rev. E* **53**, 2726-2729 (1996).
- (3) D.M.Goebel, J.M.Butler, R.W.Schumacher, J.Santoru and R.L.Eisenhart: "High-Power Microwave Source Based on an Unmagnetized Backward-Wave Oscillator", *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **22**, 547-553 (1994).
- (4) K. Ogura, T. Azegami, O. Watanabe, and T. Watanabe: "Interaction of Axially Streaming Electron Beam with Axisymmetric TM Mode in a Periodical Slow Wave Structure with Finite Magnetic Field", *J. Phys. Soc. Jpn.*, **67** (1998) 3462.
- (5) T.H.Kho and A.T.Lin: "Cyclotron-Cherenkov and Cherenkov Instabilities", *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **18**, 513-517 (1990).