

# 高周波数化及び小型化を目指した 後進波発振器に関する数値解析

山 寄 星 征\*

## Numerical Study on High-Frequency and Compact Backward Wave Oscillator

by Hoshiyuki YAMAZAKI

大強度電子ビームを用いたミリ波帯における軽量・コンパクトな大電力マイクロ波源を目指した後進波発振器 (Backward Wave Oscillator, BWO) の研究を行っている。大電力マイクロ波源としては、速波サイクロトロン共鳴相互作用を用いたサイクロトロンメーザやジャイロトロンもよく知られている。チェレンコフ相互作用を主な発振機構とする遅波マイクロ波源である BWO は軸方向入射の電子ビームで駆動できるという特徴を持つ。旧来の BWO は大強度相対論的電子ビームの効率的な伝搬のために大強度の磁界を用いていたが、低磁場領域での稼動であれば強磁場コイルシステムと、その電源システムの省略が期待できる。しかし、低磁場領域ではサイクロトロン運動の影響が強くなり、軸方向の擾乱によるチェレンコフ相互作用に加え、軸方向に対して垂直方向の擾乱による遅波サイクロトロン不安定性の効果もあらわれる。チェレンコフ不安定性と遅波不安定性は相互に影響しあい共鳴的に増幅、あるいは減少する事が報告されている。このため、磁場強度を有限とした解析、特に低磁場領域では2つの不安定性の影響を詳細に解析する必要がある。また、BWOにおいて大口径の導波管を用いる事で高周波化及び大電力化を目指す事ができる。発振マイクロ波の波長に対して導波管の半径が数倍の大きさを持つものが大口径導波管と呼ばれている。大口

径遅波導波管中の電磁波は表面波となり、大口径でない遅波導波管中における体積波と違った特性を持つため、その解析を行う必要がある。

本論文の構成は7章からなり、数値解析を主体の一部は実験結果との比較についても行った。第1章では本論文の目的・意義と構成を述べる。ミリ波帯における軽量・コンパクトな大電力マイクロ波源としての BWO の意義、他の大電力マイクロ波源や速波サイクロトロンメーザであるジャイロトロンと比べた位置付けを述べる。

第2章では、本論分で用いている2つの計算手法について述べる。従来用いてきた R-B 法 (Rayleigh-Bessel method) は電子ビームの擾乱を3次元的に解析する事が可能で、電子ビームと遅波導波管内の固有モードとの相互作用をセルフコンシステントに解析することができる。このためマイクロ波の発振動作の解析や装置の設計が容易となり非常に有用である。しかし、この手法では遅波導波管の溝の深さがある程度以上になると溝の内部に特異点が発生する問題も存在する。そのため、この R-B 法の精度がどの程度得られているかを、HIDM (higher-order implicit difference method) を用いて比較検討を行った。HIDM は非線形な固有値問題や境界値を数学的に高精度かつ安定に解くことができる。電磁波と電子ビームの相互作用を取り入れるには大変な困難を伴

\*新潟大学大学院自然科学研究科

現在 長岡技術科学大学極限エネルギー密度工学研究センター  
[新潟大学博士 (工学) 平成 17 年 3 月 23 日授与]

うが、導波管中の電磁界特性や固有モードの分散式は高精度で導出する事が可能である。結果として、X-band (9 GHz) 帯では、特異点は生じているが、実験結果との比較も含めて得られる解析結果に信頼性があることを示した。

第3章では、電子ビームの擾乱をセルフコンシステントに扱ったモデルにより、従来の理論では扱うことが困難であった非軸対称遅波サイクロトロンメーザ動作を報告する。このメーザ動作は遅波電磁波源の新たな発振機構として注目されている。解析では高次のモードも含めて磁場依存特性を求めた。また、高次のモードについては電界磁界比を用いて、そのモード名称を決めた。

第4章では、低磁場領域におけるBWOの解析を報告する。低磁場領域においては、サイクロトロン運動の影響がより強く現れ、非軸対称モードの遅波サイクロトロン不安定性が軸対称モードのチェレンコフ相互作用を超える事も分かった。また、ある磁場領域以下ではチェレンコフあるいは遅波サイクロトロン不安定性のどちらかが抑制される。これらの条件として、磁場と電子ビームの向き、そして電子のサイクロトロン運動の方向が重要となる。

第5章では、大口径導波管を用いた場合について報告する。古くから研究されている遅波導波管中で

の電磁波は、導波管全体に広がる体積波であるのに対し、大口径導波管中では表面波になる。このため、入射ビームの形状精度がより重要となる。これについては、実験との比較を行いビーム径の影響を確認した。

第6章では、R-Bプログラムを発展させ有限長の導波管を用いた場合の解析を用いて、発振電圧と軸方向モードの影響について数値解析を行い、実験結果との比較を行った。大口径の遅波導波管を用いる場合、発振に最低限必要な電流の他に、導波管形状から求められる相互作用の領域から発振に必要な最低限の電圧が存在する。これについて数値解析を用いて発振に必要な電圧を求め、実験による検証を行った。また、導波管中において発生する定在波の影響(軸方向モード)により発振出力が受ける影響についても述べる。

第7章では、これらの結果をまとめている。

本研究は、二つの不安定性の相互の影響を非軸対称モードまで含めて、特に低磁場領域に着目した解析を行った。また、高周波数化の為に大口径導波管の精度検証・解析も行っており、大電力遅波マイクロ波源の高周波数化及び小型化を目指した設計や研究・開発に重要であると言える。