

Linear analysis of IREB-plasma instabilities in a circular waveguide immersed in a finite axial magnetic field

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-10-05 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/2297/16406

氏名	佃 浩志
生年月日	
本籍	富山県
学位の種類	博士(理学)
学位記番号	博甲第427号
学位授与の日付	平成13年3月31日
学位授与の要件	課程博士(学位規則第4条第1項)
学位授与の題目	軸方向に有限磁場のかかった円形導波管中での IREB-プラズマ不安定性の線形解析
論文審査委員(主査)	鎌田 啓一(理学部・教授)
論文審査委員(副査)	安藤 利得(理学部・教授) 石塚 浩(福岡工業大学・教授) 出原 敏孝(福井大学・教授) 増崎 克(金沢大学名誉教授)

学位論文要旨

Abstract

Microwave radiation is emitted when the Cherenkov and the cyclotron-Cherenkov instabilities are driven by an intense relativistic electron beam (IREB) injected into a dielectric-lined circular waveguide immersed in a finite axial magnetic field.[1] Enhancement of output power of radiation is expected when a plasma is introduced into the waveguide. In a magnetized plasma, the beam interacts with both the upper and lower branches of the Trivelpiece-Gould (T-G) modes,[2] and drives corresponding instabilities. We call these instabilities as the beam-plasma instabilities. Some authors treated theoretically these instabilities corresponding to the lower branches.[3] Also effect of the lowest mode of the upper branches is treated in a particle simulation by Lin.[4] However, as far as the authors know, there is no linear analysis of beam-plasma instabilities corresponding to the upper branches of the T-G modes. In this work, a dispersion relation is analyzed numerically in two cases. One is for waves driven by an IREB in a plasma-filled dielectric-loaded cylindrical waveguide immersed in a finite axial magnetic field. Another is for waves driven by an IREB in a plasma-filled cylindrical waveguide immersed in a finite axial magnetic field, as known as plasma Cherenkov maser. Also possibilities of nonlinear coupling of instabilities are discussed.

大強度相対論的電子ビーム (IREB) を軸方向に有限な磁場のかかった誘電体装荷円形導波管に入射すると (図1), チェレンコフ不安定性, サイクロトロン・チェレンコフ不安定性が起こり, それによってマイクロ波が放射される [1]。ここで, 導波管内にプラズマを封入することで, 荷電中和によるビーム電流の増加が見込め, マイクロ波の出力が上がることを期待されるが, このとき封入したプラズマによる波である Trivelpiece-Gould (T-G) モード [2] と IREB による波 (ビームモード) との相互作用でビーム・プラズマ不安定性がおこり, マイクロ波放射に何らかの

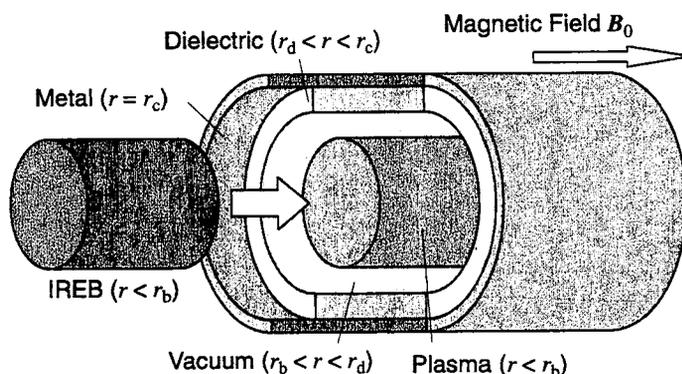


図 1: プラズマ封入誘電体装荷円形導波管

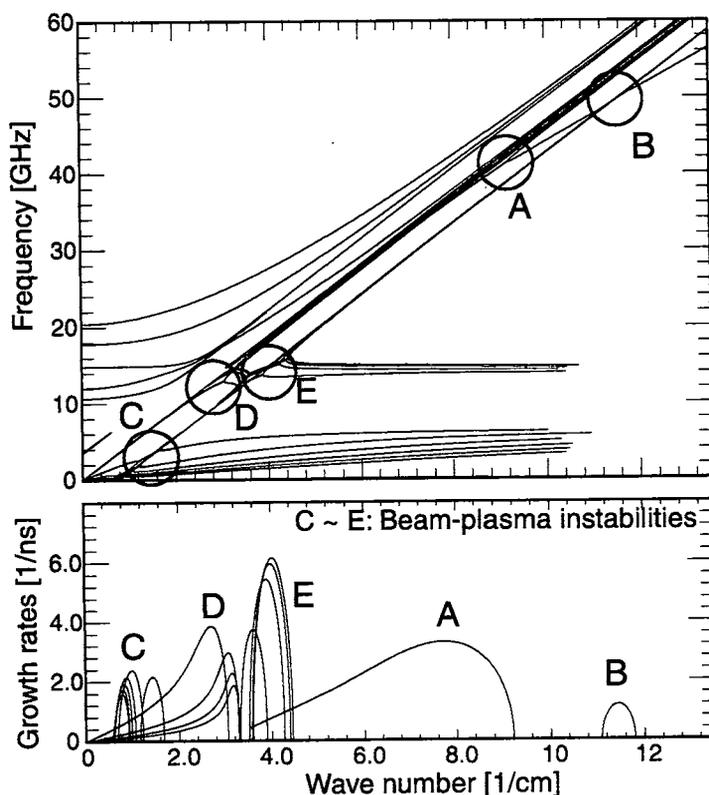


図 2: プラズマ封入誘電体装荷円形導波管に IREB を入射した場合の分散関係

影響を及ぼすことが考えられる。

有限磁場下でプラズマがある時、T-Gモードは高周波側、低周波側の2つの周波数帯域で存在する。T-Gモードが関係する不安定性についてはいくつかの理論的研究がなされてきたが [3, 4], チェレンコフ, サイクロトロン・チェレンコフ両不安定性に加えて、T-Gモードの2つの周波数帯域のどちらともを線形的に取り扱った研究は存在しなかった。

本研究では有限な磁場, プラズマ, 誘電体の全てを含む複雑な構造について線形解析を行い, 電磁波放射に与える影響を理論的に考察した。

線形解析を行うために, まず図1のようなモデルから流体近似モデルから分散関係式を導出した。分散関係式導出においては, 電磁場について全ての方向の成分を取り入れ, Maxwell方程式に矛盾をきたさないように注意した。この時, ビーム・プラズマ領域の電磁場は

$$iA \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial}{\partial r} E_z(r) \right) + B \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial}{\partial r} B_z(r) \right) + iC E_z(r) = 0$$

$$iD \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial}{\partial r} B_z(r) \right) + E \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial}{\partial r} E_z(r) \right) + iF B_z(r) = 0$$

の連立微分方程式に従い, TMモード, TEモードの区別がつかないハイブリッドモードとなることがわかった。導出された分散関係式は非常に複雑な形をしているため, 数値解析によって分散関係を得た。

本研究においては2つのケースについて解析を行った。1つは誘電体装荷円形導波管についての解析で, チェレンコフメーザ, サイクロトロン・チェレンコフメーザにプラズマを封入した場合である。もう1つは誘電体を含まない場合で (図4), これはプラズマチェレンコフメーザとして知られている。それぞれのケースについて不安定性を解析し, より強い電磁波放射の可能性について議論した。

1つ目のケースの誘電体装荷円形導波管についての解析からはチェレンコフ, サイクロトロン・チェレンコフ両不安定性と併せてビーム・プラズマ不安定性が起こることがまず示された (図2)。ビーム・プラズマ不安定性の励起周波数はT-Gモードの周波数に依存しているため, プラズマ周波数 f_p と電子サイクロトロン周波数 f_c をパラメータにとって解析したところ, $f_p > f_c$ の場合にビーム・プラズマ不安定性が強く励起することがわかった。このとき, チェレンコフ, サイクロトロン・チェレンコフ両不安定性は, 励起周波数がシフトアップし, 成長率も若干ながら増加することがわかったが, ビーム・プラズマ不安定性と線形的に結合して成長率が著しく増加することはなかった。しかし, これらの不安定性間で非線形な波の相互作用が起こることが分散関係から予測された (図3)。

2つ目のケースの誘電体を用いない, プラズマチェレンコフメーザについての解析においても, T-Gモードの高周波側との結合による不安定性が表れ, 実験で用いられる外部磁場強度では無視できないことがわかった。また封入するプラズマのプラズマ密度と外部磁場の関係によって, ビーム・プラズマ不安定性同士が線

形に結合して非常に強い不安定性となることがわかった (図 5)。ビームとプラズマの位置関係についての解析では、どちらが内側にあるかによって強く励起される不安定性は異なるが、ビームとプラズマが近い領域にあるときに成長率が大きくなることがわかった。特にビームとプラズマが同じ領域にある場合に非常に強い不安定性が励起することがわかった。さらに誘電体装荷円形導波管の解析と同様に、非線形な相互作用によって不安定性がさらに強められ、非常に強い電磁波が起こる可能性が示された。

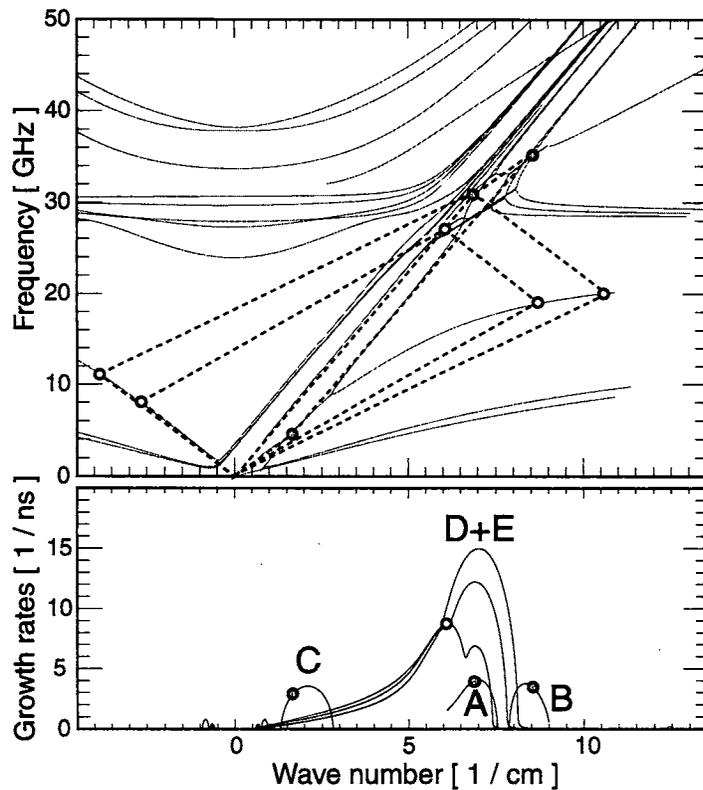


図 3: Stokes diagram によるパラメトリック不安定性の説明

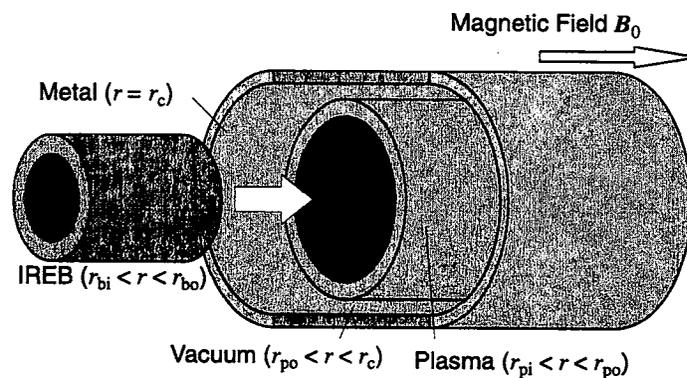


図 4: プラズマチェレンコフメーザのモデル

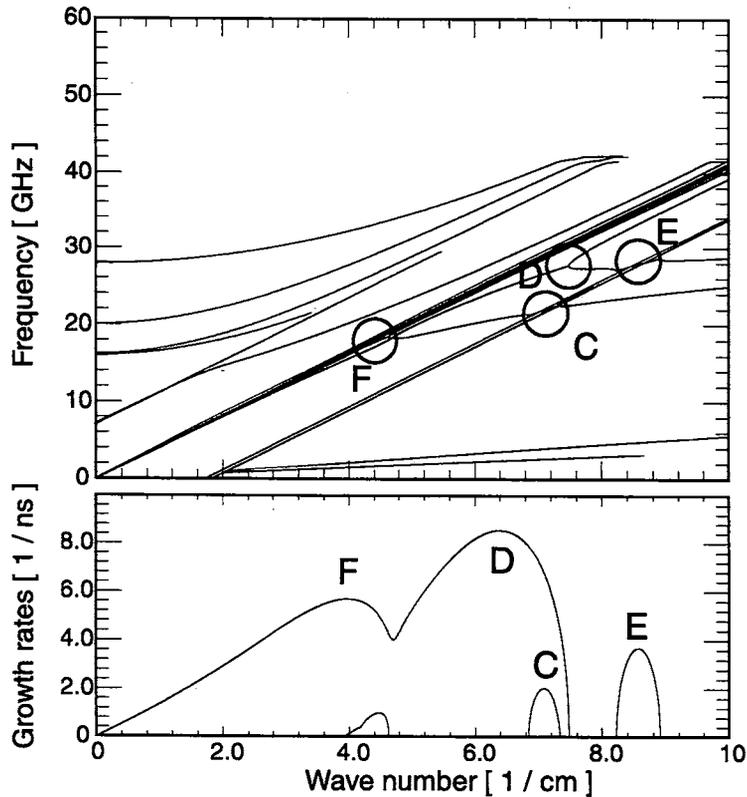


図 5: 有限磁場を考慮したプラズマチェレンコフメーザの分散関係

参考文献

- [1] C. Y. Lee, Ryoichi Yamashita, and Masaru Masuzaki, "Linear analysis of cyclotron-Cherenkov and Cherenkov instabilities in dielectric-loaded coaxial waveguides", *Intern. J. Infrared and Millimeter-Waves*, **18**, 519 (1997).
- [2] A. W. Trivelpiece and R. W. Gould, "Space charge waves in cylindrical columns", *J. Appl. Phys.*, **30**, 1784 (1959).
- [3] M. Birau, M. A. Krasil'nikov, M. V. Kuzelev and A. A. Rukhadze, "Problems in the theory of relativistic plasma microwave electronics", *Usp. Fiz. Nauk* **167**, 1025 (1997), [*Physics-Uspekhi (Engl. Transl.)*, **40**, 975 (1997)].
- [4] A. T. Lin, "Emission of plasma cyclotron waves in plasma-filled backward-wave oscillators", *Phys. Rev. Lett.*, **65**, 717 (1990).

学位論文審査結果の要旨

本論文について、論文内容および参考資料についての各審査委員による検討と評言の交換の後、1月29日に公開口頭発表会を行った。論文内容の検討結果、指摘された事項に対する対応、および口頭発表と質疑応答の内容をふまえて、口頭発表会の同日に審査委員会を開催し、本論文について以下のように判定した。

本論文では軸方向磁場中に設置された円形導波管中での直線大強度電子ビーム・プラズマ系の不安定性について、その大出力電磁波発生への応用の可能性を念頭に置いて、詳しい線形解析を行っている。導波管に誘電体を装荷した場合とホロープラズマ中にホロービームを入射した場合の2つのケースについてビームの種々の配置につき検討を行っている。解析にあたっては、従来の解析では簡単化のために無限に大きいとして取り扱われていた軸方向ガイド磁場の強さを有限として取り扱っている。その成果の主な点は以下の通りである。(1) 上記いずれのケースにおいても、まず、無限磁場を取り扱う時には問題にならなかったトリベルピース・グールドモードと電子ビーム波との相互作用による高周波側のビーム・プラズマ不安定性が、実際の実験で使用される程度の有限磁場では無視できないことを見出した。更に、プラズマ周波数が電子のサイクロトロン周波数より大きい場合ビーム・プラズマ不安定性同士の結合により非常に強い不安定性が起こることを見出した。(2) 誘電体を装荷した場合、ビーム内側は不安定性に殆ど関与しない事と、ビーム・プラズマ不安定性とチェレンコフ不安定性、サイクロトロン・チェレンコフ不安定性の間に非線形な波の相互作用が起こる可能性を指摘した。(3) ホロープラズマ・ホロービーム系の場合、ビームとプラズマの位置関係は不安定性に影響し、近くなるほど不安定性の成長率は増す事を明らかにした。各々のケースについて電磁場構造を解析し電磁波発生の可能性を検討している。これらの成果は、現実的な条件下でのこのような系からの電磁波発生機構に新たな知見を加えるものとして高く評価できる。こうした内容から、本論文は博士論文に十分に値するものと判定した。また、申請者は自立して研究を遂行するに必要な能力と学識を有していると認められ、博士の学位を授けるに値すると判断した。