

機関番号：12601

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2008 ～ 2010

課題番号：20760045

研究課題名（和文） X-BANDにおける表面波発振器の開発

研究課題名（英文） Development of surface wave oscillator in X-Band

研究代表者

渡邊 理 (WATANABE OSAMU)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・特任研究員

研究者番号：00397291

研究成果の概要（和文）：電磁表面波の存在を実験的に確認し、この電磁波を用いた X-band の発振器の開発を行った。（発振周波数可変）この波は、コルゲートした金属のような、周期的な遅波構造の表面近傍にある伝送モードであり、その存在は、解析的に示されていた。伝送試験（コールドテスト）で、この波のコルゲート板上での伝送を確認した。また、この波と電子ビームの間の相互作用特性（チェレンコフ不安定性と住みスパーセル型不安定性）を解析した。双方の結果を踏まえ、この電磁波を利用した発振器の設計・製作を行った。

研究成果の概要（英文）：An existence of an electromagnetic surface wave is confirmed experimentally and an oscillator which is using this wave is developed in X-band (oscillation frequency is controllable by beam voltage). The electromagnetic surface wave is transmission mode which is in the vicinity of the periodic slow wave structure surface (for example corrugated metal surface). The existence of this wave had been pointed out analytically. The transmission on the corrugated metal surface of its wave is confirmed by the cold test. And, the characteristic of the interaction (Cherenkov instability and Smith-Purcell type instability) between this wave and electron beam is analyzed numerically. The oscillator is developed based on these results.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,200,000	660,000	2,860,000
2009年度	700,000	210,000	910,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎

キーワード：電磁表面波 伝送モード チェレンコフ不安定性 スミス・パーセル型不安定性 周期的遅波構造

1. 研究開始当初の背景

空間を伝わる電磁波の分散式において、伝搬する波の波数を二成分に分解し、片方に純虚数解を与えると、光速以下で伝搬する波（遅波）が解として得られる。そこで、遅波構造として一枚のコルゲート板を境界条件

とした半空間で、電磁波の基礎方程式であるマクスウェル方程式から、ノーマルモードの分散式を導出し、収束計算を行うと、周期構造の表面近傍に、伝送モードである電磁表面波が存在する事が示された。そこで、この電磁波モードの存在の実証実験が必要となっ

た。

また、この電磁波モードを電磁波発振器に利用することを考えた。大電力電磁波発振が行えるジャイロトロンや後進波発振器等の電子管デバイスは、高周波を得るためには共振器である導波管を細くする必要がある。導波管を細くすればチャイルド-ラングミュア則により、入射電子ビームの最大電流が低下する。従って、発振周波数と発振出力は逆の関係にある。これに対し、コルゲート平板を共振器とすれば、発振出力はその面積に比例して得られ、高周波化するための微細加工も、導波管内壁加工に比べれば、比較的容易であると考えた。研究開始前の解析で、電磁表面波が空間電荷波とチェレンコフ相互作用を起こすことを確認しており、ビーム電圧によりこの相互作用の周波数が制御できることが予測された。従って、高出力かつ発振周波数が電圧制御できる発振器が作れると考えた。

本研究では、電磁表面波の存在を実験的に証明し、その工学的応用として、発振器の開発を試みた。

2. 研究の目的

(1) 物理的目的

電磁表面波の存在を、実験的に実証する。電磁波の基礎方程式に、周期構造が片側にのみ存在する半空間を境界条件として与えて、分散式を導出した。この分散式を数値計算した結果、周期境界面に沿って伝送するモードが存在する事が示された。計算で得られたこの電磁波モードの存在を確認し、その特性を実験的に検証する。

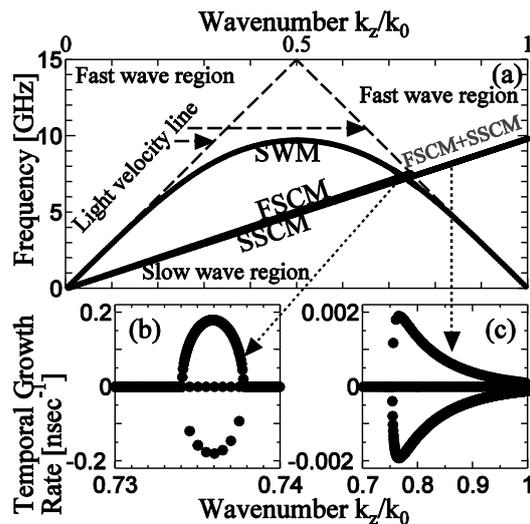


Fig. 1: (a)分散関係。(b)チェレンコフ不安定性時間的成長率。(c)スミス-パーセル型不安定性の時間的成長率。

(2) 工学的目的

発振周波数可変の高出力発振器の開発を行う。電磁表面波は、平板上の伝搬モードであり、高出力発振器である電子管デバイスのような、導波管を利用した発振器で無い。平板を利用した開放型共振器であり、発振器を駆動する電子ビーム電力が、空間的に制限されないため、チャイルド-ラングミュア則による発振出力の上限がない。また、発振器以外の応用機器にも利用できるよう、伝送特性を調べる。

3. 研究の方法

(1) 電磁表面モードの特性と、このモードと電子ビームモードが起こすチェレンコフ不安定性 (Fig. 1(b)) の性質を数値解析により調べる。また、この不安定性のスミス・パーセル型不安定性 (Fig. 1(c)) による影響を確認計算する。

このモードの実証実験と、この相互作用を発振原理に応用した発振器の開発を行うため、各種パラメータの決定を行う。実験装置の作製コストと時間を減らすため、自作できるパラメータを選ぶ。

(2) 周期的遅波構造 (コルゲート板) 上で電磁波の伝送試験を行い、電磁表面波の存在と特性を確認する。

伝送試験では、Fig. 2 に示すとおり、送受信アンテナ同士が正対して直接通信しないよう、コルゲートの谷間に設置する。針アンテナの長さは、励起したい周波数の 1/4 波長とすると効率が良いが、電磁表面波モードの基本波波長も、コルゲートの深さの 1/4 波長が基準となるため、針の長さと同程度となる。アンテナがコルゲーションから露出居ない事を優先し、針アンテナをやや短めにした。

Fig. 1(a) が示す上限遮断周波数 (計算値 9.72 GHz) 付近で伝送試験を行い、遮断周波数以上で、伝送が減衰することを確認する。また、コルゲートを一部マスクして、伝送できなくなる事を確認する。

(3) 得られた特性を基に、発振器の作成を行う。

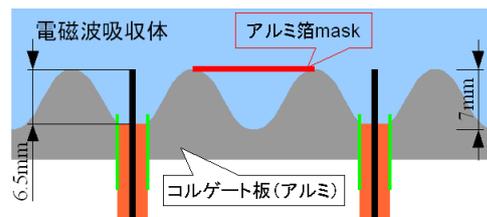


Fig. 2: 伝送試験。コルゲートの谷間に針アンテナを設置。コルゲートの両側面は電磁波吸収体で覆う。

4. 研究成果

(1) 電磁表面波の存在を実験的に確認した。コルゲート板上での伝送を確認した結果を、Fig. 3(b)に示す。コルゲートは、振幅3.5mm、波長10.0mm、アンテナ間の周期数は可変であり、Fig. 3では18である。送信電力は、Fig. 3(a)が示すとおり、周波数が高くなるにつれ増大している。また、数値計算により確認していた、遮断周波数(伝送周波数の上限)を、実験結果と比較し、良い一致をみた。さらに、コルゲートの途中をマスクしてフラットゾーンを設けると、伝送は減衰した。従って、コルゲートに起因した伝送モードが存在すると、結論付けた。

従来の導波路では、電磁波の反射により伝送モードが形成されるため、管や並行平板など対向する反射面を必要とした。これに対し、電磁表面波の実験配位では、境界面は片側にしか存在しないため、反射波は戻ってこない。従って、電磁表面波は、回折波の重ね合わせで、モードを形成していると考えた。

これらの実験により、片側にしか境界が無い場合でも伝送モードが存在する事が示され、その特性が数値解析により得た特性と一致した事から、実験で観測された伝送モードは電磁表面波であるとした。尚、遮断周波数における実験値と計算値の一致は、開発した電磁波解析コードの信頼性の高さを示している。

(2) 電磁表面波を確認するためには、表面波の伝送方向(コルゲーションを乗り越える方向)と並行なコルゲート平板(共振器)の側面を、電磁波吸収体で覆う必要があることを確認した。吸収体が無い場合・片側の場合、側面からの回り込みや、側面反射した斜め伝搬モードと思われる信号が重畳され、遮断周波数以上でも、電磁波伝送が確認された。類似配位の先行研究も、共振器の周辺に吸収体を配置する事で、電磁表面波の特性を持つ波が確認できると思われる。

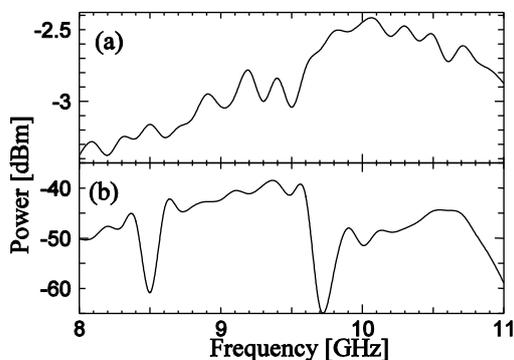


Fig. 3: (a) 送電用針アンテナ側の励起電力モニタ。(b) 伝送電力の周波数特性

電磁波吸収体には、北川工業のレスミラー(ゴムシート状)を利用した。共振器を収める容器素材のポリカーボネートや、アクリルやベークライトといった通常の樹脂では、電磁波の反射が大きく、モードが観測ができなかった。

(3) 数値解析を行い、遅波構造上における、電子ビームの空間電荷波による、電磁表面波のチェレンコフ不安定性を示す時間的成長率の変化を調べた。

電子ビーム電圧により、不安定性の周波数を制御できる(発振周波数は、電子ビーム電圧で、制御できる)ことを確認した。また、Fig. 4(a)に示すとおり、遅波構造(共振器)と電子ビームの距離に指数関数的に反比例することを確認した。従って、強い発振出力を得るためには、周期境界面近傍に電子ビームを近づける必要がある。類似配位の先行研究でも、電子ビームを共振器に十分近づければ、強い発振電力が得られる事が、予想される。

また、同じ分散式で得られている、速波領域にあるスミス・パーセル型不安定性の、周期境界面と電子ビームの距離に対する特性、電子ビーム電圧に対する特性を確認計算した。不安定性が大きくなるよう、ビームエネルギーを増やしたり、周期境界面と電子ビームの距離を縮めると(Fig. 4(b)と(c))、チェレンコフ不安定性と、スミス・パーセル型不安定性は、周波数が離れ、波数も離れることが判った。これは、発振器を高出力化しても、高周波化しても、スミス・パーセル型不安定性が発振出力に影響を及ぼす事は無いことを示す。

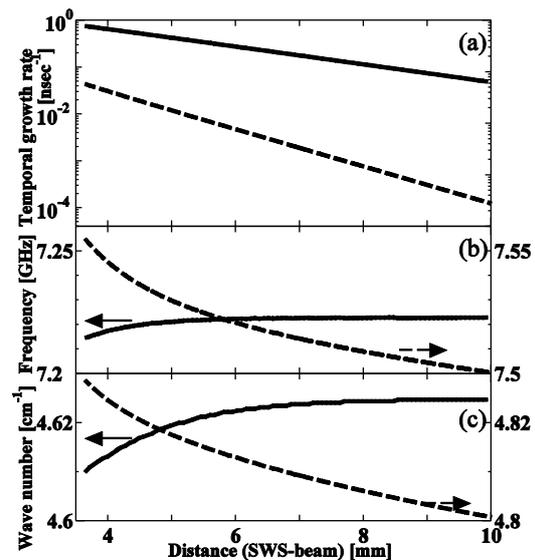


Fig. 4: コルゲート金属板-電子ビーム間距離に対する、発振周波数・相互作用波数・時間的成長率の依存性。

(4) 発振器の作製を行った。ポリカーボネートを用い、コイルボビンを兼ねた真空容器を掘削加工し、電子ビーム伝送をガイドする磁場を派生させるコイルを作製した。ポリカーボネートの電磁波吸収・透過特性を実験的に確認した結果、電磁波出力側のフランジは、透過特性の優れたガラスエポキシで作製し、コルゲート板の両側は、電磁波吸収体を設置できるよう、ボア径を大きくした。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

(1) Osamu Watanabe, “Numerical study of oscillation characteristics for surface wave oscillator”, IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 査読有, Vol. 6, No. 1 pp. 86-87, (2011).

[学会発表] (計4件)

(1) 渡邊理, “X-BAND 表面波発振器の開発 III”, 日本物理学会, 第63回年次大会, 2011年3月27日, 27aYP-3, 新潟大学(震災によりweb資料を持って発表となった)

(2) 渡邊理, “電磁表面波とその利用”, 第13回若手科学者によるプラズマ研究会, 2010年3月11日, 日本原子力研究開発機構 那珂核融合研究所

(3) 渡邊理, “X-BAND 表面波発振器の開発 II”, 日本物理学会, 第63回年次大会, 2009年8月27日, 27aYP-3, 熊本大学

(4) 渡邊理, “X-BAND 表面波発振器の開発”, 日本電気学会, 全国大会, 2009年3月17日, E206-A4, 北海道大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

渡邊 理 (WATANABE OSAMU)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・特任研究員

研究者番号：00397291