

FEL 用高輝度電界放出電子ビーム源に関する研究

工学部・電子情報通信工学科 網脇恵章 草場光博

1. はじめに

未開拓な THz 波領域において、自由電子レーザー (Free-Electron Laser: FEL) は他の光源に比べ大出力であり、且つ周波数可変という特徴がある。しかしその装置の規模は大きくコストも莫大である。高出力ではあるが、それほどの大出力を必要とせず、通常の実験室でも利用できる FEL 装置があれば、FEL の汎用性が高まり、学術的あるいは応用的研究がますます展開されると期待される。このことから通常の実験室でも利用できる小型の FEL 装置の開発は重要な課題である。

通常のウィグラー使用の FEL での小型化には限界があり、本研究ではチェレンコフ FEL に注目した。即ち、誘電体表面近くに電子ビームを伝搬させ、それをエバネッセント波と相互作用させてレーザー光を得る方法で、従来の FEL に比べ電子のエネルギーが極めて低く済むことから、装置の小型化が可能となる。本研究では THz 領域で動作する超小型チェレンコフ FEL を目指して、共振器モードや利得の解析を進め、電子ビーム発生とその伝搬実験を行った。

2. チェレンコフ放射の解析

誘電体内の電磁波は、 c/n (c : 真空中の光速, n : 誘電体の屈折率) の速度で伝搬し、それよりも少しだけ速度の速い電子ビームを誘電体表面に伝搬させると、それは表面でのエバネッセント波と相互作用し、電子のエネルギーの一部は電磁波に変換される。ここでは電子ビームと電磁波を効率よく相互作用させるために、平行平板金属導波路の内側に 2 枚の誘電体を貼り付けた、図 1 に示すダブルスラブ共振器について検討した。

Maxwell の方程式を基にして導波路内の電磁界分布を求め、

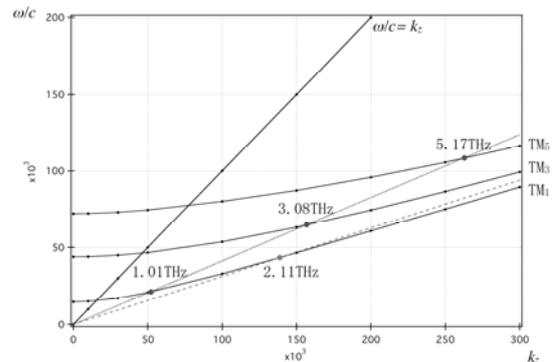
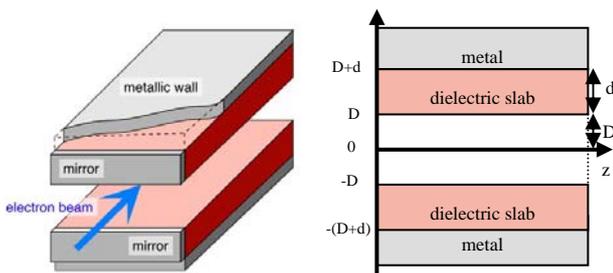


図 2 ダブルスラブ構造における分散関係

$$W(\omega/c, k_z) = \epsilon_r \frac{D}{q} \cos qd \cosh pD - \sin qd \sinh pD \quad (1)$$

のような分散関係を導出した。図 2 に TM_1 , TM_3 , TM_5 モードの分散関係を示す。電子ビームのエネルギーが 50keV (点線) 及び 27keV (破線) の分散関係を示す。導波路と電子ビームの分散関係の交点でチェレンコフ放射が起こり、高次モードになると共鳴周波数は大きくなる。

次に、その相互作用条件の下で電子が導波路内を伝搬し、電子の光に対する位相変化を考慮した光へのエネルギー変換式を導出した。そして、図 3 に示すような FEL の利得時間変化を得た。但し、誘電体による損失を 4%、取り出し損失を 1%、初期ノイズとして $10^{-6}W$ を仮定した。利得は共振器内での光の往復回数が 60 付近から急激に減少し、200 回で飽和に達するのが分かる。その出力は 36mW と求まった。

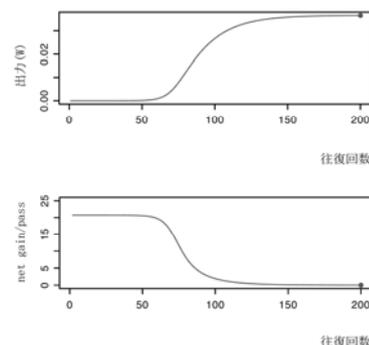


図 3 共振器出力と利得の時間変化

3. 電子ビーム軌道シミュレーション

予備実験として小型の真空チャンバー内で 10keV 電子ビームを用いて収束電極電圧を変化させてビーム径測定を行った。そしてシミュレーション結果と比較し、良い一致を示すのを確認した。その上で 50keV の電子ビームについて、ビーム径とその平行性をシミュレーションで評価した。図 4 は電子加速電圧 50kV のとき、陽極位置での電子ビーム径とビーム発散角及び収束電極間距離 (l) をパラメーターとした収束電極電圧依存性を示す。収束電極の電位が電子ビーム径と平行性に与える影響が分かる。電子ビーム径、平行性共に $l=10\text{mm}$ で最も小さくなり、それ以降は徐々に大きくなることがわかった。

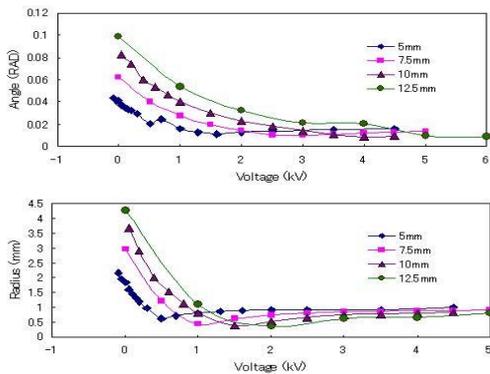


図 4 電子ビーム径とビーム発散角の中間電極電圧依存性

4. 実験装置

シミュレーション結果を下に、チェレンコフ FEL 装置の設計と試作を行った(図 5)。装置は直径 25cm の真空チャンバー内に納められ、右端に電子ビーム源のスピントカソードがある。できる限り装置を簡潔にするため、メカニカルマニピュレーターによって真空チャンバー外から電子ビームの位置調整をすることができるようにその調整機構も予備伝搬実験の結果をもとに設計・試作をした。中央にダブルスラブ構造導波路が置かれ、その前に中間電極が置かれている。電子ビームの伝搬状態を観測するために、左端に蛍光板が設置されている。

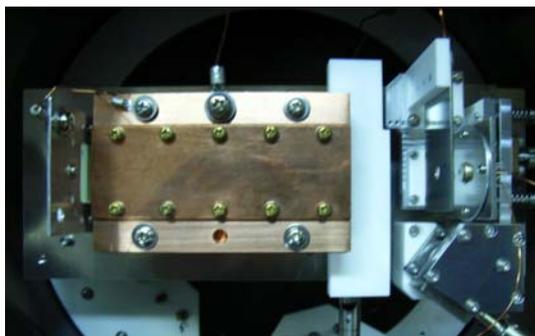
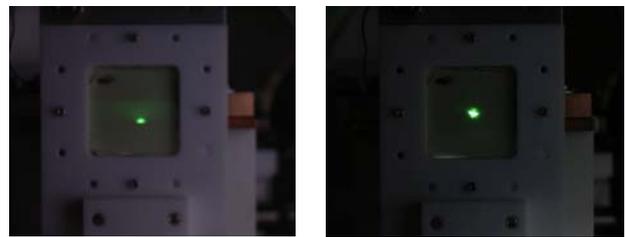


図 5 チェレンコフ FEL 装置

5. 電子ビーム伝搬実験

電子ビーム伝搬シミュレーション実験での装置は理想化されたものであり、実際には各素子の保持台や電極導入端子などが存在するため電位分布が必ずしもシミュレーションの結果と一致するとは限らない。従って実際に電子ビーム伝搬実験を行ってビーム観測した。図 6 は電子加速電圧 25kV、収束電極電圧 900V における伝搬電子ビームの観測結果である。外部で光学的に装置を調整して設置しただけでは、図 6(a)に示すように電子ビームは導波路中心に伝搬しなかった。試作したメカニカルマニピュレーターによって仰角、傾角を調整することにより電子ビーム位置を調整した結果、図 6(b)に示すように電子ビームを導波路中心に伝搬させることができた。



(a) 調整前 (b) 調整後

図 6 電子ビーム像

さらなる電子ビーム伝搬実験を続けるうち、ビーム発生及び伝搬位置が不安定になるのが見られた。スピントカソードの SEM 観察の結果、チャンバー内圧力が高真空であってもスピントカソードの陰極先端の局部では真空度は悪く、電界放出時に陰極先端部の破壊を招いているものと考えられる。各種測定結果から、エミッター電圧揺動を計測しながら、陰極電圧をコンピューター制御して昇圧する機構を取り入れなければならないであろうことが明らかになった。

6. まとめ

スピントカソードを電子ビーム源とし、2枚の Si を用いたダブルスラブ構造導波路を用いたチェレンコフ FEL 装置を試作した。電子ビーム伝搬系は E-Gun シミュレーション結果を下にして、スピントカソードと導波路の間に収束電極を 1つ置く最も簡潔な構造とした。

加速電圧 25kV で電子ビーム観測を行い、チャンバー外部よりマニピュレーターでもってビーム位置調整ができ、収束電極電圧を変化させてビームの平行性が制御できることが確認できた。