

東京理科大学赤外FELセンターにおける遠赤外自由電子レーザー装置の研究

小池英仁^{A)}、 傍島正明^{A)}、 横山稔^{A)}、 小田史彦^{A)}、 河合正之^{A)}、
川合努^{A)}、 豊田浩一^{B)}、 黒田晴雄^{B)}、 中井浩二^{B)}

^{A)}川崎重工業株式会社 技術研究所

〒278-8585 千葉県野田市二ツ塚118

^{B)} 東京理科大学 総合研究所 赤外自由電子レーザー研究センター

〒278-8510 千葉県野田市山崎2641

概要

東京理科大学と川崎重工業（株）から成るFIR-FELプロジェクトグループはSバンドリニアックを用いた遠赤外自由電子レーザーの設計を2000年に完了し、2002年には東京理科大学赤外自由電子レーザー利用センター（FEL-SUT）への設置、RFエージングを完了した。光共振器部に導波管と円筒ミラーを組み合わせたハイブリッド型共振器を適用したことに特徴を有し、スリッページ問題、回折損失を低減する共振器構造の最適化を行った。共振器、RFコンポーネント、リニアック、ビームライン等、FEL-SUTにおける遠赤外自由電子レーザーの特徴および計測について述べる。

1. はじめに

FEL - SUTは川崎重工業（株）が設計・製作したSバンドリニアックを用いた中赤外域（4～16 μm）に発振領域をもつ中赤外自由電子レーザー（MIR-FEL）の初発振を2000年6月に達成した。その後、2001年6月より波長域4～16 μmのFEL光をユーザーへ供給するユーザー運転を開始している [1]。

遠赤外領域からミリ波領域（ここでは100 μmからミリ波までの領域をFIR領域とする）までのFELとしては、ペレットロンを用いたUCSBの装置が準DCモードにて30～2400 μm [2]、マイクロトロンを用いた（Sバンド）フラスカチが2.4mm [3]、KAERIが80～300 μm [4]で発振を成功させている。また、SバンドリニアックではFELIXが300 μm程度までの発振をさせている [5]。

電子ビームを高周波電界によって加速する場合は電子ビームパルス的に入射され、Sバンド（2856MHz）の加速器ではその電子ビームパルス長は0.6-4.5mm程度となる。遠赤外FELを発生させるときはスリッページ長が電子ビームパルス長と同程度になり、電子パルス全体を追い越してしまつて電子と相互作用できなくなる光の割合が増すため、ゲインが小さくなる。

このような作用を低減するために、光の群速度を遅らせる目的で矩形導波管または並行平板のプレートと円筒形ミラーを組み合わせたハイブリッド共振器が用いられる。上に述べた施設でもこのよう構造

の共振器を用いた導波管モードにて発振を成功させている。

我々のFIR-FELは目標発振波長域を今までに例のない300～1000 μmに設定し、発振成功をしている他の施設同様の導波管を適用した。また、スリッページは電子ビームのパンチ長に依存することから、電子ビーム入射部にアルファ電磁石とシケインを導入し、電子ビームのパンチ長を容易に変えられるようにした。FEL-SUTの装置室内に設置されたFIR-FELの全体を図1に示す。

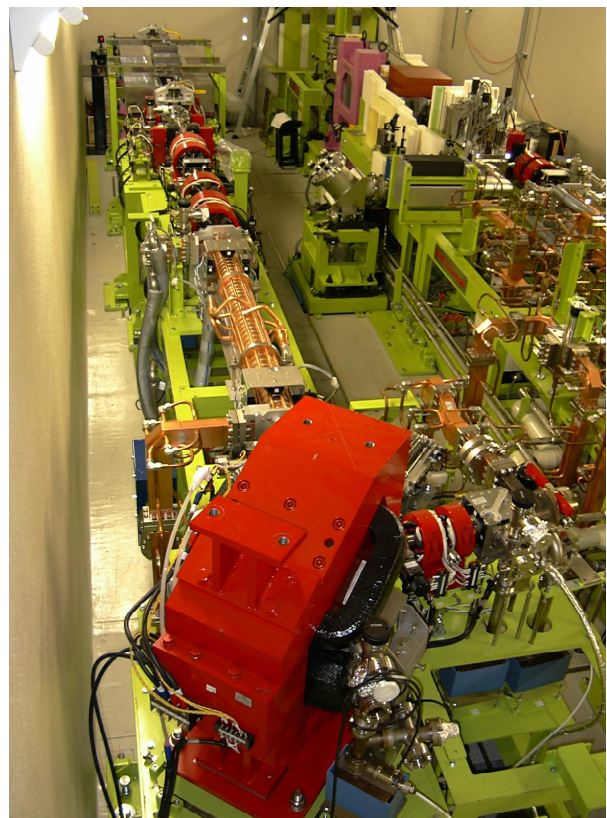


図1. FIR-FEL全体写真

2. ハイブリッド共振器について

Sバンドを用いたリニアックを用いた長波長領域で問題となるスリッページ、長波長領域での回折の問題を低減するためにアンジュレータ間に設置する

Table 1 FIR-FELの主要パラメーター

FEL		
目標波長	300 ~ 1000	μm
電子ビーム		
エネルギー (RFガン)	~ 1.9	MeV
エネルギー (加速後)	10	MeV
電流値	150	mA
エネルギー幅	2.0	%
エミッタンス	30□	mm-mrad
アンジュレータ		
形式	Halbach	
周期長	70	mm
周期数	25	
K 値	2.0 ~ 3.4	
導波管共振器		
導波管寸法 (Y×X)	4.5×70	mm ²
ミラー曲率	2.0	m
共振器長	2.5	m
穴径	~ 1.5	mm

真空チャンバを導波管構造としたことに特徴を有する [6] Sバンドリニアックを用いて生成される電子ビームのマイクロパンチ長は数ピコ秒と短く、特に長波長領域では電子の併進速度と光の群速度の相違から生じるスリッページが問題となる。本設計のFIR-FELでは群速度を遅延させる目的で導波管を適用した。さらに、導波管の適用は長波長領域の回折を低減させ、さらにフィリングファクターや電子の感じる電場を強める。

導波管の間隙は4.5mmであり、K値3.4でゼロスリッページ状態になるように決定した。ゼロスリッページでの現象はフラスカチにて実験的、解析的に研究され、2.4mm付近で発振に成功している [7]。

導波管間隙4.5mmにて波長域300 ~ 1000μmの発振を達成するために電子ビームエネルギー10MeV、アンジュレータ周期長70mm (アンジュレータ周期数

25) と決定した。

また、4.5mmの導波管内面間にこれと同程度の厚みをもつ円筒ミラーを挿入する共振器構造となっており、アンジュレータチャンバの外にミラーを設置するタイプの共振器で起こり得る損失を低減させる構造である。ミラーと導波管の間隙から生じる損失はせいぜい数%と見積もられる。設置されているFIR-FEL装置の主要なパラメーターをTable1に示す。

3. 自発光観測

パンチ長の短い電子ビームにて長波長を発振させることの問題はすでに述べた。しかし、波長に対してパンチ長が同じ程度かそれ以下の条件では、コヒーレントな自発光放射が発生する[4, 8]。

N個の電子から発生する放射パワーは

$$P_{TOTAL}(k) \approx NP(k) + N^2P(k)f(k) \quad (\text{式 1})$$

で表される。ここでP(k)は1個の電子から発生するパワーでf(k)は電子ビーム進行方向の分布を表す関数である。第2項はコヒーレント自発光を表し、電子ビームの分布をガウシアン分布と仮定した場合のトータルパワーをそれぞれのパンチ長について図2に示す。

FEL-SUTのFIR-FELはアルファ電磁石と矩形方の電磁石からなるシケインが導入されており、パンチ長を変化させることができる。RFガンとアルファ電磁石とシケインの構成をしているMARK では最小0.7psまでパンチ長を圧縮している[9]。

発光された自発光は図3に示した系にて観測される。FEL-SUTでは実験室までの輸送中に光学系を設置せず、Xバンドの導波管にて約20m輸送する予定である。図3で示した観測系は装置室内に設置され、約1.5mの導波管内を輸送した後に、超伝導のポロメーターで観測する。

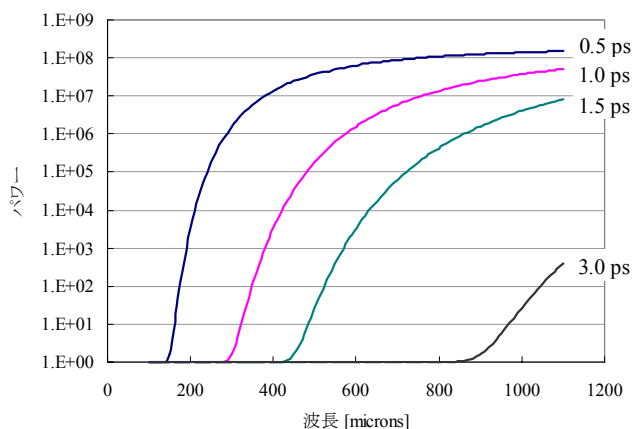


図2. コヒーレント放射パワー比較

2. まとめと今後

東京理科大学と川崎重工業（株）の共同開発グループは発振波長域300～1000 μm をターゲットとした遠赤外自由電子レーザー（FIR-FEL）の設計を2000年に完了し、2002年度内に東京理科大学赤外自由電子レーザー研究センターに設置を完了した。

本装置は導波管およびミラー構造に特徴をもち、

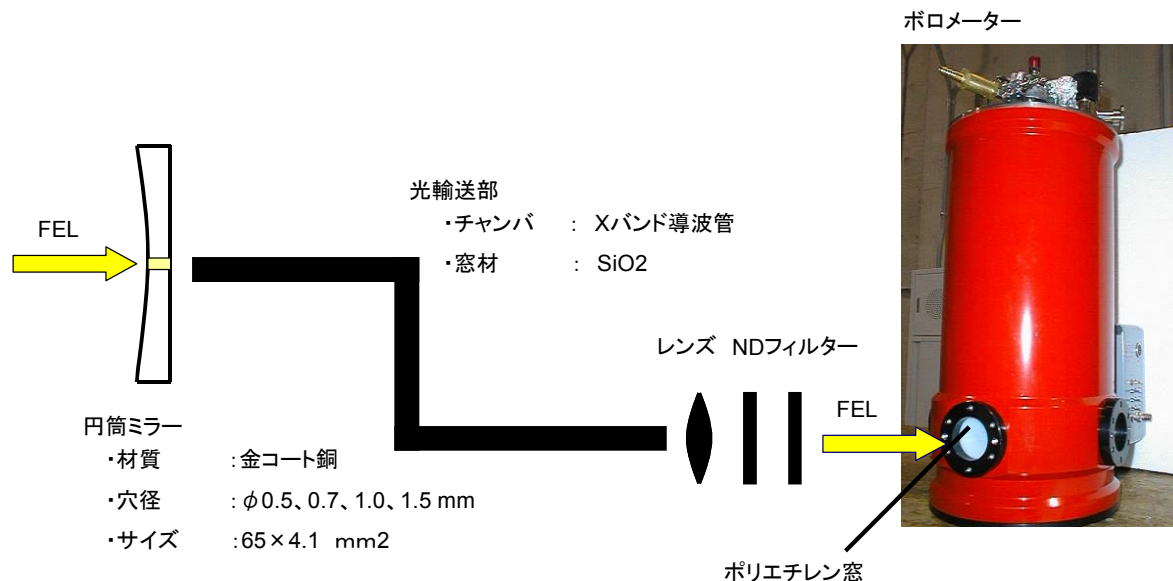


図3、自発光観測系

はスリッページ、回折損失を低減する。また、コヒーレント放射からの発振のために電子ビームのパンチ長を可変とするアルファ電磁石をシケインが導入されている。

現在までにRFエージングがほぼ完了しており、現在、パンチ長計測器及び分光器の準備をしている。今年度内に発振を目標として立上げ準備中である。

参考文献

[1] M. Yokoyama, F. Oda, K. Nomaru, H. Koike, M. Sobajima, M. Kawai, H. Kuroda, Nucl. Instr. and Meth. A475 (2001) 38-42

[2] G. Ramian, SPIE vol.1552 Short Wavelength Radiation Source(1991)57-

[3] G.P. Gallerano, A. Doria, E. Giovenale and A. Renieri, Infrared Phys. 40 (1999) 161

[4] Y. U. Jeong, Proceeding of the 24th. International FEL conference

[5] L. Y. Lin and A.F.G. van der Meer, Rev. Sci. Instrum. 68(12), (1997) 4342

[6] G.P. Gallerano, A. Doria, E. Giovenale and A. Renieri, Infrared Phys. 40 (1999) 161

[7] E.B. Szarmes, A.D. Madden, J.M.J. Madey, Nucl. Instr. and Meth. A358 (1995) 220-223

[8] Y.U.Jeong, Y.Kawamura, K.Toyoda, C.H.Nam, Phys. Rev. Lett.vol.68 Num.8 (1992)1140-

[9] E.B. Szarmes, A.D. Madden, J.M.J. Madey, Nucl. Instr. and Meth. A358 (1995) 220-22

