

21a-6

SIMULATION OF WAVEGUIDE FEL OSCILLATOR USING RF LINAC

S.KURUMA, K.MIMA*, M.GOTO**, M.ASAKAWA*, N.OHIGASHI**,
M.FUJITA, K.IMASAKI, S.NAKAI* and C.YAMANAKA

Institute for Laser Technology, 2-6 Yamadaoka, Suita, Osaka 565 JAPAN

*Institute of Laser Engineering, Osaka University

**Faculty of Engineering, Kansai University

ABSTRACT

One dimensional multifrequency simulation code for waveguide mode FEL has been developed. Using this simulation code, we analyzed the spontaneous emission from electron micropulse from RF Linac.

And it is found for some parameters both higher and lower frequency waveguide mode are growing simultaneously, so the two radiation pulses are generated and amplified.

RFライナックを用いた導波管型自由電子レーザーの発振シミュレーション

1. はじめに

自由電子レーザーに於いて発振を目指す場合、電子が出す放射光が自然放出から誘導放出を経て発振に至るまでの過程を明らかにする必要がある。また併せて、共振器中の放射光のスペクトラム及び時間波形の振舞も明らかにしなければならない。特に、RFライナックを電子ビーム源とする自由電子レーザーでは電子ビームのマイクロパルス幅が自由電子レーザーの共鳴波長より短い時、コヒーレント自発放射を起こす。このコヒーレント自発放射光の強度は、一般の自然放射光強度よりマイクロバンチ内の電子数倍だけ大きく、電子ビーム電流の2乗に比例する。従って、コヒーレント自発放射光をうまく重ね合わせることで、速い立ち上がり特性を得ることができ、電子ビームのマクロパルス幅が短い、即ち相互作用回数が少ない場合でもレーザー発振に到達することが可能となる。今、放射光はミリ波帯の導波管モードを持つとすると、導波管中の自由電子レーザーの共鳴波長は自由空間に比べ2倍程度長くなる為、電子ビームマイクロパルスよりも長くすることが容易となる。従って平板ウィグラー中での導波管モードを持つ電磁波とRFライナックからの電子ビームマイクロパルスとの相互作用を解析する為のシミュレーションコードを開発し、これを用いて共振器中での電磁波の立ち上がり特性及び電子パルス、電磁波パルスの時間波形、スペクトラムを明らかにした。

2. 計算モデルと基礎式の概要

電子ビームパルス列は、平板ウィグラー中にウィグラー中心軸(Z軸)に沿って平行に入射されるものとする。まず最初の電子マイクロパルスが入射され、それがウィグラー磁場により蛇行し、自然放出光を発する。その光パルスは共振器右側のミラーにより反射され、ウィグラー中を左向きに進み、左側のミラーで反射され、もう一度ウィグラーに入射する。この時に次の電子マイクロパルスとうまく同期させることにより、共振器中での電磁波強度が増大する。この過程を繰り返し、放射光強度がある程度大きくなると、自由電子レーザーの共鳴波長の放射光が誘導放射され、遂に発振状態へ移行する。

このモデルでは、基礎方程式はウィグラー軸方向(Z方向)の一次元に限定し、各粒子のエネルギー及びポンドラモーティブ位相に対する運動方程式と、異なった周波数を持つTE₀₁モードの重ね合わせで表した放射光の複素振幅に対する波動方程式を連立して解くことにより、電子ビームパルスのエネルギー及び位相の各位置に於ける時間パルス波形、放射光の振幅の空間発展、及び各位置に於ける時間パルス波形、スペクトラムを記述できる。尚この計算では、電子ビームは、半値全幅 τ_0 を持つガウス型のマイクロパルス列であるとし、自然放出光を自動的に取り入れている。また数値計算法としては、4次のルンゲクッタ法を用いた。

3. 数値計算結果

数値計算のパラメーターとしては、大阪大学レー

表1 シミュレーションパラメーター

◇電子ビーム	
エネルギー	$E_{b0}=7\text{MeV}$ ($\gamma=14.6985$)
ピーク電流	$I_b=5\text{A}$
ビーム半径	$r_b=2\text{mm}$
マイクロパルス幅	$\tau_b=5\text{psec}$
◇導波管	
長径 (x 軸方向)	$a=12.954\text{mm}$
短径 (y 軸方向)	$b=6.477\text{mm}$
(ウィグラー磁場方向)	
◇電磁波	
基本波波長 (短波長モード)	$\lambda_{z0}=1.2912\text{mm}$
周波数きざみ数	$N_s=50$
共振器長	$L=0.975\text{m}$
ミラー反射率	$R=0.95$
◇ウィグラー	
波長	$\lambda_w=6\text{cm}$
磁場強度	$B_w=0.6156\text{T}$
周期数	$N_w=10$
Kパラメーター	$K=3.45$

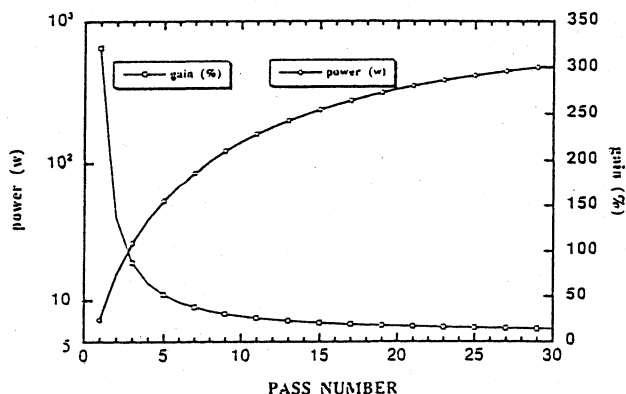


図1. 共振器中での放射光強度及び利得特性

ザー核融合研究センターと財団法人レーザー技術総合研究所との共同で行われ発振に成功した実験に近いものを選んだ。これを表1に示す。

図1は、電磁波強度と利得の立ち上がり特性を示している。これを見ると15pass程度で利得はほぼ一定の約14%になり、飽和領域に入っているのがわかる。

図2-1は、1pass目 $z=6\text{cm}$ (1ウィグラーピッチ) のところでの(a)電子パルスのエネルギー分布、(b)密度(点線)分布と電磁波の強度(実線)の時間波形、及び(c)スペクトラムを表す。尚(a)(b)の横軸は、電子ビームの速度で動く系で見た規格化時間 $t=(\omega_0/2\pi)(z/c-t)$ であり、(c)の横軸は中心波長 1.29mm 、モード間隔 $25.8\mu\text{m}$ を持つ各モード番号である。(c)を見ると、共振波長 ($\lambda_0 \approx 1.29\text{mm}$) より長波長(低周波数)側にかなり広いスペクトラムを持っているのがわかる。

図2-2は、1pass目出口でのものである。(b)を見ると電子ビームパルスが2つ現れているのがわかる。これは、導波管モードの2つの共振波長である、長波長モードと短波長モードの両方が増幅され、かつ、各モードが広いスペクトラムを持っていることが原因であると思われる。即ち、電磁波のパルスとして電子ビームパルスを追いつくものと、電子ビームパルスに追いつかれるものに対応していると思われる。また、シミュレーションにより2pass目以降はこの二つのパルスが増幅されていくことが確かめられた。

4. まとめ

RFライナックを電子ビーム源とする導波管型自由電子レーザーの発振特性を解析する為シミュレーションコードを開発し、これを用いて共振器中における電子ビームマイクロパルスの時間波形及びスペクトラムを解析した。

導波管モードの長波長モードと短波長モードが同時に増幅され、両方のモードの重なったスペクトラムを持つ電磁波が励起され、その結果、時間的に2つの放射光パルスが発生、増幅される場合があることがわかった。

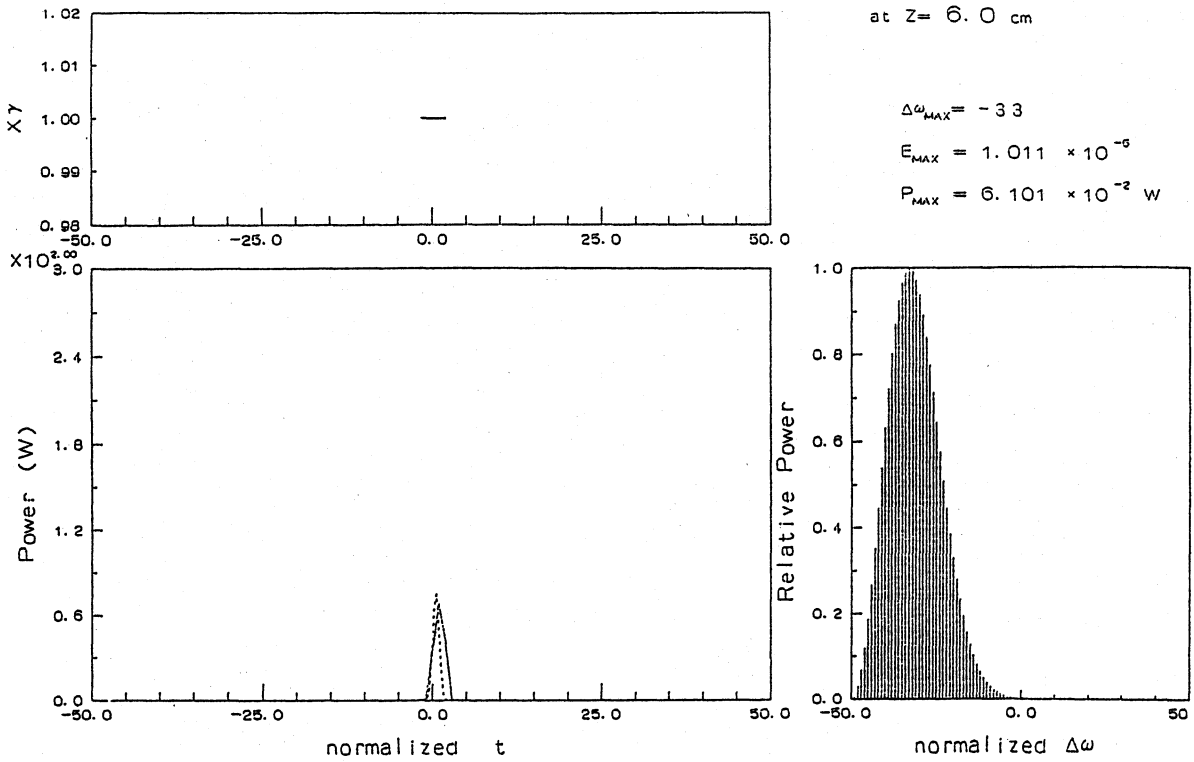


図2-1. 1 pass目 z=6cmでの(a)電子パルスのエネルギー分布 (b)密度分布 (点線)、電磁波の強度分布 (実線) の時間波形、及び(c)スペクトラム

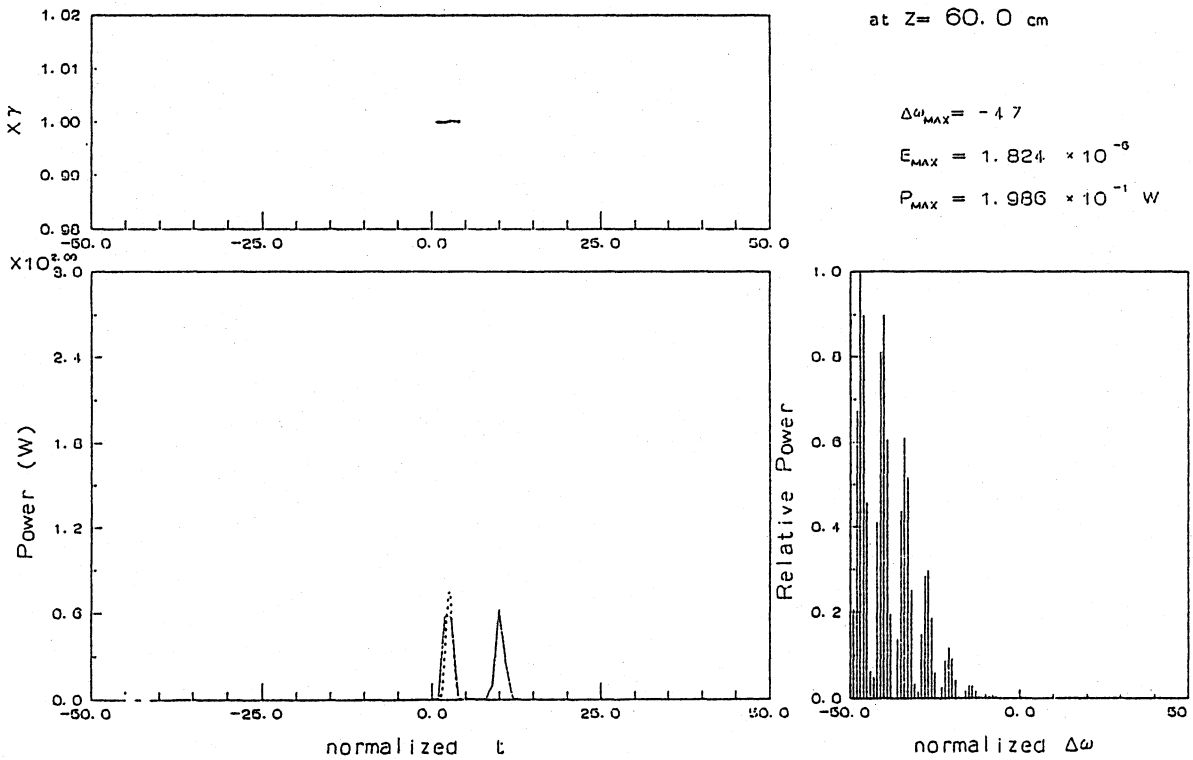


図2-2. 1 pass目 z=60cmでの(a)電子パルスのエネルギー分布 (b)密度分布 (点線)、電磁波の強度分布 (実線) の時間波形、及び(c)スペクトラム