

マクロパルスモードにおける蓄積リング自由電子レーザー時間発展の観測

清 紀弘、山田 家和勝、小川 博嗣、安本 正人、三角 智久

産業技術総合研究所 光技術研究部門 〒305-8568 茨城県つくば市梅園 1-1-1

概要

蓄積リング自由電子レーザーでは、周回する電子バンチや光共振器に閉じこめられた光パルスに周期的な縦振動がある場合や、それらに微小な同期のずれがある場合に、マクロパルスを形成することが知られている。我々は蓄積リング NIJI-IV を用いて、マクロパルスモードにおける自由電子レーザーのパルス形状やスペクトルの時間発展について観測した。その結果、cw 発振では観測されない特徴を見いだした。蓄積リング自由電子レーザーのマクロな時間構造を分類するのに有効な、これらの特徴について述べる。

1 はじめに

蓄積リング自由電子レーザー(FEL)では、マクロな時間構造があることが知られている¹。これらの構造は、光パルスと電子ビームとの不完全な縦方向のオーバーラップが原因で、引き起こされる。オーバーラップがほぼ完全なときは、蓄積リング FEL は cw 的になり単一のマイクロパルスが連続する。この状態ではパルス幅・波長幅共に最小になり、cw モードと呼ばれる。cw 発振時には、さらに安定な重畳を実現することで、スーパーモードが発生することも観測されている²。重畳が少し不安定になると、蓄積リング FEL はマクロパルスを形成する。重畳のずれが一定であるか周期的であるときは、マクロパルスは周期的になることが知られている。このような蓄積リング FEL の発振はマクロパルスモードと呼ばれる。さらにずれが大きくなると、蓄積リング FEL は不安定な cw 的な発振をする。しかしこの発振は擬 cw モードと呼ばれ上述した安定な cw 発振とは異なり、電子のバンチ構造を反映して、複雑な内部構造を持つことがある。そのため複数のマイクロパルスが同時に現れることで、発振が持続している。従って、マイクロパルスのパルス幅や波長幅はかなり大きくなる。

これらのマクロな時間構造は、従来はマイクロパルス強度の時間発展によって分類されていた。しかし、電子ビームや光共振器のわずかな不安定性のために、重畳がほとんどずれていないにも拘わらず強度が不安定になることがある³。この場合でも、パルス幅やスペクトル幅はほぼ一定であり、単純に強度だけを見ていたのでは FEL ミクロパルス時間発展のマクロな性質を把握できない。我々は蓄積リング FEL がマクロパルスを形成する場合、そのマイクロパルス形状やスペクトルの時間発展に特異な性質があることを観測した^{4,5}。これらの特徴は次元バンチ加熱理論に基づく単純なシミュレーションによって導出することも明らかにしている^{5,6}。蓄積リング FEL のマクロな時間構造を分類する上で、これらの特徴も考慮すべきであろう。この論文では、マクロパルスモードにおける蓄積リング FEL のマイクロパルス形状及びスペクトルの時間発展について焦点を当て、観測結果を基にその特徴を明らかに

する。

2 パルス形状の時間発展

蓄積リング FEL ミクロパルスの時間発展の測定は、波長 214nm の FEL を用いて調べられた⁷。光共振器の共振器損失は FEL の照射時間の増加に従って増加し反射率の狭帯域化が知られているが、共振器ミラーにとって反射率が最大となる最適な波長付近では、その増加が緩やかである。214nm は使用した共振器ミラーにとって最適な波長であり、測定時の共振器損失は 1.6-1.7% であったと評価されている。当時は NIJI-IV 真空チャンバー改造前でブロードバンドインピーダンスが高く、シングルバンチ 2-3mA 以上でマイクロウェーブ不安定性が発現し、電子バンチのバンチ長もエネルギー拡がりも電流値に依存していた。測定時のシングルバンチ電流値は ~15mA で、バンチ長は 120-130ps、エネルギー拡がりは $5.5\text{-}6 \times 10^{-4}$ であった。一次元理論式を用いて評価される FEL 利得は 2.7-2.8% になる。電子バンチは電源ノイズのために 100Hz で縦方向に振動しており、その振幅は 4.5mm 程度であった。

蓄積リング FEL ミクロパルスの時間発展は時間分解能 2ps の 2 時間軸ストリークカメラを用いて観測された。光クライストロンからの自発放出光の共振成分が FEL とと

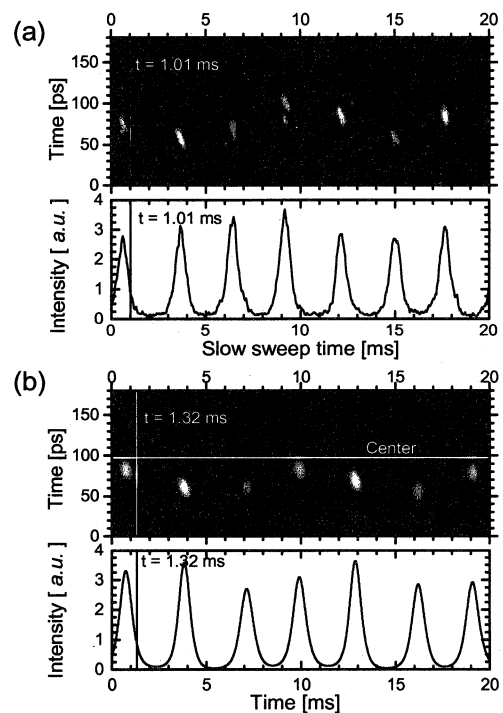


図 1: 測定(a)と計算(b)による蓄積リング FEL ミクロパルスの時間発展の一例。ディチューニング長は $-0.52\mu\text{m}$ で計算している。

もにストリークカメラに入射されるので、光路にバンドパスフィルターを使用した。ただし、バックグラウンドを完全に取り去ることはできていなかった。FEL ミクロパルスがマクロパルスを形成した典型的な例を、バンチ加熱理論に基づく一次元差分方程式を用いたシミュレーション結果とともに図 1 に示す。この図から FEL ミクロパルスがディチューニングのために同期中心からずれていくことがわかる。測定と計算とではマクロパルス周期がずれているが、これは光共振器が不安定なために測定のディチューニング長の評価に誤差が生じることが原因であると考えられる。マクロパルス周期はディチューニング長の増大に伴って減少することが知られている。図 1 から評価した蓄積リング FEL ミクロパルスのパルス幅の時間発展を図 2 に示す。ただし測定結果に対しては、信号が弱いとノイズの影響を受けやすいので、相対強度が 0.8 以上の領域だけを示している。実測の FEL ミクロパルスは、電子バンチの内部構造のために複数のピークが現れることがある。そのため、強度やパルス幅の時間発展はしばしばシミュレーションとは違った展開を示すこともある。しかし、ディチューニングとバンチの縦振動が相殺する位相ではパルス幅が狭くなりピーク強度が増大することを、図 1 から理解できる。このように、バンチの縦振動は強度やパルス幅、さらにはマクロパルス周期に変調を与えている。また、サテライトのピークが現れていないとき、例えば図 1 における 1,2 及び 5 番目のマクロパルスに対しては、測定結果がシミュレーションと定量的にも一致していることが読みとれる。少なくとも、パルス幅の時間発展には周期構造があり、パルス幅が最小になるのは、マクロパルス強度が最大である時ではなく、マクロパルス強度が減少している時であることがわかる。後述するように、この傾向はスペクトル幅の時間発展にはよりはっきりと現れる。

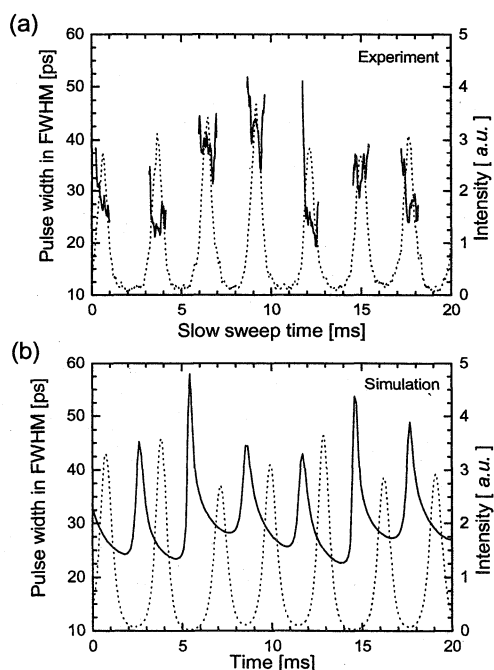


図 2 : 測定(a)及び計算(b)による蓄積リング FEL ミクロパルスのパルス幅の時間発展。比較のため強度を点線で示している。

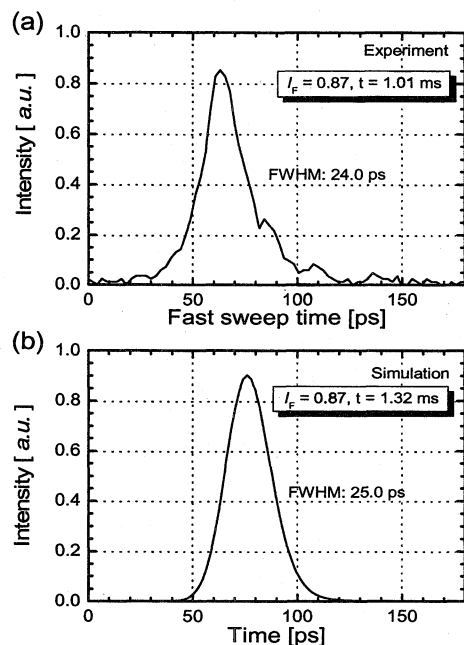


図 3 : 図 1 の垂直線における測定(a)及び計算(b)による蓄積リング FEL ミクロパルスのパルス形状。

蓄積リング FEL が cw モードで発振している場合、ミクロパルスの形状は Gaussian であることが観測されている。擬 cw モードでも、発振が十分に強くバックグラウンドを無視できる場合には、マクロな時間 (~10ms 程度) で平均化すると Gaussian に近くなる。ただし、個々のミクロパルスの形状には複数のピークを含んでいることがある。しかしマクロパルスモードにおけるミクロパルス形状は、図 3 が示すように Gaussian ではなく、同期中心の方向にテールを引いている。この事実は、シミュレーションが仮定しているように、マクロパルスの成長はホワイトノイズから立ち上がるのではなく、自発放射光の共振状態から立ち上がり、対称的になる前に減衰に転じることを示唆している。

3 スペクトルの時間発展

蓄積リング FEL スペクトルの時間発展の測定は、波長 300nm の FEL を用いて調べられた⁷。この時使用した共振器ミラーの最適波長は 305nm であったため、300nm における共振器損失は FEL の照射時間に伴って増大し、測定時には 1-2% であったと推察される。波長 305nm においては発振閾電流値から約 0.9% であると評価されている。即時のシングルバンチ電流は 14-21mA で、FEL 利得は 4.3-4.6% であった。

蓄積リング FEL スペクトルの時間発展は、分光器にて分光した FEL を 2 時間軸ストリークカメラのスリットで結像させることで観測した。分光器の分解能は半値全幅で 0.04nm であったが、水銀ランプの線スペクトルを用いた測定によると、測定系の波長分解能は半値全幅で ~0.06nm であった。また、この時の時間分解能は 0.1ms 以上であった。図 4 にマクロパルスモードにおける FEL スペクトルの時間発展の一例を示す。この図のシミュレーションはディチューニング長が 0.8μm、共振器損失が 1.4% の条件で行っている。この図をマクロパルスのピーク付近で波長軸

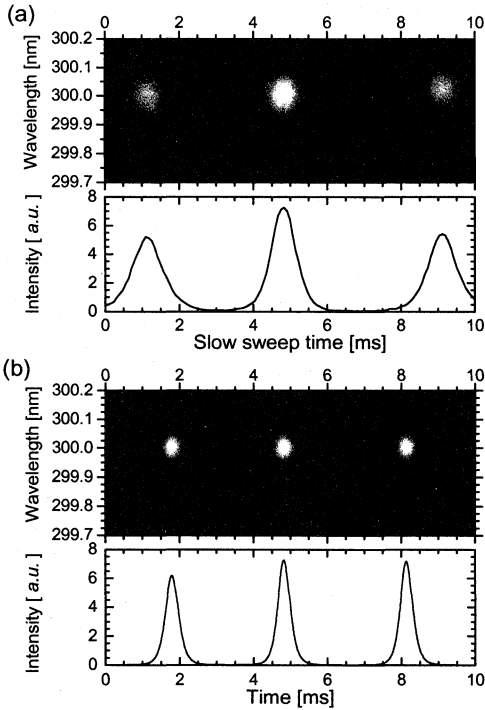


図4：測定(a)と計算(b)による蓄積リング FEL スペクトルの時間発展の一例。

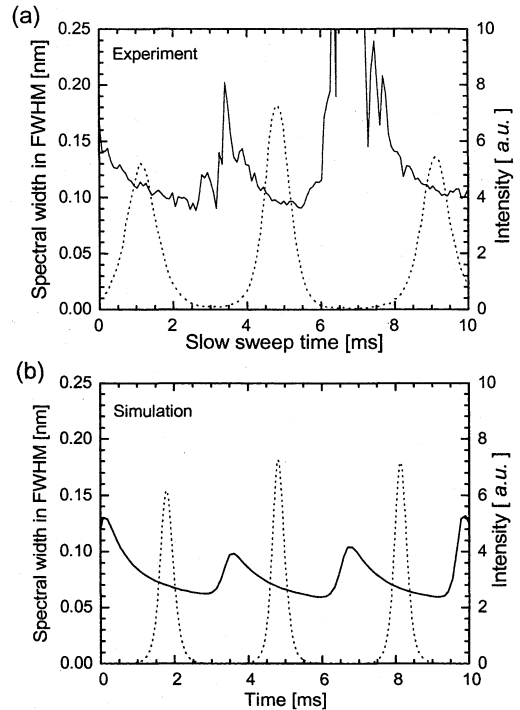


図5：測定(a)と計算(b)による蓄積リング FEL スペクトル幅の時間発展。比較のため強度を点線で示している。

に射影すると、スペクトルが非対称で短波長方向にテールを引いていることがわかる。パルス形状と同様に、cw モードや擬 cw モードではスペクトルがほぼ Gaussian となるので、明らかな差異を観測できる。

図5は図4から計算した蓄積リング FEL のスペクトル幅の時間発展を示している。FEL 強度の小さいところではノイズの影響を受けるために、シミュレーションと比較して極端に大きなスペクトル幅になっているが、周期性やスペクトル幅が最小になる位相はシミュレーションと一致していることがわかる。定量的には両者がよい一致をしているとは言えないが、これはマクロパルスが立ち上がる時に最大利得となる波長付近で複数のピークが成長するので、初期の大きなスペクトル幅の影響をそのまま受け継ぐためであると考えられる。スペクトルの時間発展の測定結果も、シミュレーションが採用している自発放出光の共振状態からの立ち上がりという仮説に矛盾はない。スペクトル幅の周期性や最小となる位相の存在も、マクロパルスモードのみに観測される特徴であり、cw モードや擬 cw モードには現れない。

また、我々はマクロパルスモードにおいて FEL 波長が周期的に変動することも観測している。その変動幅は典型的には 0.01nm 程度と小さいが、光クライストロン分散部のパラメータ N_d の小数部分や利得と共振器損失の関係によって比較的大きな値になりうる。この変動もまた、マクロパルスモード固有の特徴である。

4 まとめ

蓄積リング FEL のマクロパルスモードにおけるマイクロパルスの時間発展について、観測とシミュレーションを基に議論してきた。マイクロパルスのパルス形状やスペクトル

が非対称的であることや、幅及び中心位置（同期中心の位置や FEL 波長）に周期的変動があり、他のモードとは明確な差異があることを明らかにした。これらの諸性質について調べることがマクロな時間構造の分類には必要であろう。また、マクロパルスモードにおける FEL ミクロパルスのパルス幅やスペクトル幅を導出する理論では、多くが Gaussian 波形として扱っており、マクロパルス強度の始点をパルス幅減少の始点としているが、注意が必要である。パルス幅やスペクトル幅が最小になる位相は、ディチューニング長だけでなく有効利得や自発放出光の寄与の正確な評価が必要になってくる。今後は周期やパルス幅等のマクロパルスを表現するパラメータの定式化や、マクロパルス強度に課せられる条件について考察を加えていきたい。

参考文献

- [1] M. E. Couprie *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. A 331 (1993) 37.
- [2] V. N. Litvinenko *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. A 475 (2001) 240.
- [3] K. Yamada *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. A 445 (2000) 173.
- [4] N. Sei *et al.*, submitted to Jpn. J. Appl. Phys.
- [5] N. Sei *et al.*, submitted to Nucl. Instr. and Meth. A.
- [6] T. Hara *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. A 375 (1996) 67.
- [7] N. Sei *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. 42 (2003), in print.