

阪大産研における FELスペクトルの時間的振る舞い



加藤 龍好¹, 川瀬 啓悟¹, 入澤 明典¹, 藤本 將輝¹,
大角 寛樹¹, 矢口 雅貴¹, 船越 壮亮¹, 堤 亮太¹,
末峰 昌二¹, 磯山 悟朗¹, 柏木 茂², 山本 樹³

¹ 大阪大学産業科学研究所

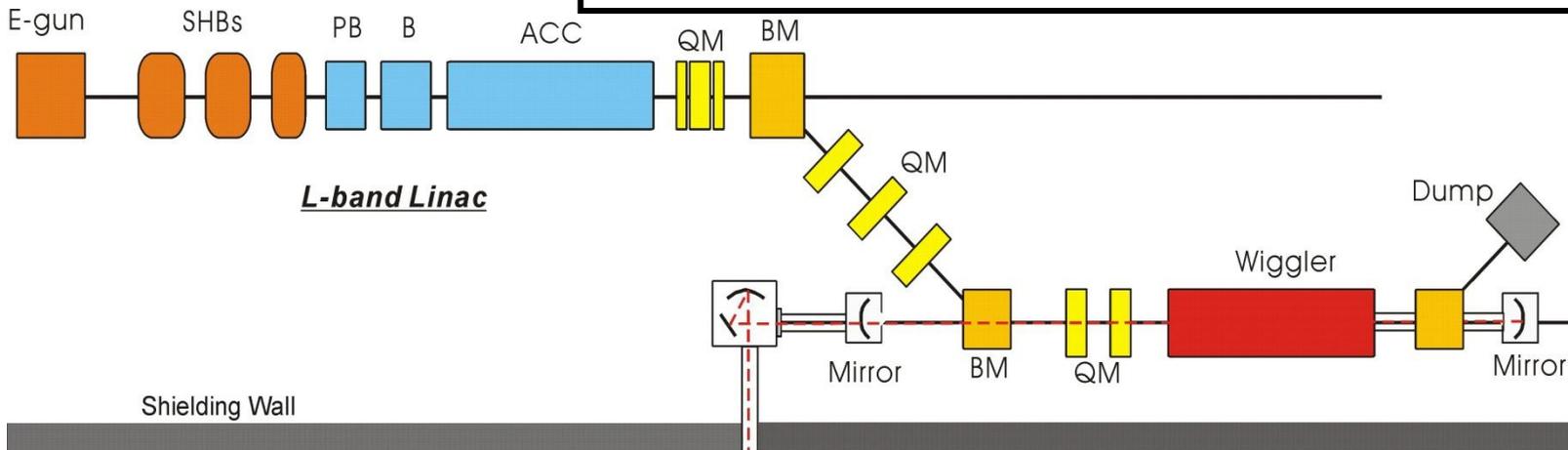
² 東北大学電子光理学研究センター

³ 高エネルギー加速器研究機構

- ◆ 大阪大学産業科学研究所のLバンドライナックを用いて、テラヘルツ領域での共振器型FELの利用に向けた開発研究を行っている。

Linac : L-band (1.3 GHz): $E_{\max}=40$ MeV, $L_{\text{bunch}}=20\text{-}30$ ps

Multi-bunch (SHBs: $1 \times 108\text{MHz} + 1 \times 216\text{MHz}$) $\rightarrow 9.2\text{ns}$ spacing

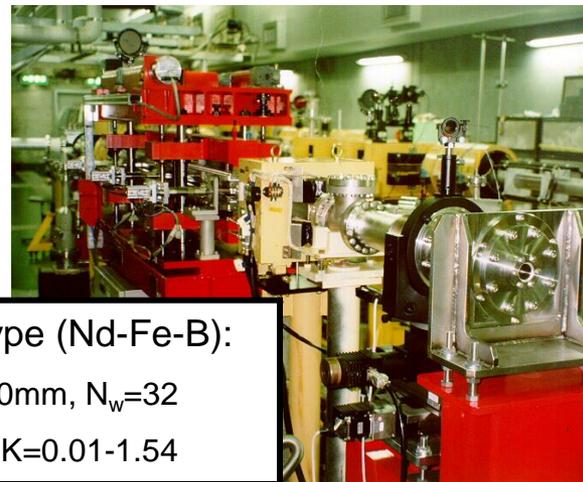


Monochromator :

Cross Czerny-Turner type

Detector :

Ge:Ga photo conductive etc.

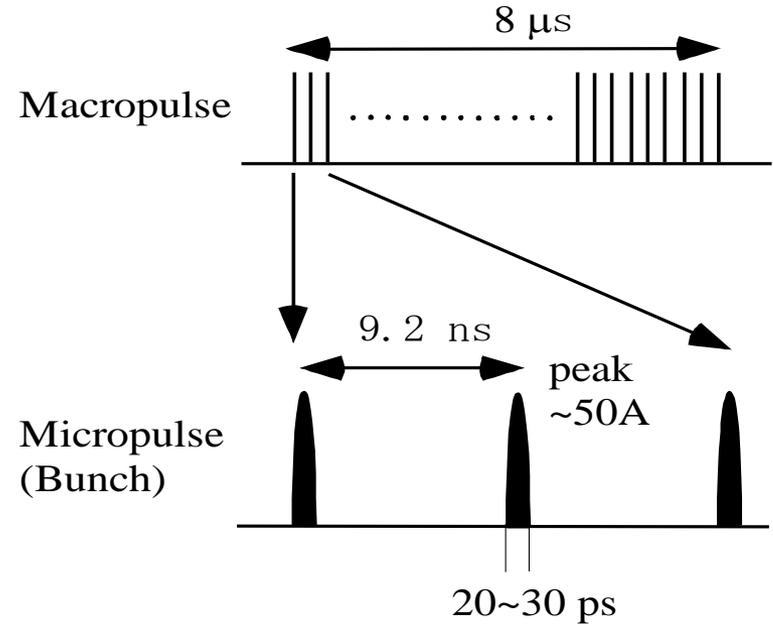


Wiggler : EF type (Nd-Fe-B):

$L_w=1.92$ m, $\lambda_w=60\text{mm}$, $N_w=32$

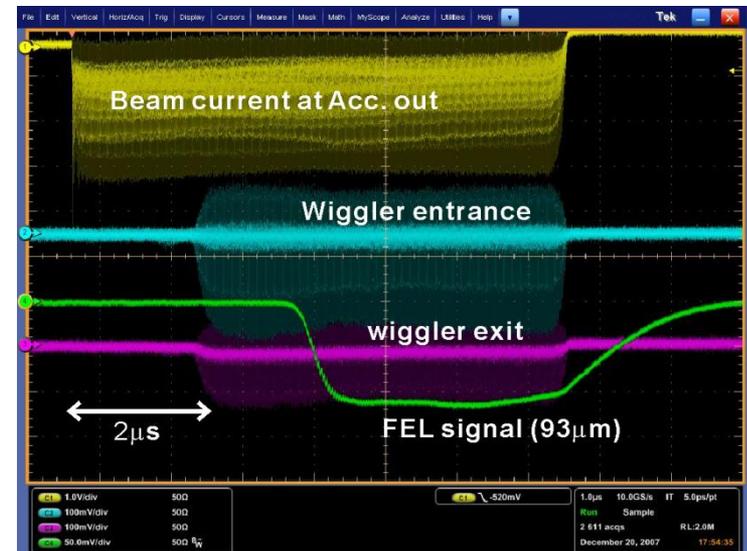
gap=120-30mm, $K=0.01\text{-}1.54$

- サブハーモニックバンチャー空洞2台 (108MHz, 216MHz)によるマルチバンチ化
- L-バンド(1.3GHz)による加速
- 電子ビームの時間構造
→FEL光の時間構造



Electron beam

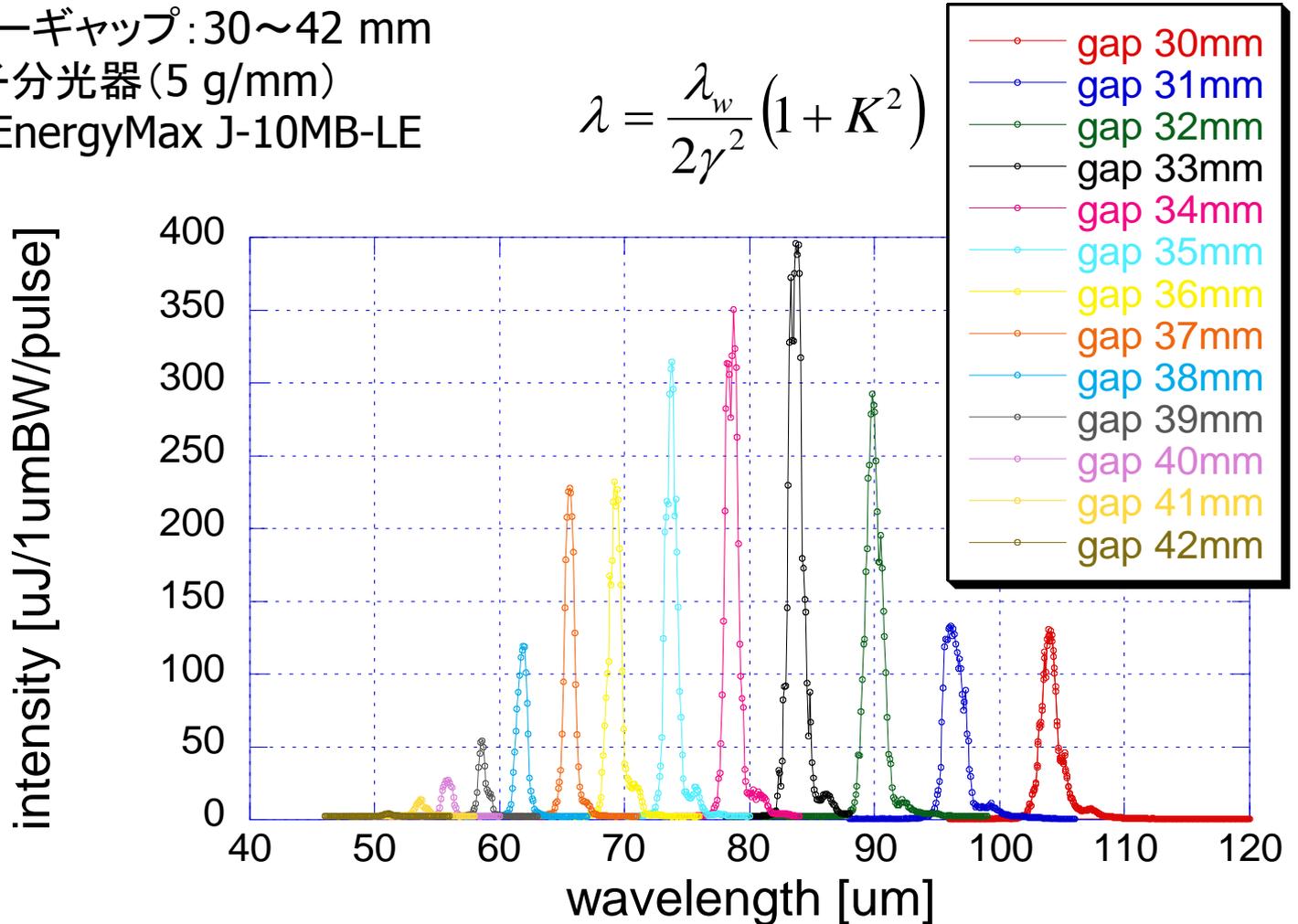
| | |
|--------------------|--------------------------|
| mode | Multi bunch |
| energy | 12.5-20.5 MeV |
| accelerating freq. | 1.3 GHz |
| bunch spacing | 9.2 ns |
| repetition | 30 Hz (max) |
| macropulse length | 8 μs |
| energy spread | 1.5-2 % |
| charge per bunch | < 2 nC |
| bunch length | 20-30 ps |
| peak current | 50 A |
| norm. emittance | YU-156 100-150 π mm mrad |

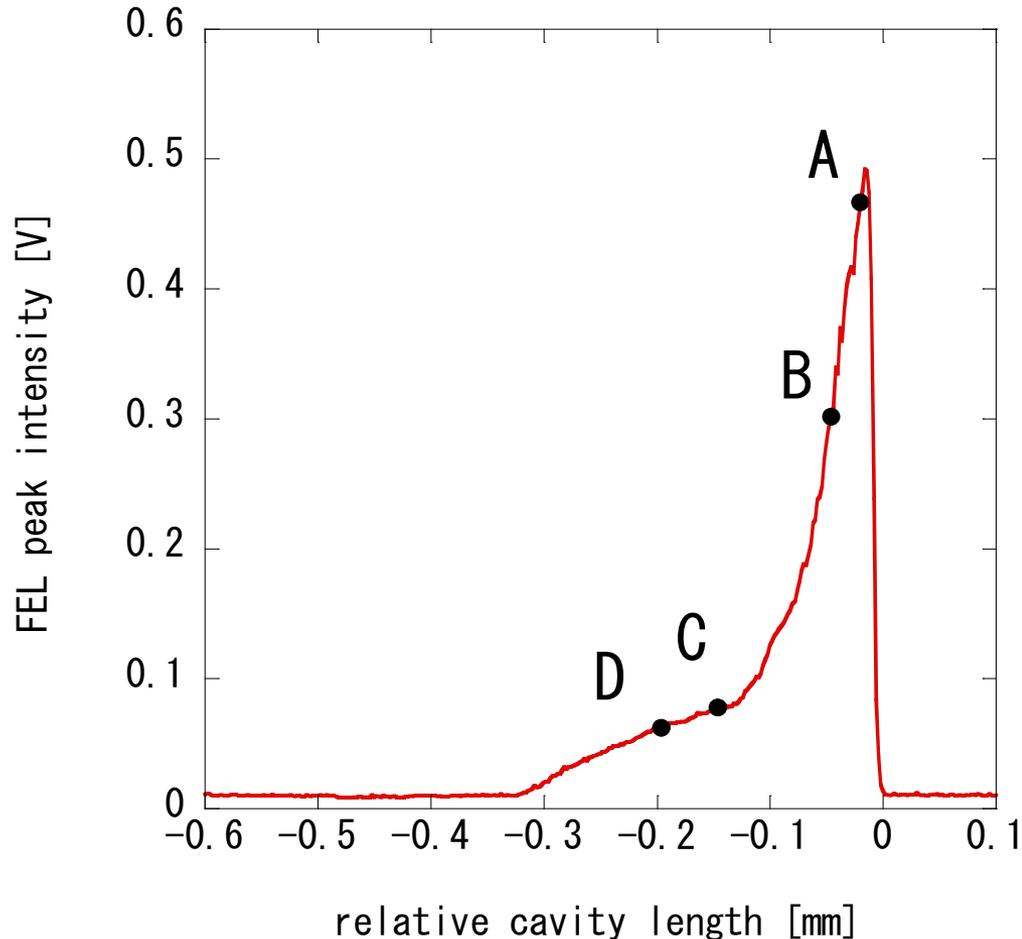


- FEL光の分光強度
 - 電子ビームエネルギー: 約15 MeV
 - ウィグラーギャップ: 30~42 mm
 - 回折格子分光器 (5 g/mm)
 - 検出器: EnergyMax J-10MB-LE

γ : 電子ビームエネルギー
 K : ウィグラーK値 (\propto 磁場強度)
 λ_w : ウィグラー磁場周期

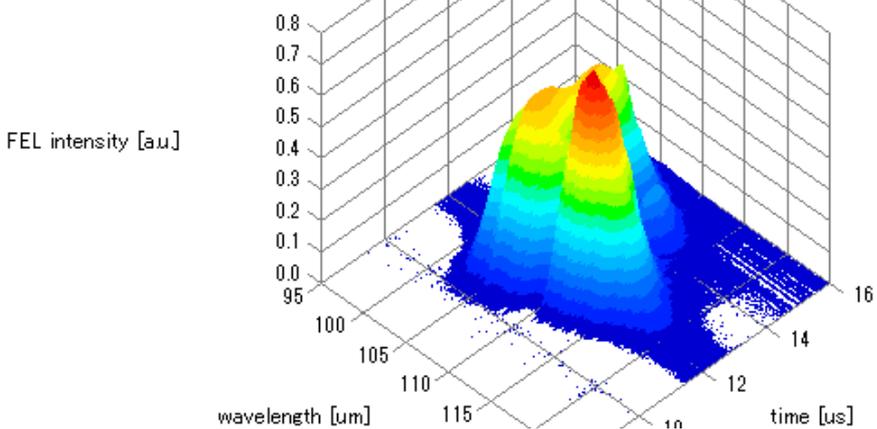
$$\lambda = \frac{\lambda_w}{2\gamma^2} (1 + K^2)$$



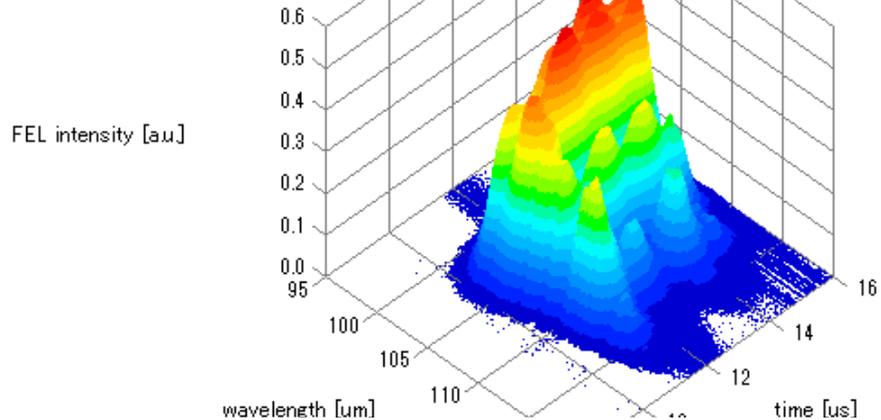


FELデチューニング曲線。横軸は光共振器長の相対的な変化で、電子ビーム繰り返しと完全同期する長さからのずれ、縦軸はGe:Ga半導体検出器で測定したFEL光パルスのピーク強度(5回測定した平均値)。A点($-\lambda/5$)、B点($-\lambda/2$)、C点($-3\lambda/2$)、D点(-2λ)でFEL光の波長スペクトルを測定した。測定時の中心波長は106 μm 。

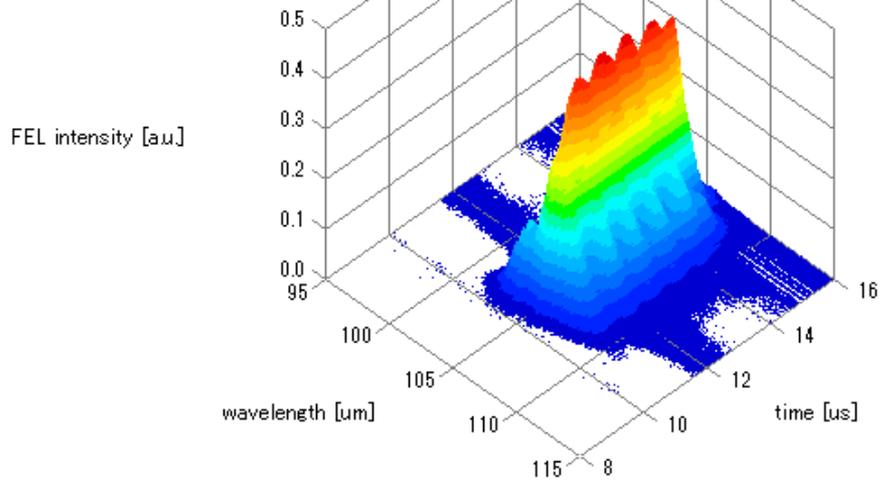
(A) $-\lambda/5$



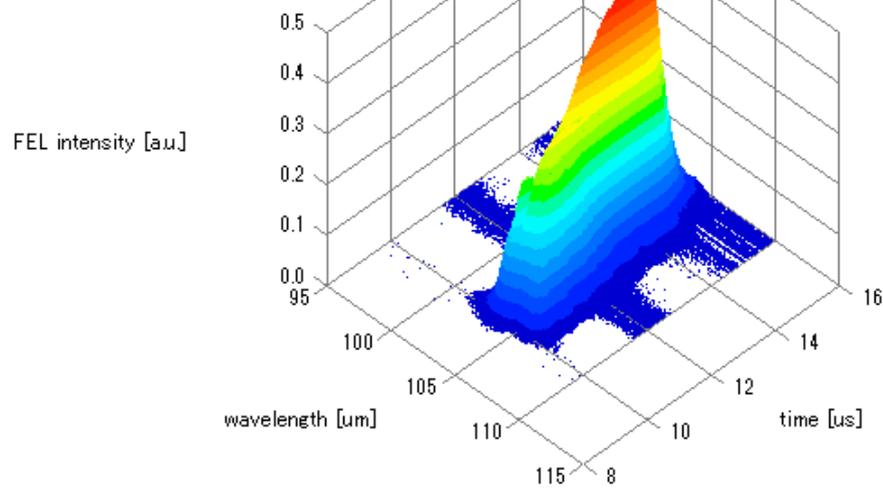
(B) $-\lambda/2$

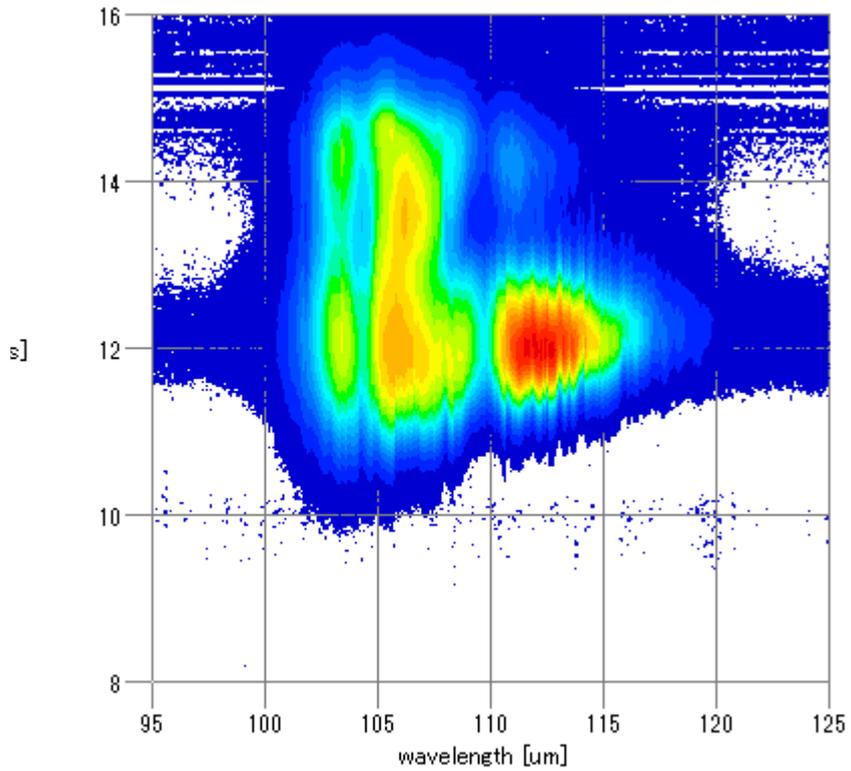
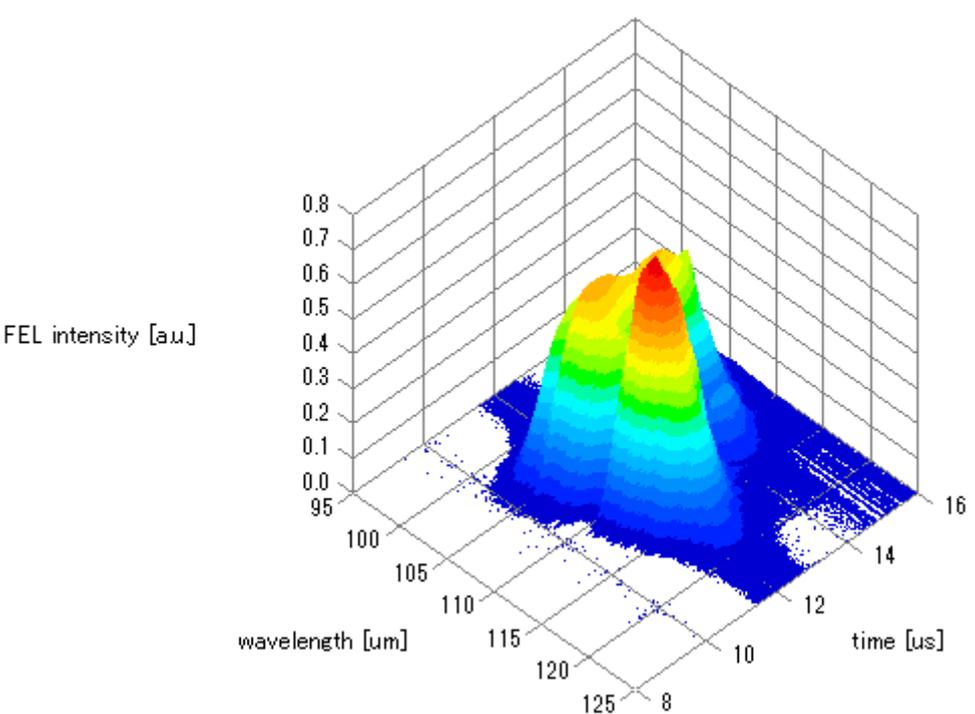


(C) $-3\lambda/2$

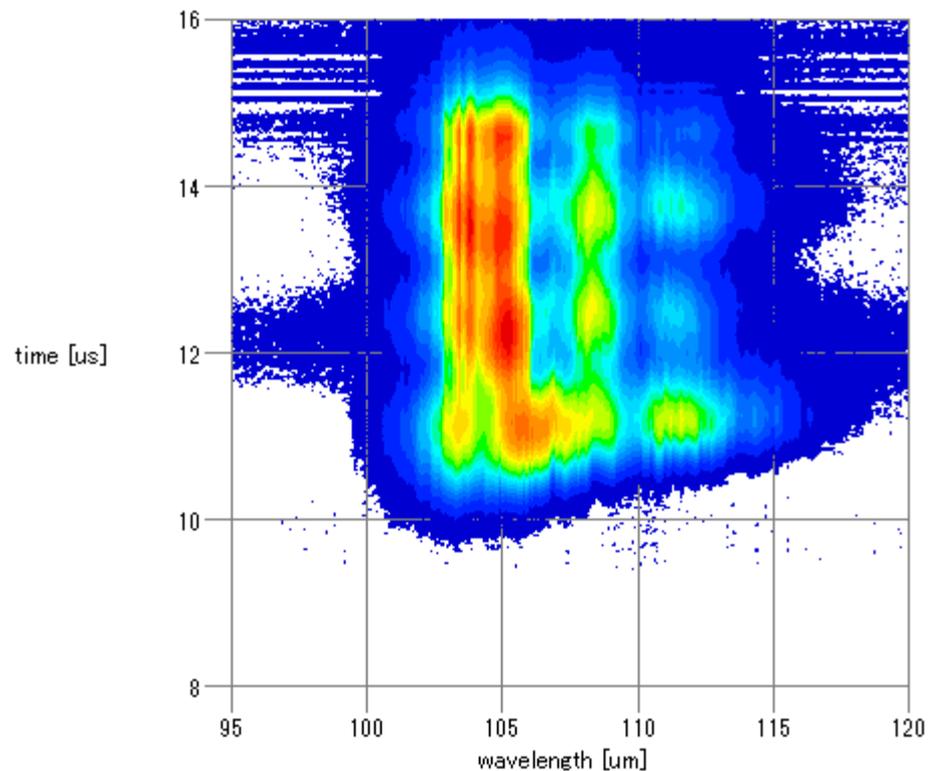
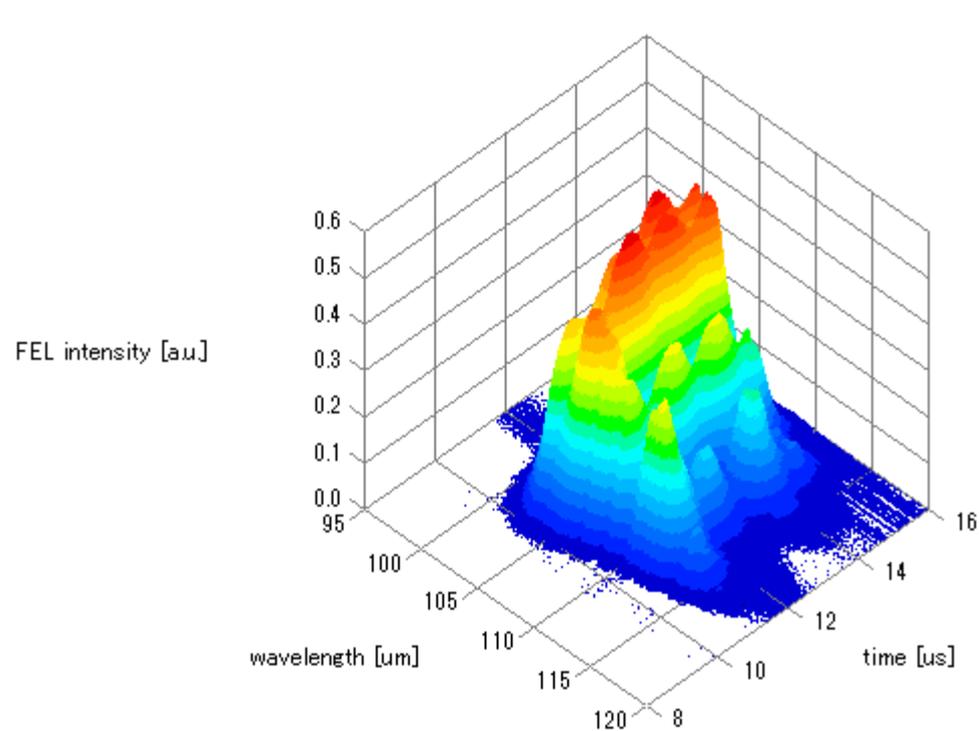


(D) -2λ

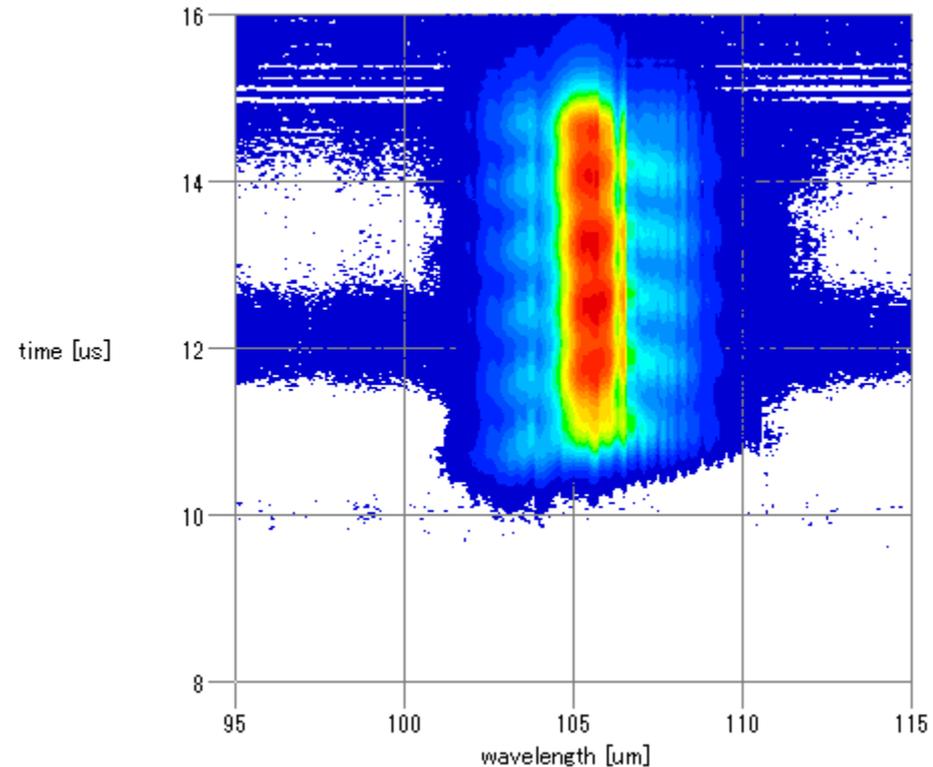
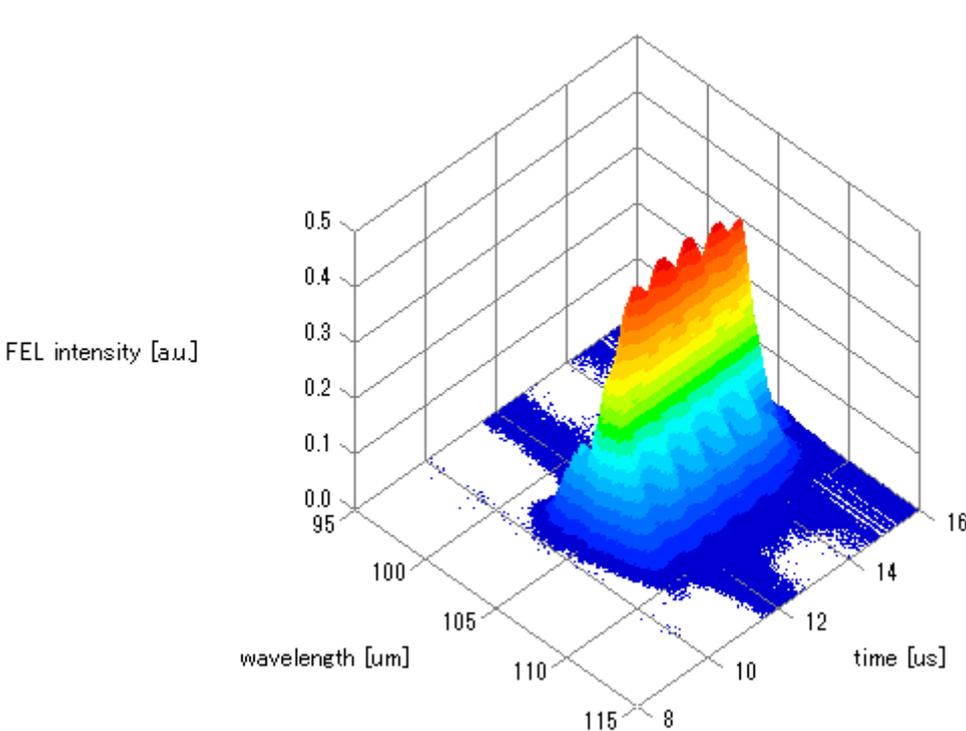




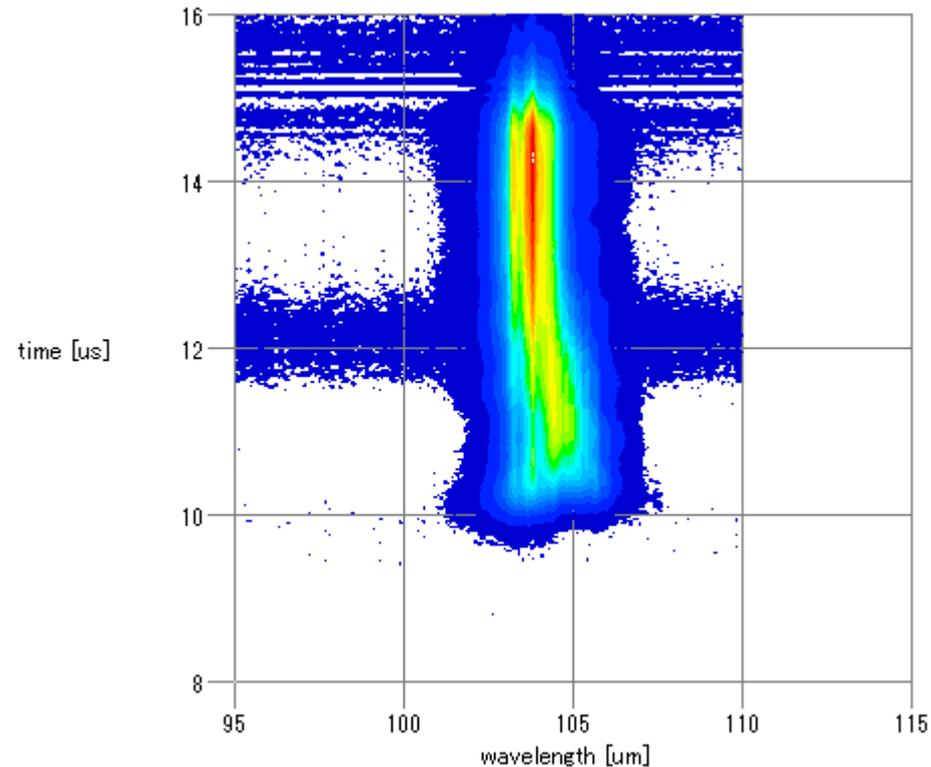
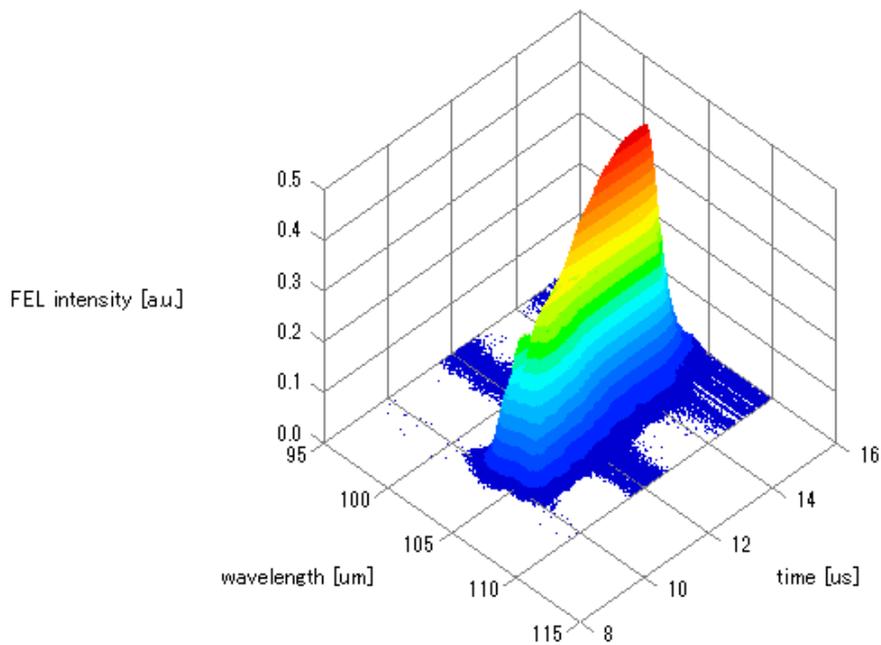
A点($-\lambda/5$)で測定した時間分解波長スペクトル。長波長側、短波長側にサイドバンドが発生し、最大強度は長波長側のサイドバンドに移っている。時間方向には2周期分のリミットサイクル振動がみられる



B点($-\lambda/2$)で測定した時間分解波長スペクトル。長波長側、短波長側にサイドバンドが発生しているが、最大強度は波長105μm付近から変わっていない。時間方向には4周期分のリミットサイクル振動がみられる



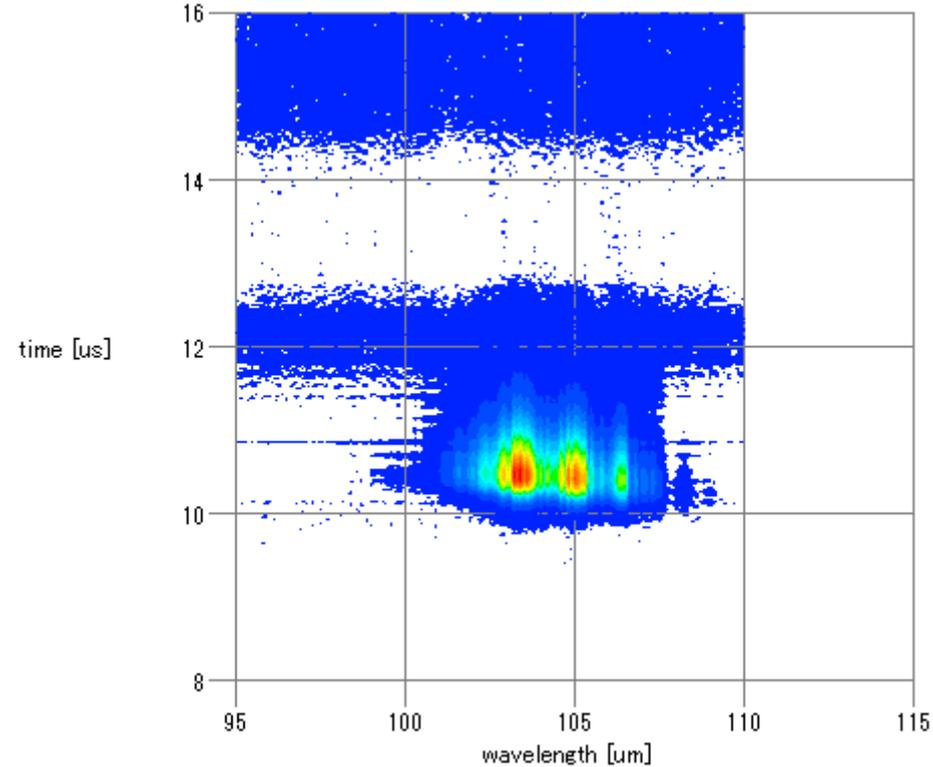
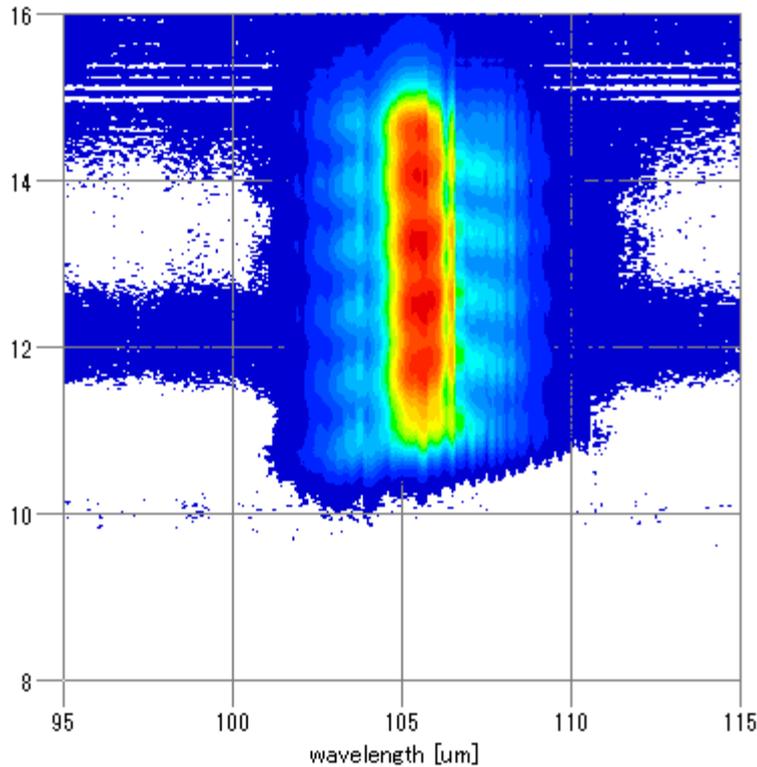
C点($-3\lambda/2$)で測定した時間分解波長スペクトル。FEL利得最大の位置。サイドバンドは発生せず、単一ピーク。時間方向には5周期分のリミットサイクル振動がみられ、波長スペクトル幅も振動している。



D点(-2λ)で測定した時間分解波長スペクトル。単一ピーク波長で、FEL利得も小さいため遅れて立ち上がっている。すでにリミットサイクル振動は見られない。

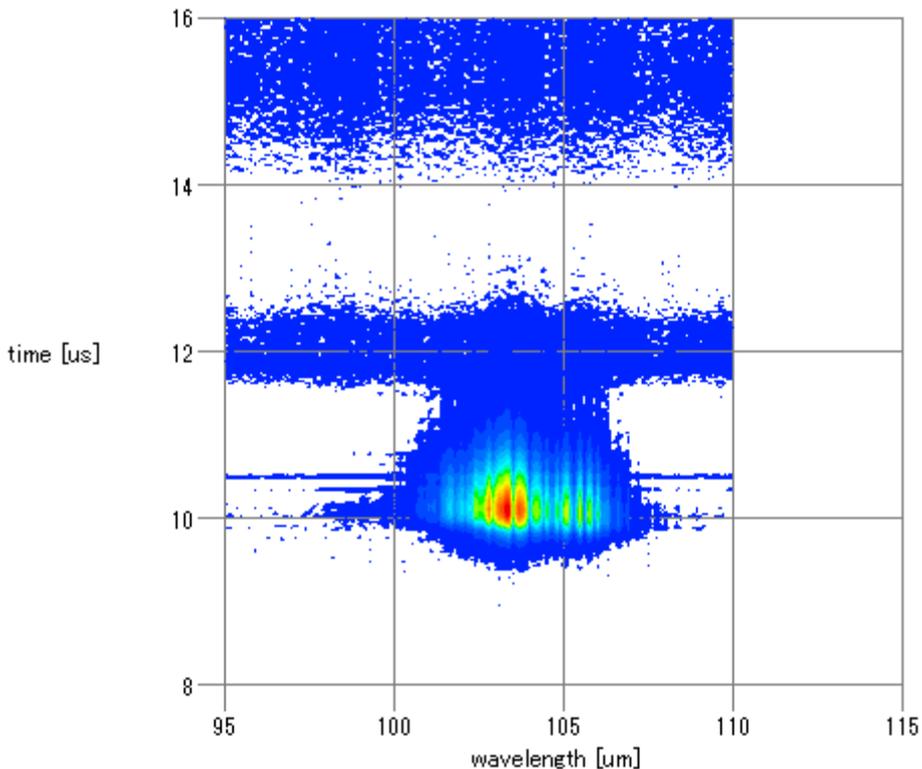
(1) Pulse長=220周期分、光減衰材80mm

(2) Pulse長=100周期分、光減衰材60mm

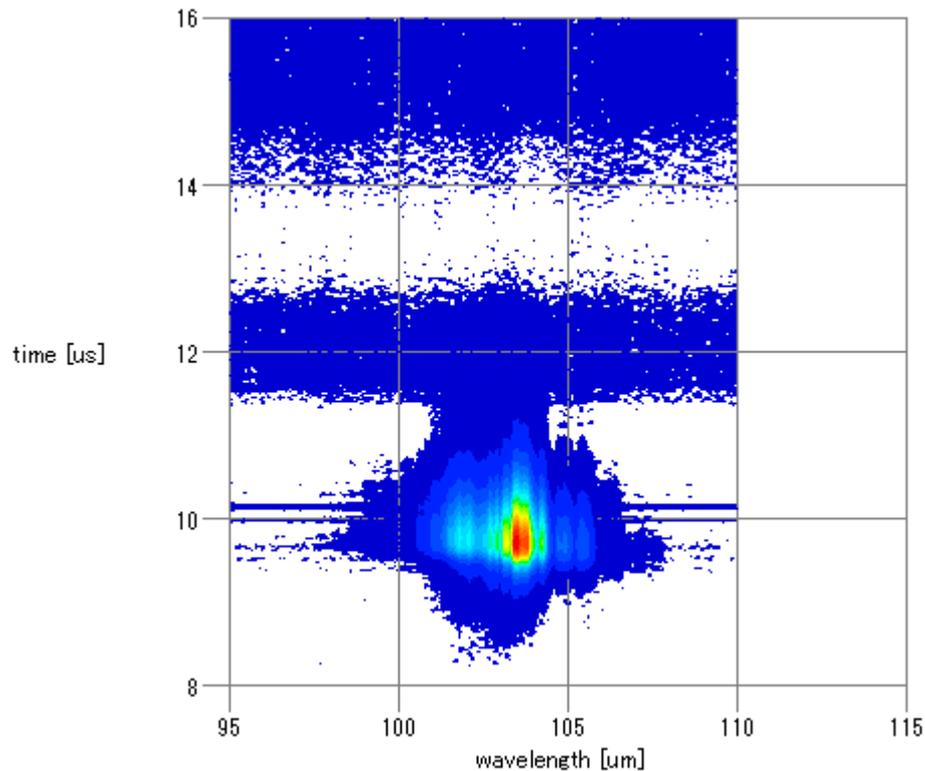


電子ビームのマクロパルス長と光減衰材の厚さを変えることで増幅途中の時間分解波長スペクトルを測定

(3) Pulse長=90周期分、光減衰材40mm



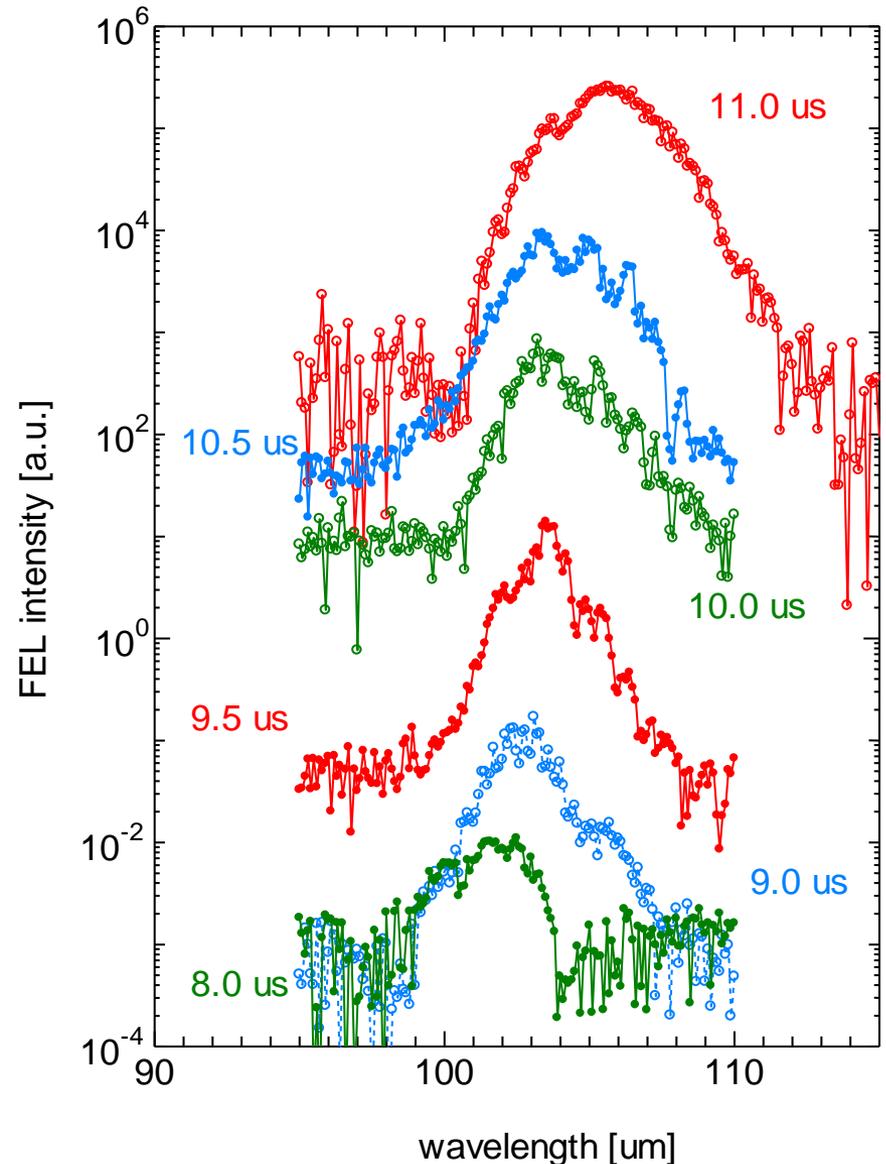
(4) Pulse長=80周期分、光減衰材20mm



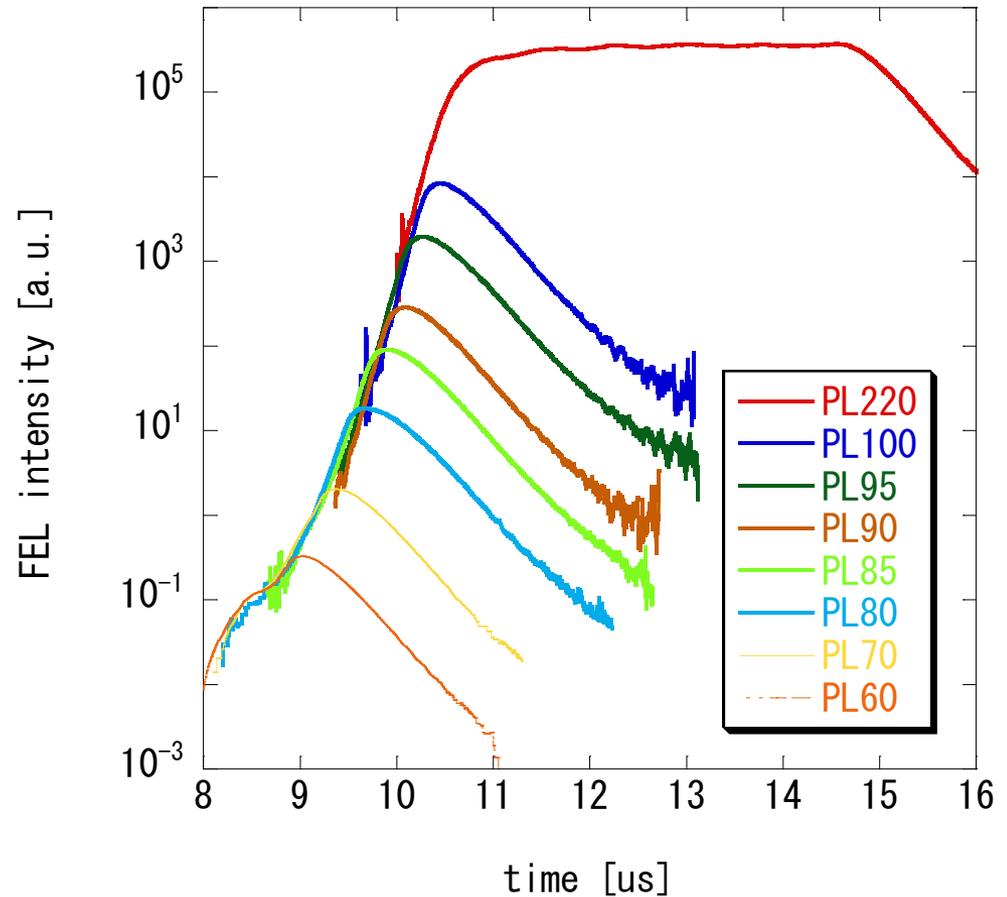
電子ビームのマクロパルス長と光減衰材の厚さを変えることで増幅途中の時間分解波長スペクトルを測定

波長スペクトルの時間発展

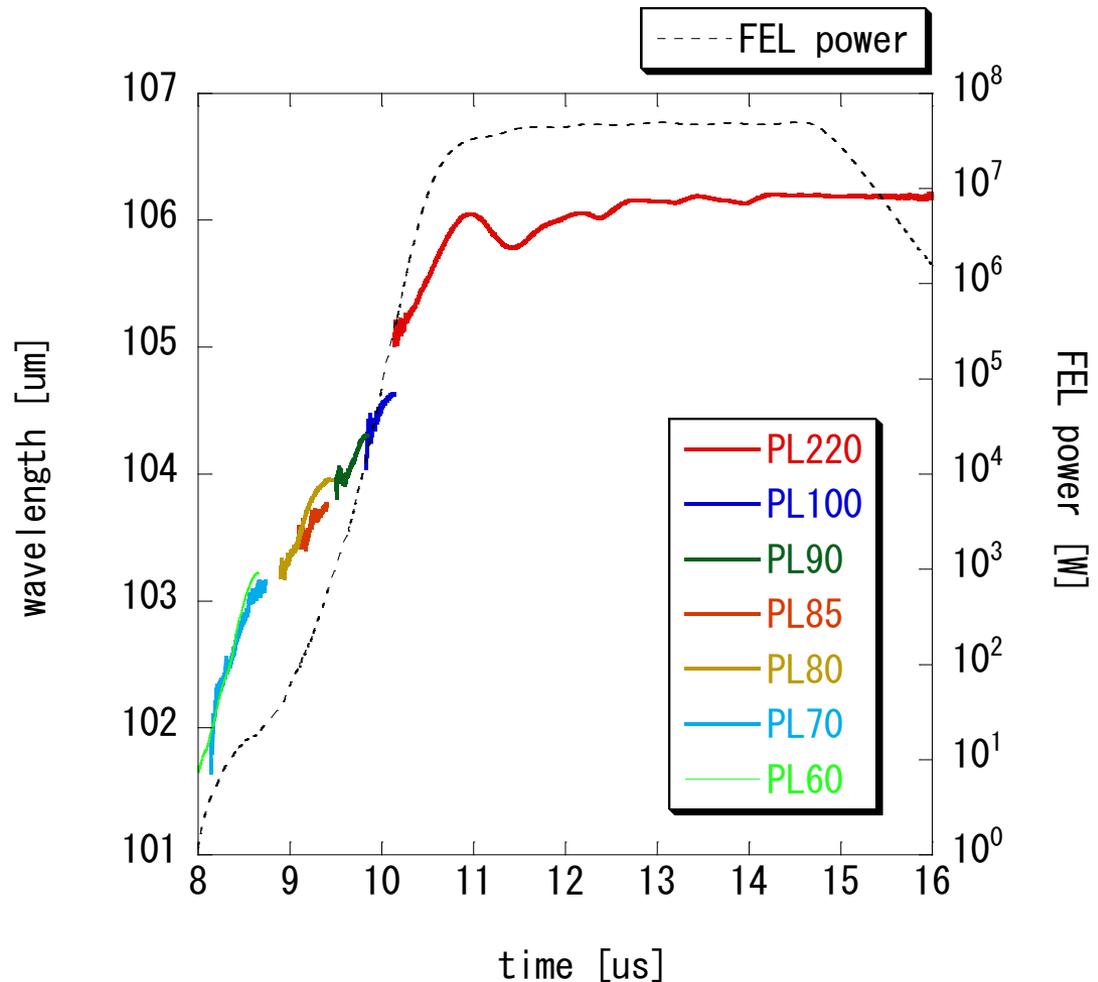
- 電子ビームのマクロパルス長と光減衰材の厚さを変えることで増幅途中の時間分解波長スペクトルを測定
- 一定時間間隔で指数関数増幅領域の波長スペクトルをプロット
- 初期には102 μm 近傍で発生
- 104 μm 付近に移動して指数関数増幅
- 出力飽和時には106 μm にシフト
- 自発放射→指数関数増幅領域→出力飽和での波長シフトで定性的に説明可能

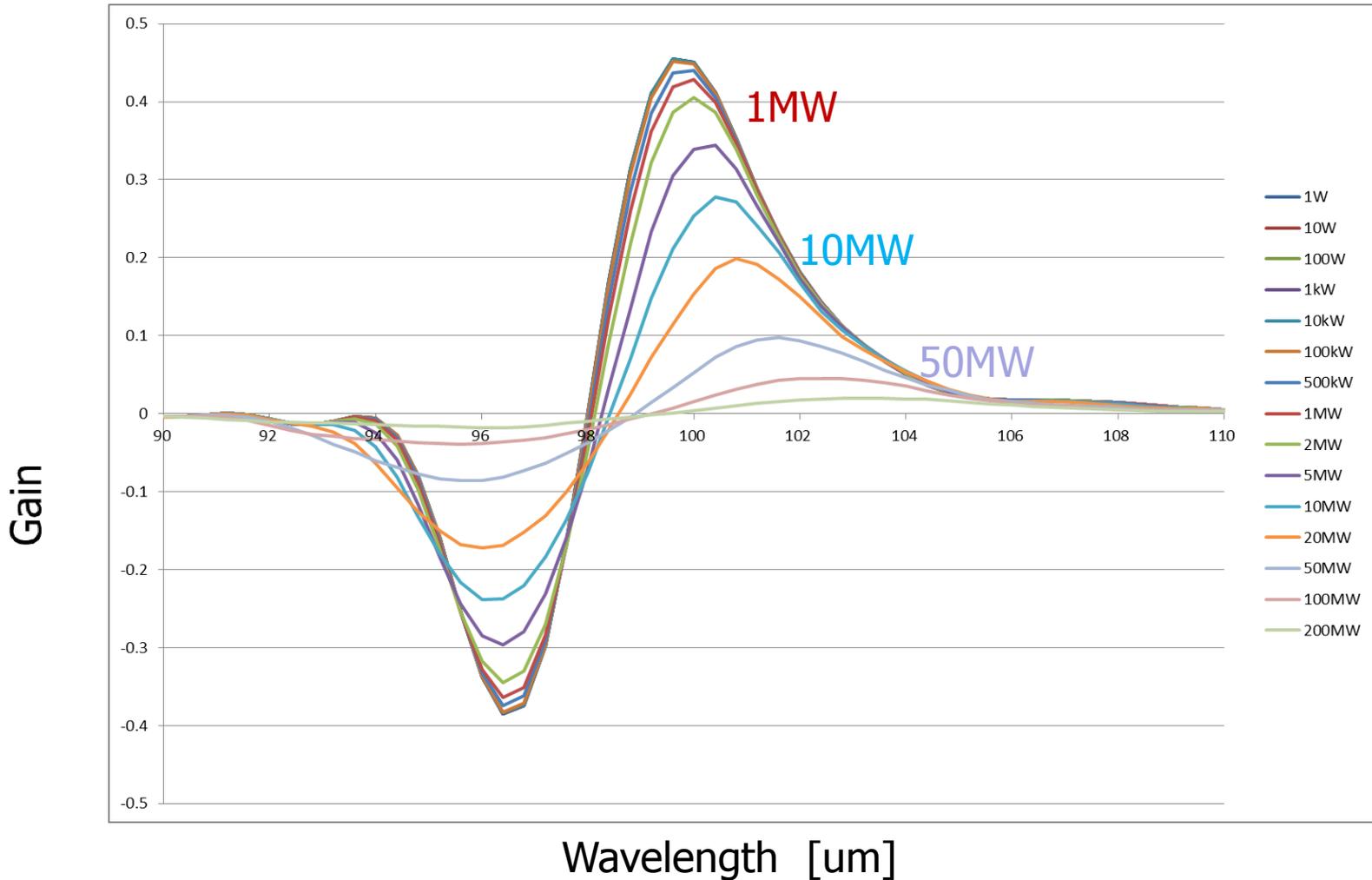


- 電子ビームのマクロパルス長を変えて測定した時間分解波長スペクトルにガウス分布をフィット
- そのピーク値を時間の関数としてプロット
- 光のピーク強度は7桁以上の成長



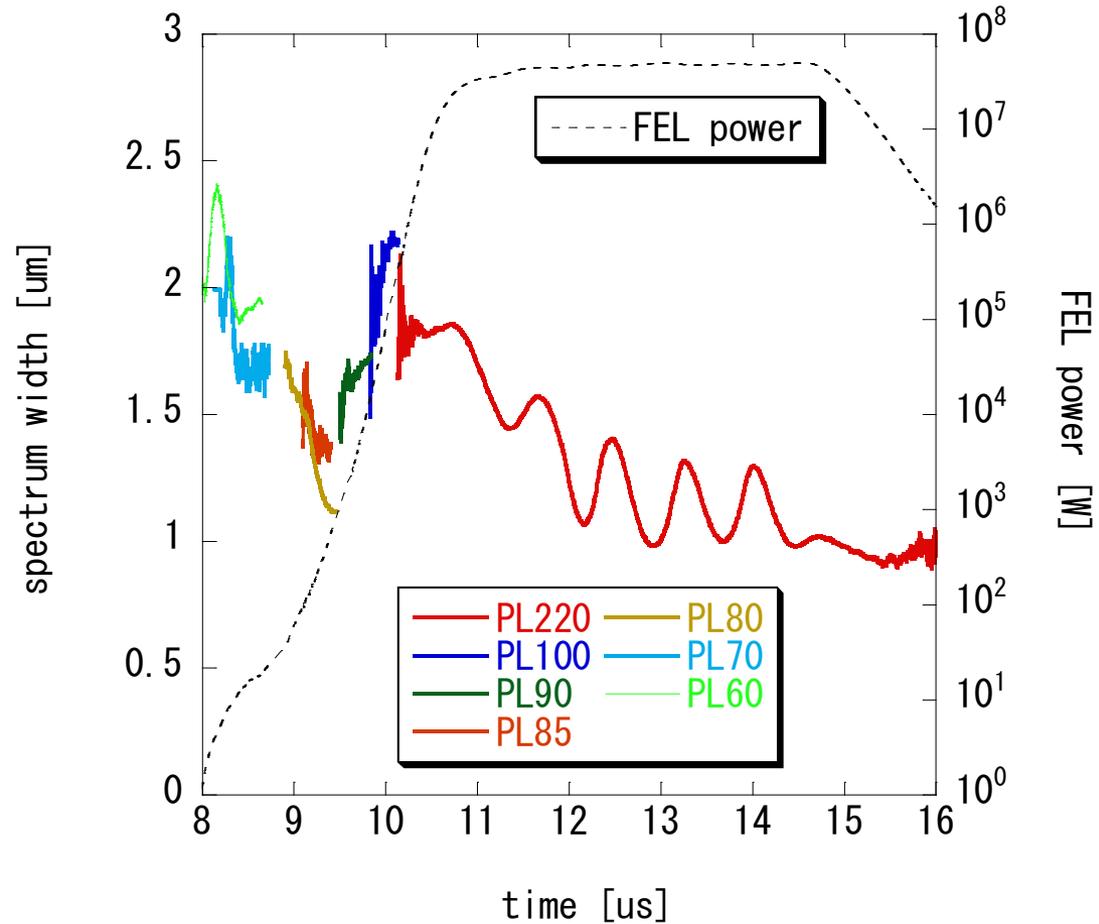
- 電子ビームのマクロパルス長を変えて測定した時間分解波長スペクトルにガウス分布をフィット
- そのピーク波長を時間の関数としてプロット
- 初期には102um近傍で発生
- 指数関数増幅とともに長波長側にシフト
- 出力飽和時には106um近傍に達する
- 波長のシフトはFEL利得帯域の変化で説明可能





自発放射から指数関数増幅: 98um→100um(2%長波長側にシフト)
 飽和→ GainとLossのつり合いで決まる11.6um(1.6%さらに長波長側にシフト)

- 電子ビームのマクロパルス長を変えて測定した時間分解波長スペクトルにガウス分布をフィット
- そのスペクトル幅を時間の関数としてプロット
- スペクトル幅は増幅過程の前半では減少し、後半で増加(増幅による時間幅の減少)
- 出力飽和後、再度減減少に転じる
- リミットサイクル振動時は同じ周期で増減



- FELプロセスの初期から出力飽和に至る波長スペクトルをえる
 - 電子ビームのマクロパルス長を制御
 - FEL増幅プロセスを任意の時点で停止
 - Ge:Ga検出器の入力に合わせて、光強度を減衰材の厚みで調整(テフロンブロック:0~80mm)
 - 各々の時点でのFELの時間分解波長スペクトルを測定
- FEL増幅過程の初期から出力飽和に至る波長スペクトルの時間的な振る舞いを評価
- FEL増幅過程にみられる波長シフトは利得帯域のシミュレーション結果と整合性がある
- スペクトル幅の変化は定性的にはFELの理論と一致している