

超短電子バンチ計測のための超広帯域EOプローブ光開発

小川 奏

2013年 1月 10日

第10回 高輝度・高周波電子銃研究会

SPring-8

研究の目的

○ 超短電子バンチを高時間分解能、非破壊、リアルタイム、シングルショットで3次元バンチ形状計測するためのEOサンプリング計測技術開発

1) 試験加速器SCSSで精度の高いシーディングを行う

(電子バンチとシード光(HHG)の3次元オーバーラップ確認)

2) SACLAの30 fs (FWHM)電子バンチを計測する

(高時間分解能)

○ 発表の概要

1) スペクトラルデコーディングEOサンプリング計測と実験結果

2) SACLAの30 fs (FWHM)電子バンチを計測するために必要な技術開発

・ 3次元計測が可能な(4ch x2)同時計測分光システム開発

・ 高時間分解能のための超広帯域プローブ光開発

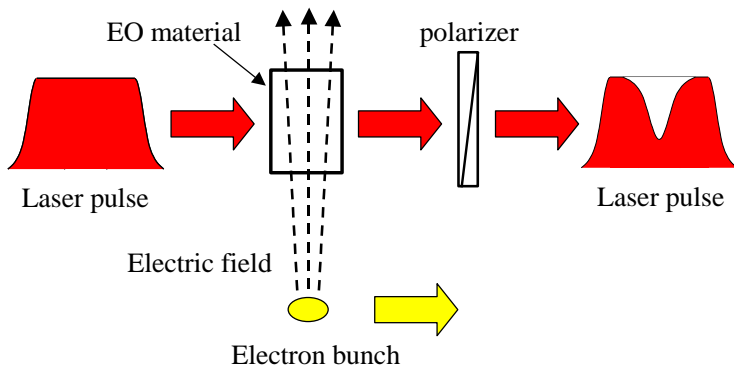
3) まとめ

1-1) スペクトラルデコーディングEOサンプリング計測

電気光学(Electro-Optic)効果による電場計測

○ 非破壊でのシングルショット計測が可能

I. Wilke et al., Phys. Rev. Lett., 88 (2002) 124801



電子バンチのクーロン電場が印加された時に非線形結晶(EO結晶)の屈折率状態が変化。
電子ビームと同期させたプローブレーザーの偏光状態の変化を検出する。

現在、最高で110 fs(FWHM)程度の時間分解能

G. Berden et al., Phys. Rev. Lett., 99 (2007) 164801

大きく分けて { テンポラル・デコーディング
スペクトラル・デコーディング
スペイシャル・デコーディング } の3つの手法がある

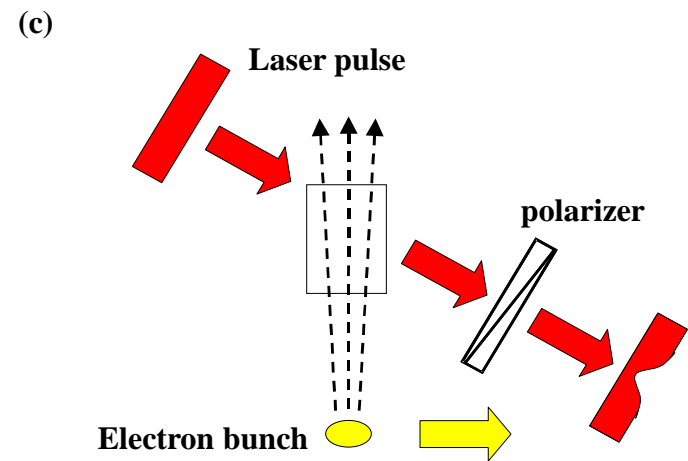
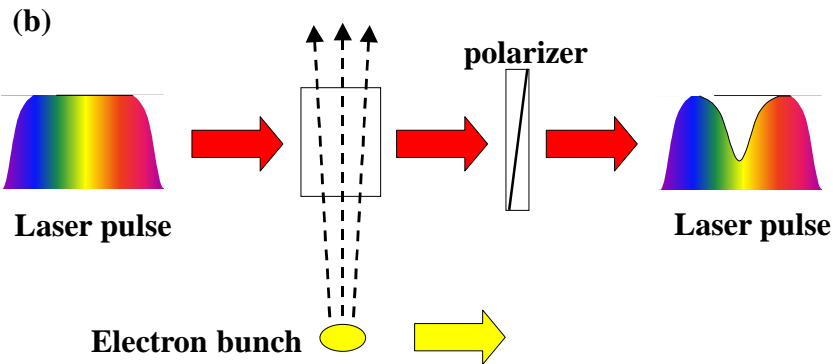
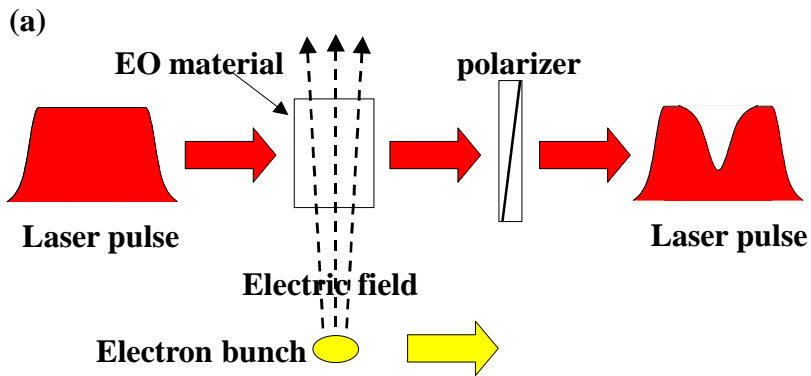
EOサンプリングの計測方式

○ バンチ形状計測(デコーディング)手法の比較

(a) テンポラル・デコーディング: プロブレーザーの時間波形クロスコリレータなどで計測。

(b) スペクトラル・デコーディング: プロブレーザーのスペクトル波形を計測。

(c) スペイシャル・デコーディング: 結晶に斜入射したプロブレーザーの空間分布を計測



3次元計測を行う必要性からスペクトラルデコーディング方式を採用

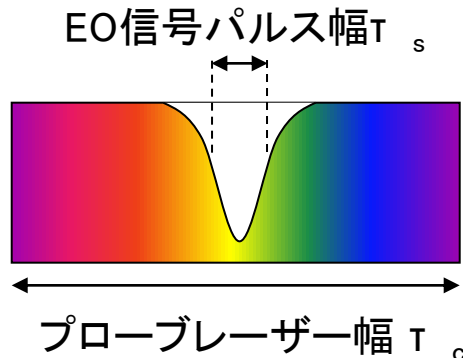
○ スペクトラルデコーディングには…

- ・ プロブレーザー光にチャープパルスが必要
 - 電場強度の時間変化を周波数領域に変換している
- ・ バンチ長より長いチャープパルスが必要
 - バンチ長よりあまりに長いチャープパルスは分解能を悪化させる
- ・ 計測には高分解能を持った分光器が必要

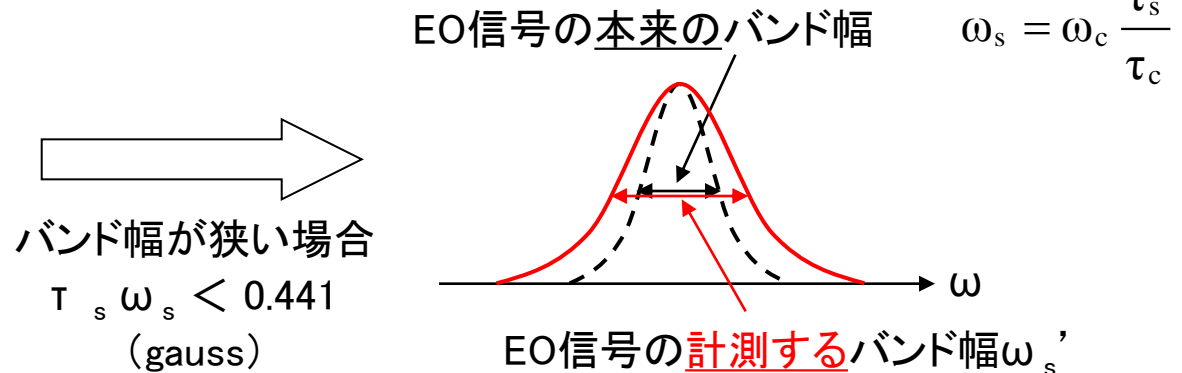
○ スペクトラルデコーディングの時間分解能

- ・ フーリエの不確定性の関係 $T_{ft} \approx \sqrt{\tau_0 \tau}$ フーリエ限界パルス幅
 τ_c : チャープパルス幅

時間領域



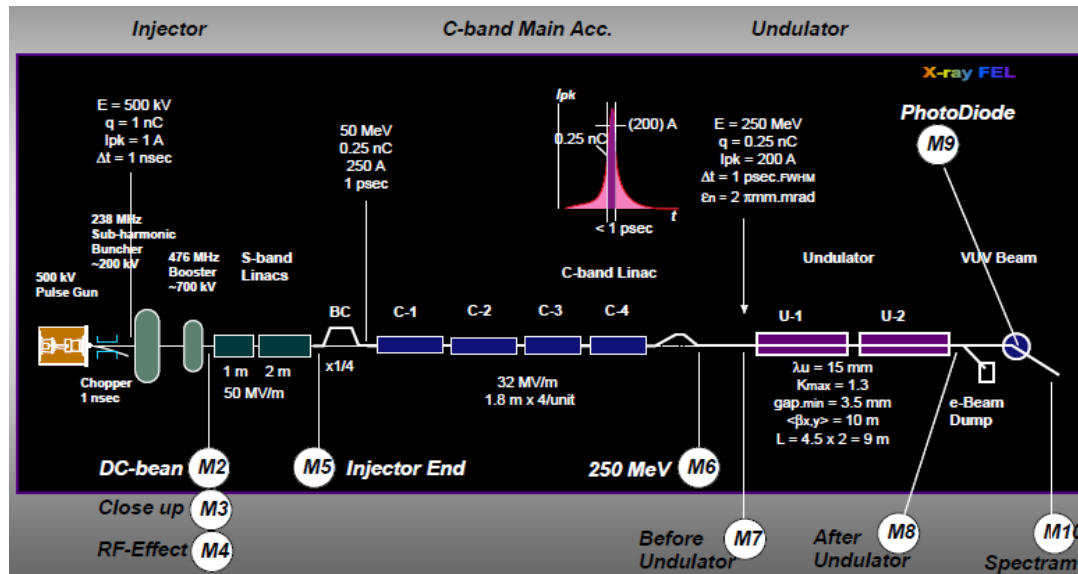
スペクトル領域



1-2) スペクトラルデコーディング法 EOサンプリング計測実験とその結果

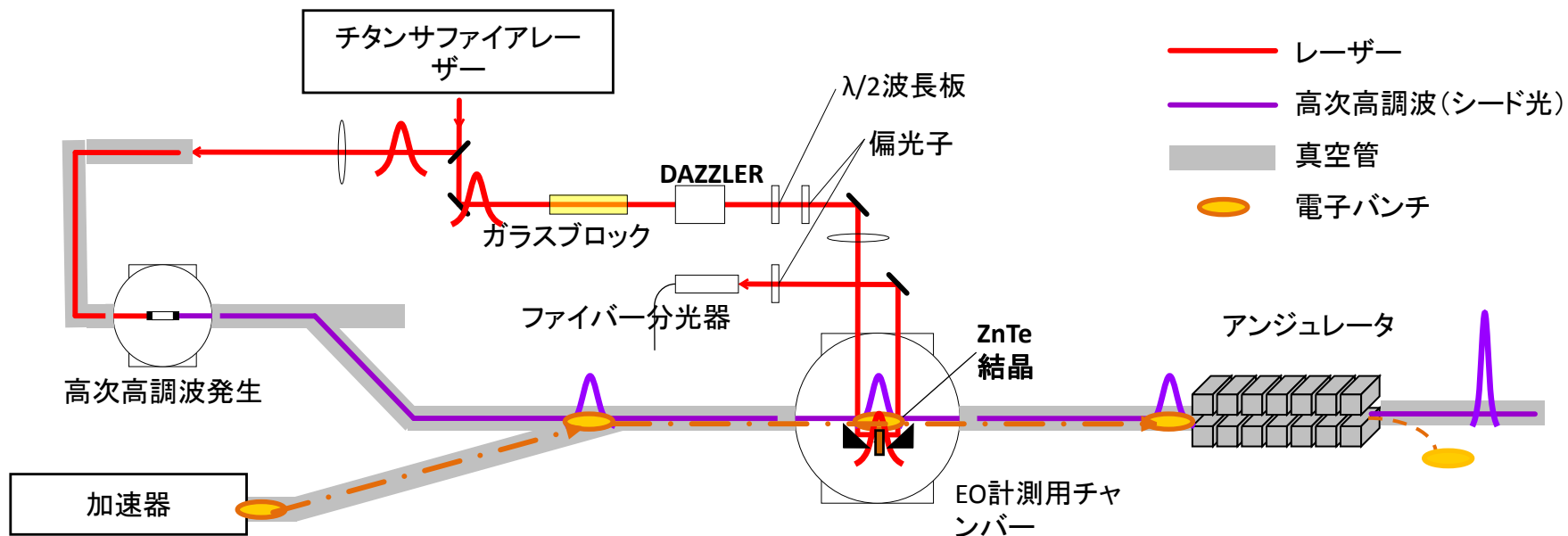
SCSSにおけるシードFEL実験

○ SCSS試験加速器



シードのためのEOサンプリング計測システム

○ SCSS試験加速器でのシードXFELとEOサンプリング計測のセットアップ



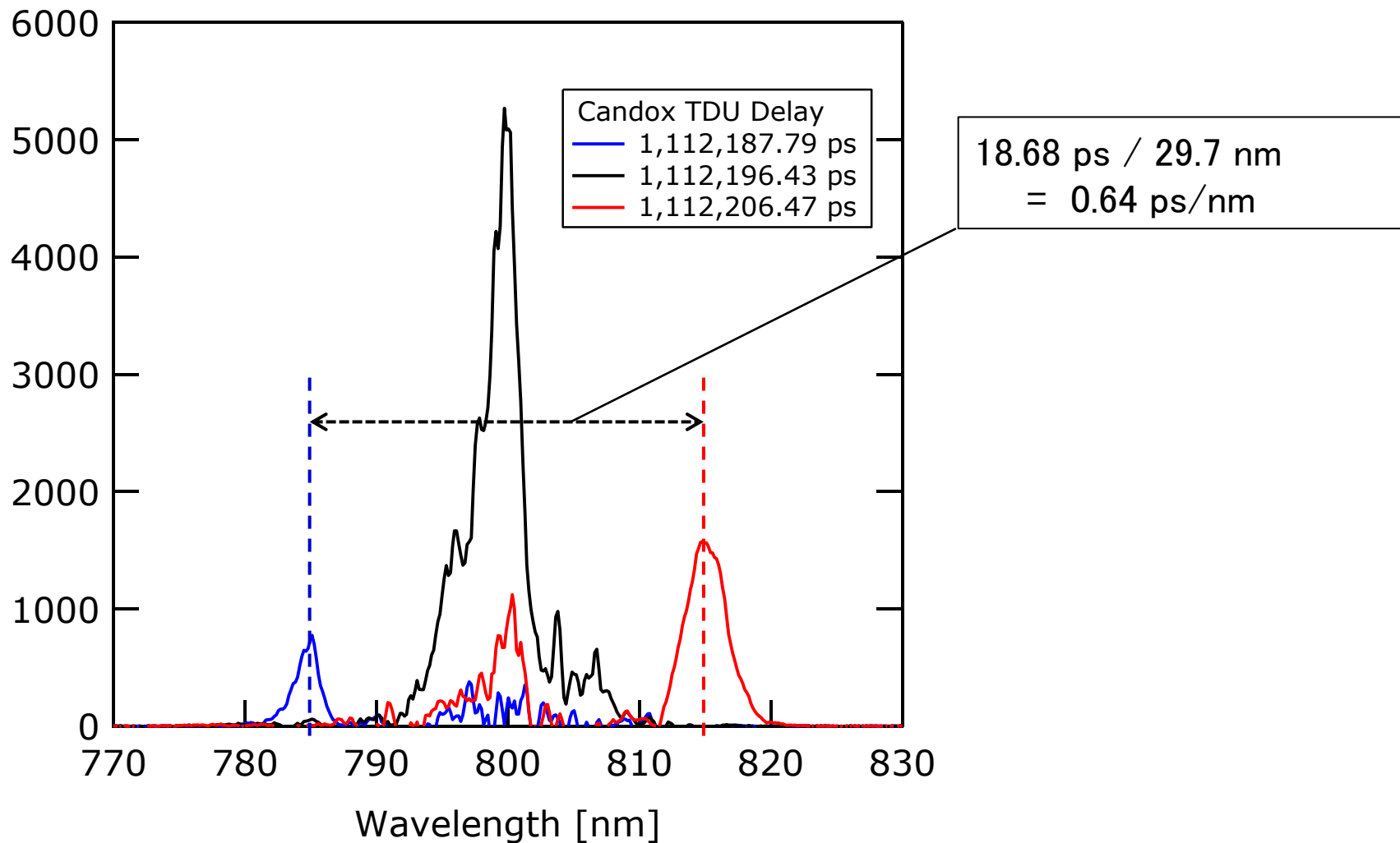
電子エネルギー	250 MeV
電子バンチ電荷	220 pC
バンチ幅	600 fs (FWHM)

シード/プローブレザー 帯域	9 / 5 nm (FWHM)
シード/プローブレザー パルス幅	0.15 / 5 ps (FWHM)

シード光と電子バンチの時間オーバーラップをモニターする

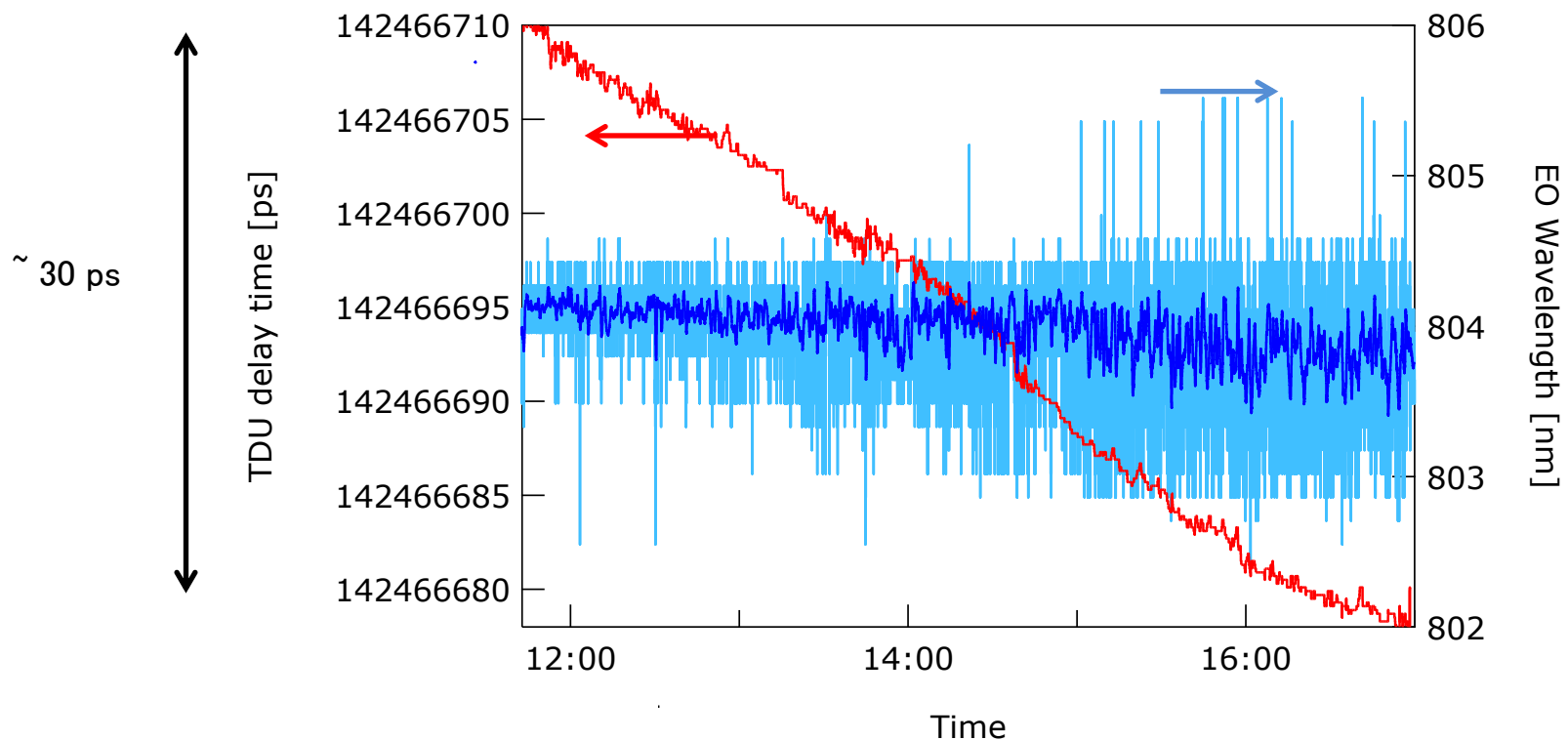
EOサンプリング計測結果

○ レーザーのタイミングを変えてEO信号の変化を計測した



時間ドリフト効果のフィードバック結果

○ EOサンプリング信号によるドリフトのフィードバックが可能に



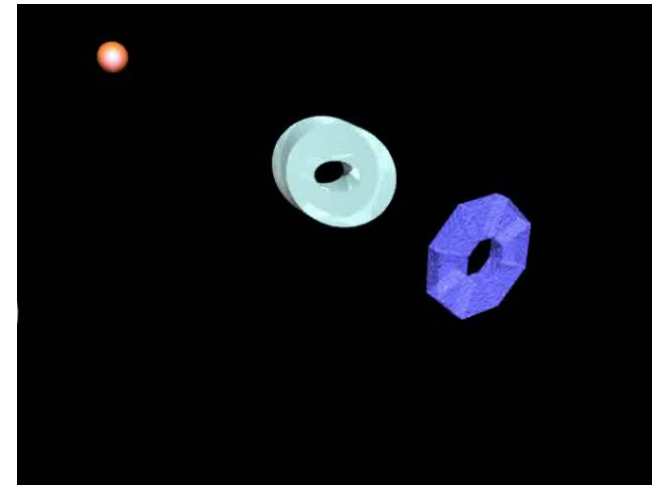
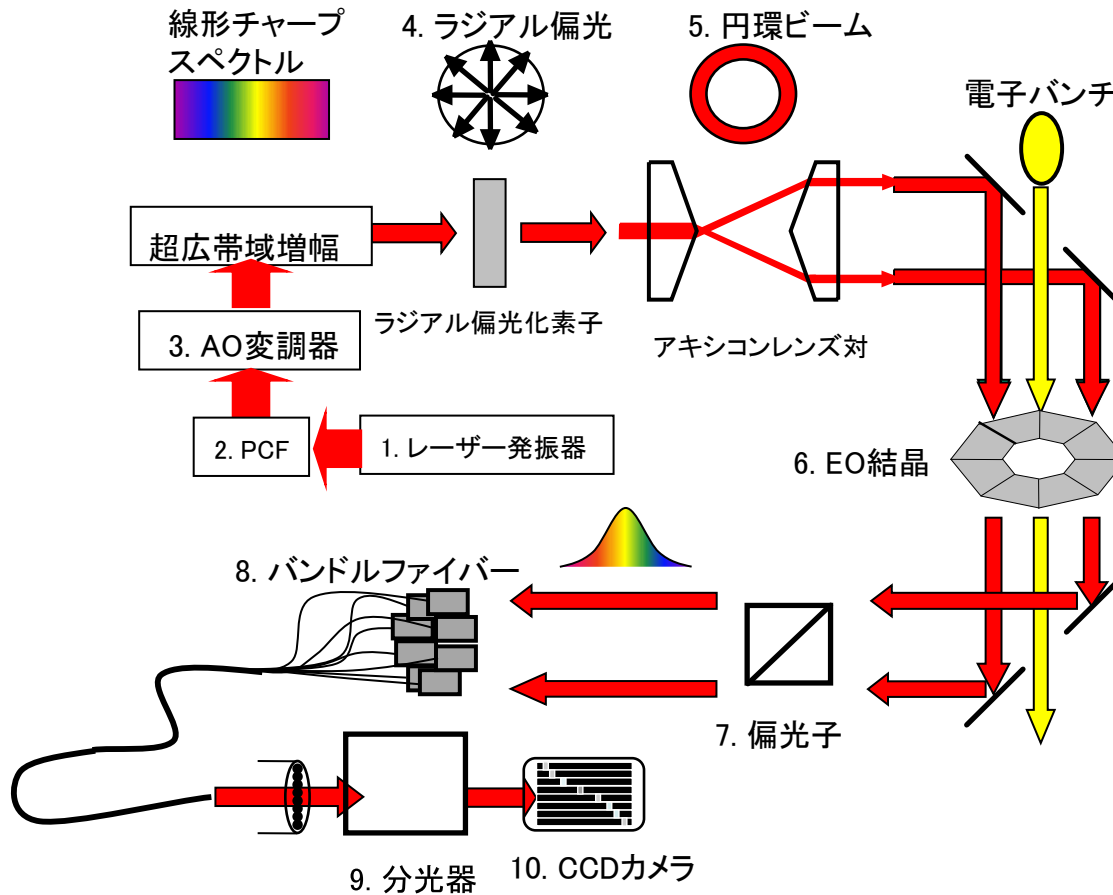
実験パラメータ

- ・SCSS電子バンチ: 500 fs FWHM
- ・プローブ光帯域: 9 nm FWHM
- ・プローブ光パルス幅: 4.8 ps = 4800 fs
- ・チャープレート: 533 fs/nm
- ・プローブ光帯域9 nm時のフーリエ限界パルス: 105 fs
- ・分解能 $R = \sqrt{4800 \text{ fs} \times 105 \text{ fs}} = \underline{708 \text{ fs}}$

2) 30 fs (FWHM) 電子バンチ計測のための研究開発

SACLAの30 fs電子バンチを計測する

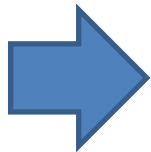
○ 到達時間、時間形状、空間位置をリアルタイムかつ非破壊でモニターし続ける
3次元電子バンチ (3D Bunch Charge Distribution: 3D-BCD) モニター



プローブ光の現状と30 fs計測のために必要なスペック

○ 計測器の分解能

SCSS電子バンチ: 300 fs FWHM
プローブ光帯域: 30 nm FWHM
プローブ光パルス幅(線形チャープ): 5 ps FWHM
チャープレート: 163 fs/nm



SACLA電子バンチ: 30 fs FWHM
プローブ光帯域: 300 nm FWHM
プローブ光パルス幅(線形チャープ): 300 fs FWHM
チャープレート: 1 fs/nm

○ 時間分解能

プローブ光パルス幅: 3 ps = 3000 fs
プローブ光帯域30 nm時のフーリエ限界パルス: 30 fs
分解能 $R = \sqrt{3000 \text{ fs} \times 30 \text{ fs}} = 300 \text{ fs}$



プローブ光パルス幅: 300 fs
プローブ光帯域300 nm時のフーリエ限界パルス: 3.3 fs
分解能 $R = \sqrt{300 \text{ fs} \times 3.3 \text{ fs}} = 31.5 \text{ fs}$

30 fs電子バンチ3D-BCDモニターのための要素技術開発

- ・ラジアル偏光円環ビームによるオーバーラップ計測技術開発
- ・高速応答有機結晶(DAST)によるEOサンプリング計測
- ・8ch同時計測が可能な高分解分光計測技術開発
- ・高い時間分解能を得るための > 300 nm超広帯域プローブ光発生
- ・フラットトップなスペクトルと、リニアな周波数チャープ(2次分散)
- ・S/N改善のためのプローブ光の超広帯域増幅

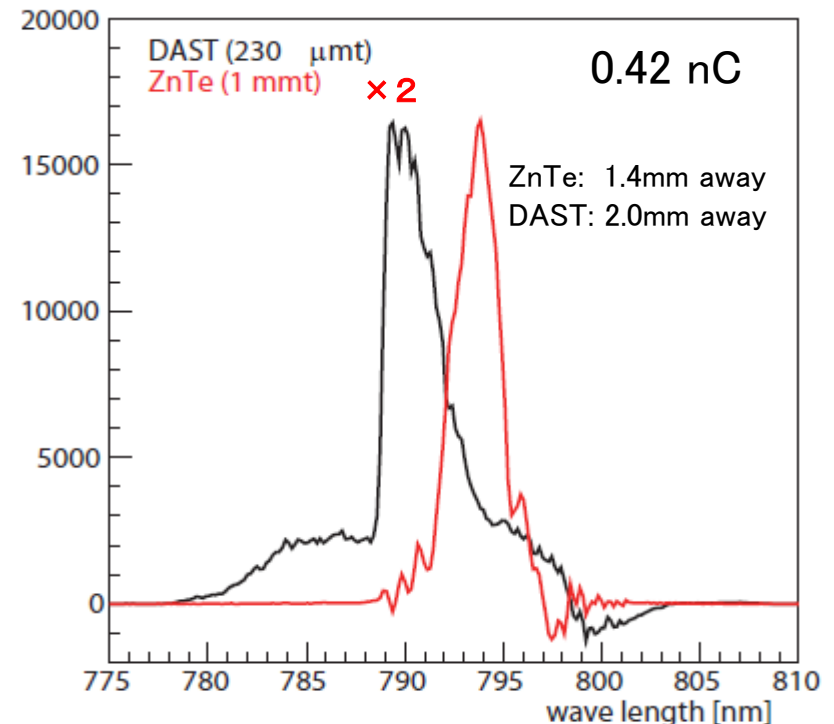
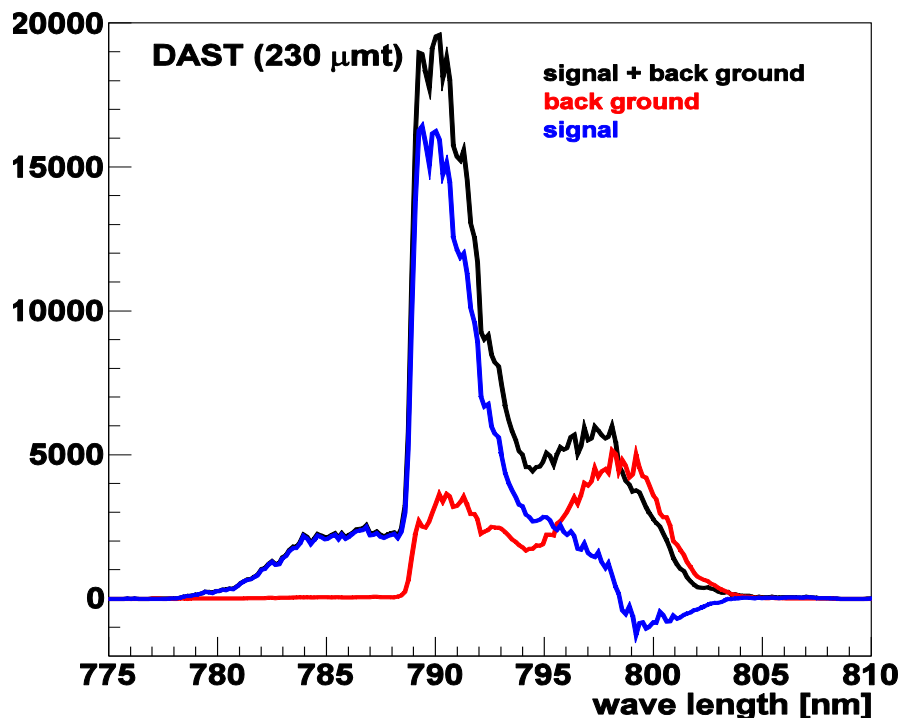
有機EO結晶であるDAST結晶について

ZnTeやGaPと比較して、非線形係数が高く、広帯域(1-30THz)で使用可能であるため、フェムト秒の高時間分解能化が可能になると期待される。

DAST: $n_1=2.4$, $n_2=1.68$, $n_3=1.62$, $r_{11}=77\text{pm/V}$, $r_{21}=42\text{pm/V}$, $r_{13}=15\text{pm/V}$ @800nm

DAST結晶が溶けないエポキシ系接着剤バックシールでホルダに固定した。真空度は $1.7 \times 10^{-7}\text{Pa}$ に達した。2010年度までの実験では信号は計測できなかった。

2011年度に、SCSS試験加速器での実験で、世界初の電子バンチ計測に成功
(**超高速応答性を示唆するブロードニングを観測**)。

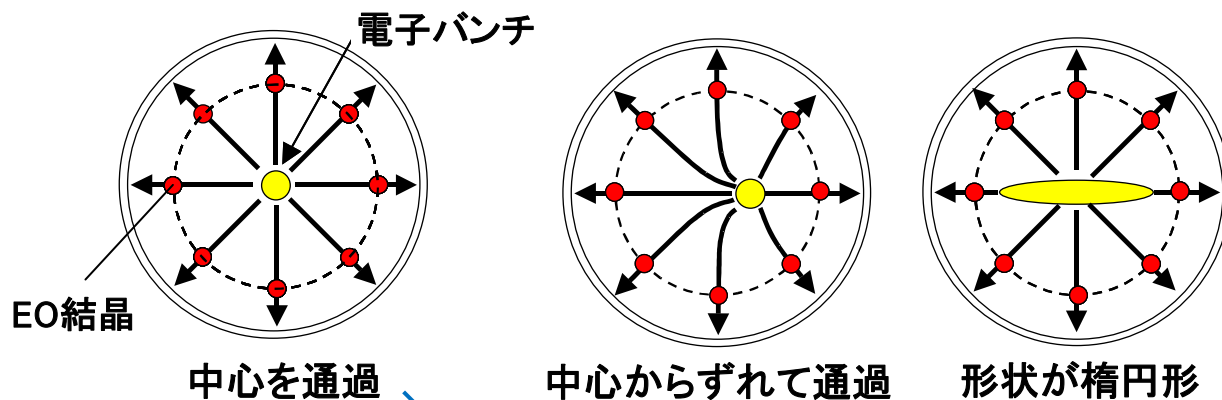


30 fs電子バンチ3D-BCDモニターのための要素技術開発

- ・ラジアル偏光円環ビームによるオーバーラップ計測技術開発
- ・高速応答有機結晶(DAST)によるEOサンプリング計測
- ・8ch同時計測が可能な高分解分光計測技術開発
- ・高い時間分解能を得るための > 300 nm超広帯域プローブ光発生
- ・フラットトップなスペクトルと、リニアな周波数チャープ(2次分散)
- ・S/N改善のためのプローブ光の超広帯域増幅

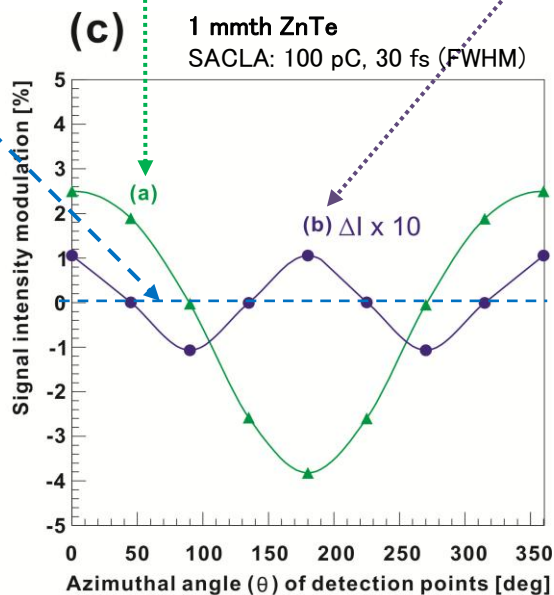
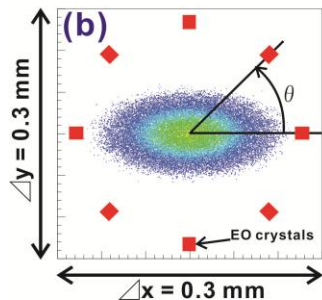
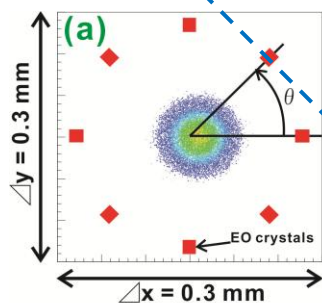
空間計測 (伝搬位置とバンチ形状計測)

○ 多点で同時に計測することで、得られた信号強度の方位角方向ごとの違いから電子バンチの通過位置とバンチ形状を検出する



原理実証実験では4個の結晶を使用。

最終的には8個の結晶を使用する。

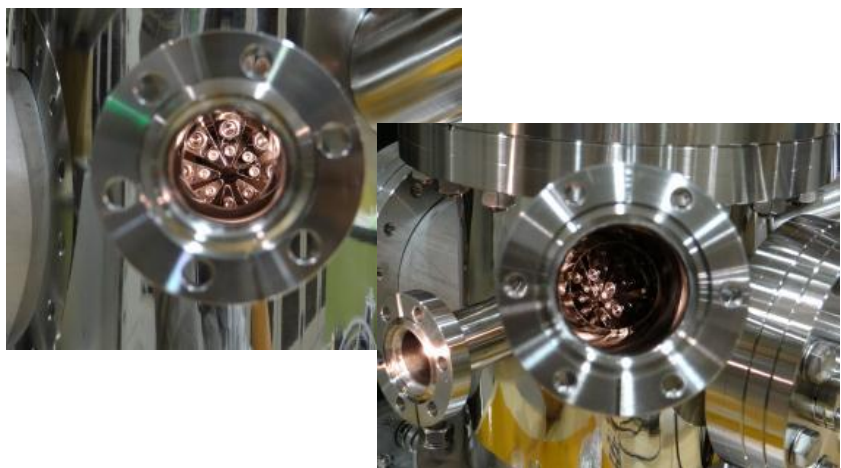


各結晶で得られる信号強度

$$I = I_0 \sin^2 \left(\frac{\pi}{\lambda} n_0^3 r_{41} E_r d \right)$$

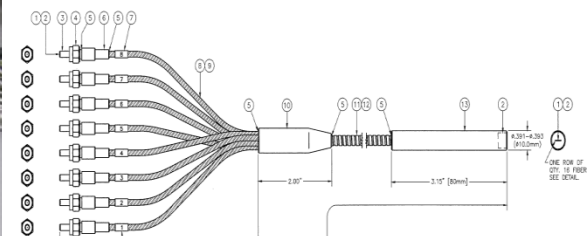
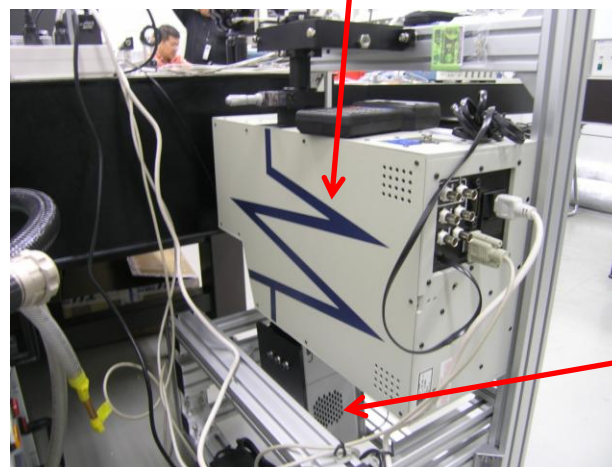
最大8ch同時計測のための結晶ホルダー & 分光器

○ 8軸結晶ホルダー



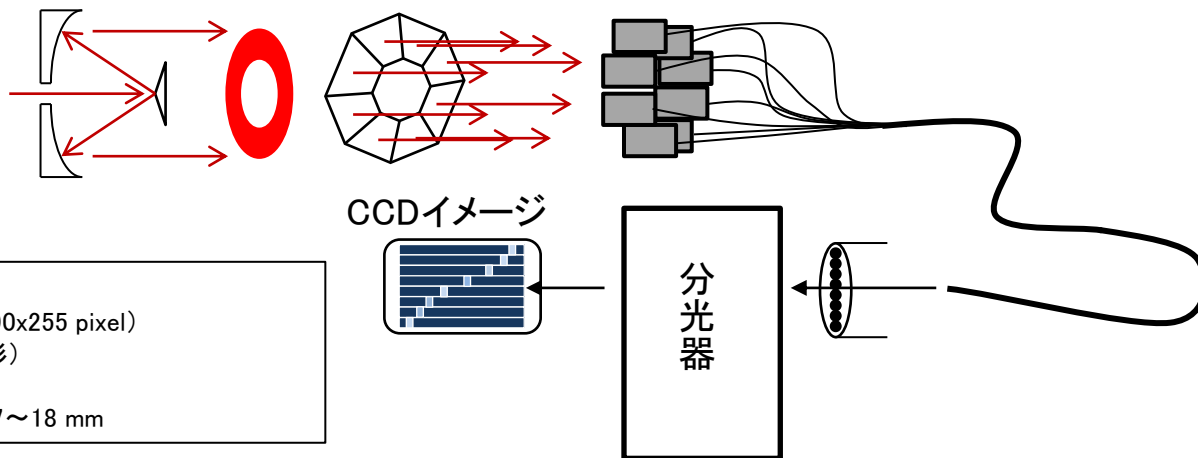
○ ファイバーバンドル分光器

- ・分光器 (Oriol MS257) : $f = 220.0 \text{ mm}$
回折格子サイズ $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$

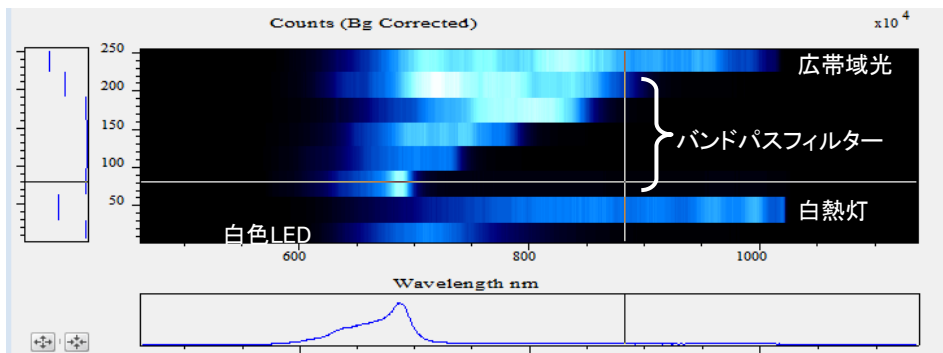


バンドルファイバーを用いた8ch同時計測システム

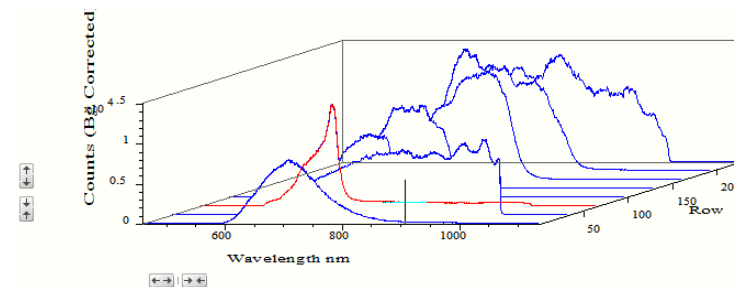
- 各EO信号をCCDの異なるトラックに入射、読み出すことが可能



- ファイバー白色光源を用いた動作テスト結果



CCDイメージ



スペクトル

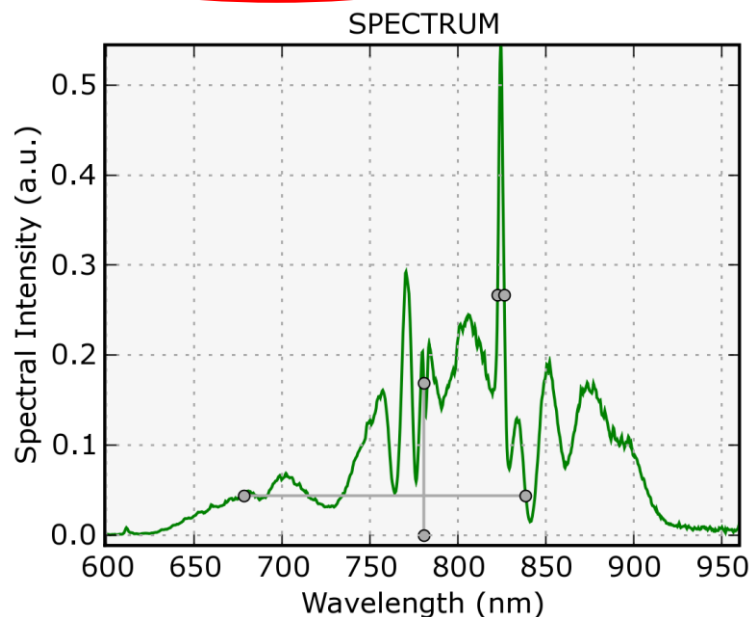
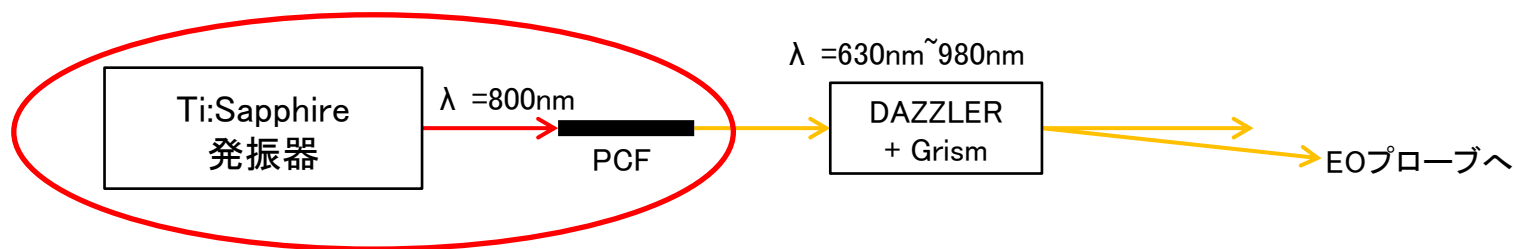
30 fs電子バンチ3D-BCDモニターのための要素技術開発

- ・ラジアル偏光円環ビームによるオーバーラップ計測技術開発
- ・高速応答有機結晶(DAST)によるEOサンプリング計測
- ・8ch同時計測が可能な高分解分光計測技術開発
- ・高い時間分解能を得るための > 300 nm超広帯域プローブ光発生
- ・フラットトップなスペクトルと、リニアな周波数チャープ(2次分散)
- ・高S/N比のためのプローブ光の超広帯域増幅

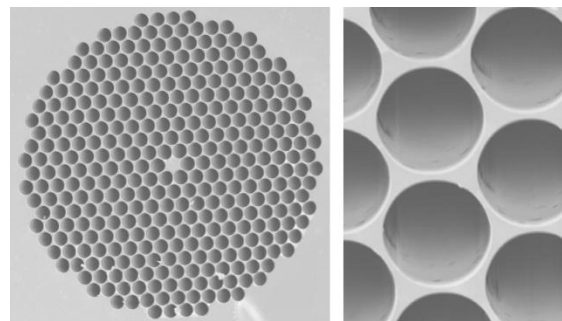
高分解能のための超広帯域プローブ光発生

○ ハイパワー発振器とフォトニックファイバーによる超広帯域光発生

Ti:Sapphire発振器(800 nm、5 MHz、最大エネルギー400 nJ)の光をフォトニックファイバーに入射し、超広帯域プローブ光(目標値: >350 nm)を発生させる実験を行っている



フォトニッククリスタルファイバー(PCF)

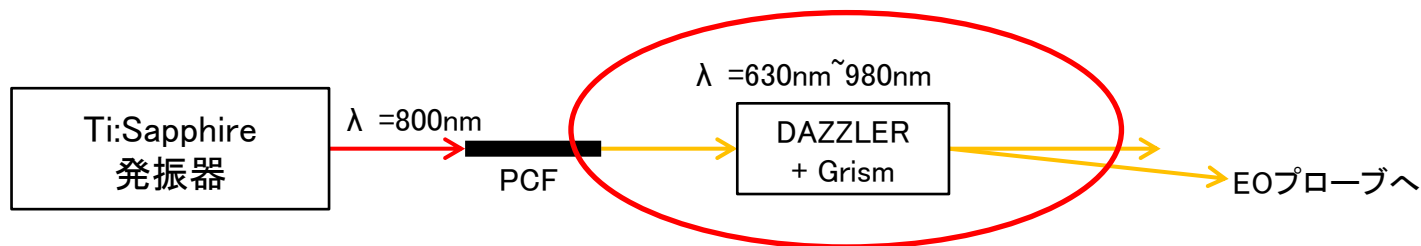


コア径5 μm
入カパワー: 100 mW

リニアチャープでフラットトップなプローブ光開発

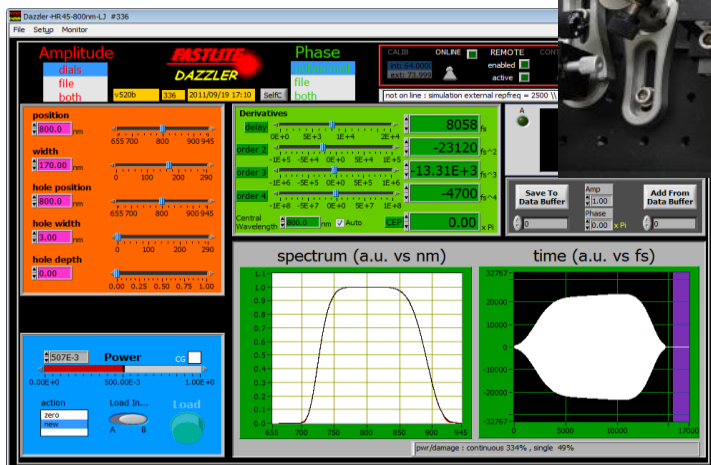
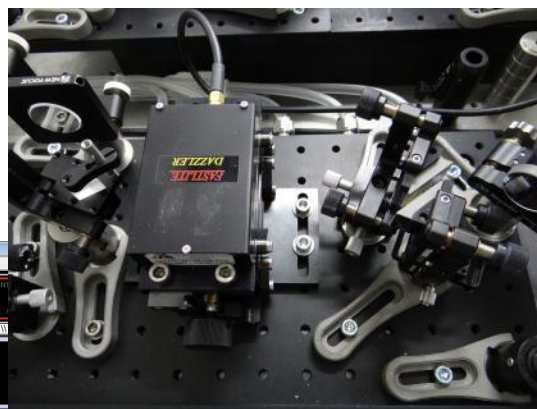
○ AO変調器とGrismによる波形整形と分散補償

フォトニックファイバーによって得られた超広帯域光を、AO変調器(DAZZLER)によって波形整形を行い、Grismを用いた分散補償でリニアなチャープにする実験も行っている

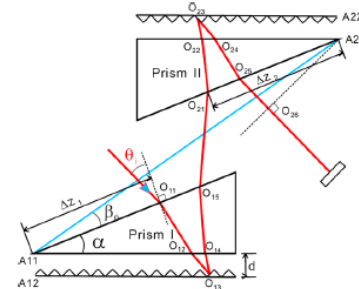


○ DAZZLER

任意の強度変調、
位相変調がかけられる

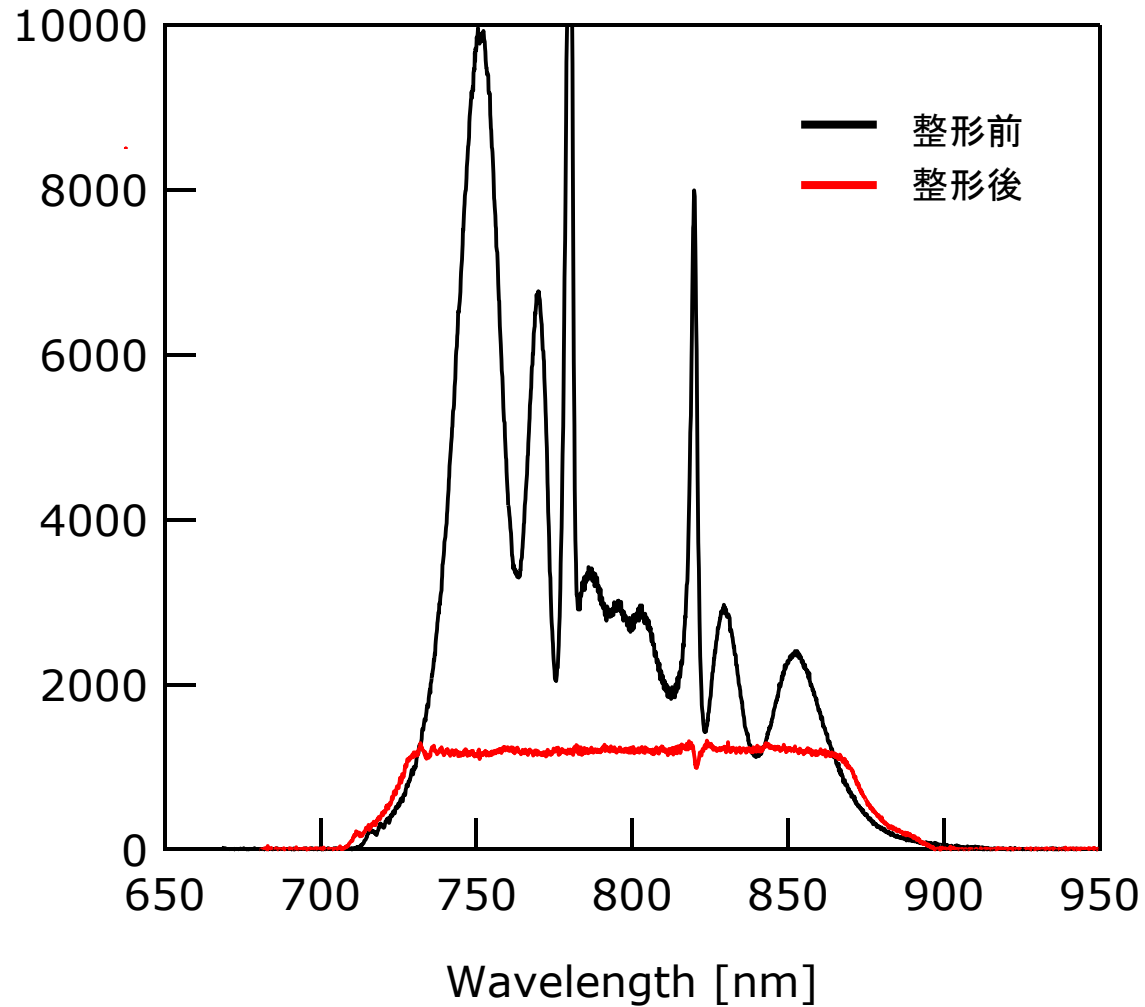


○ Grism=Grating + Prism

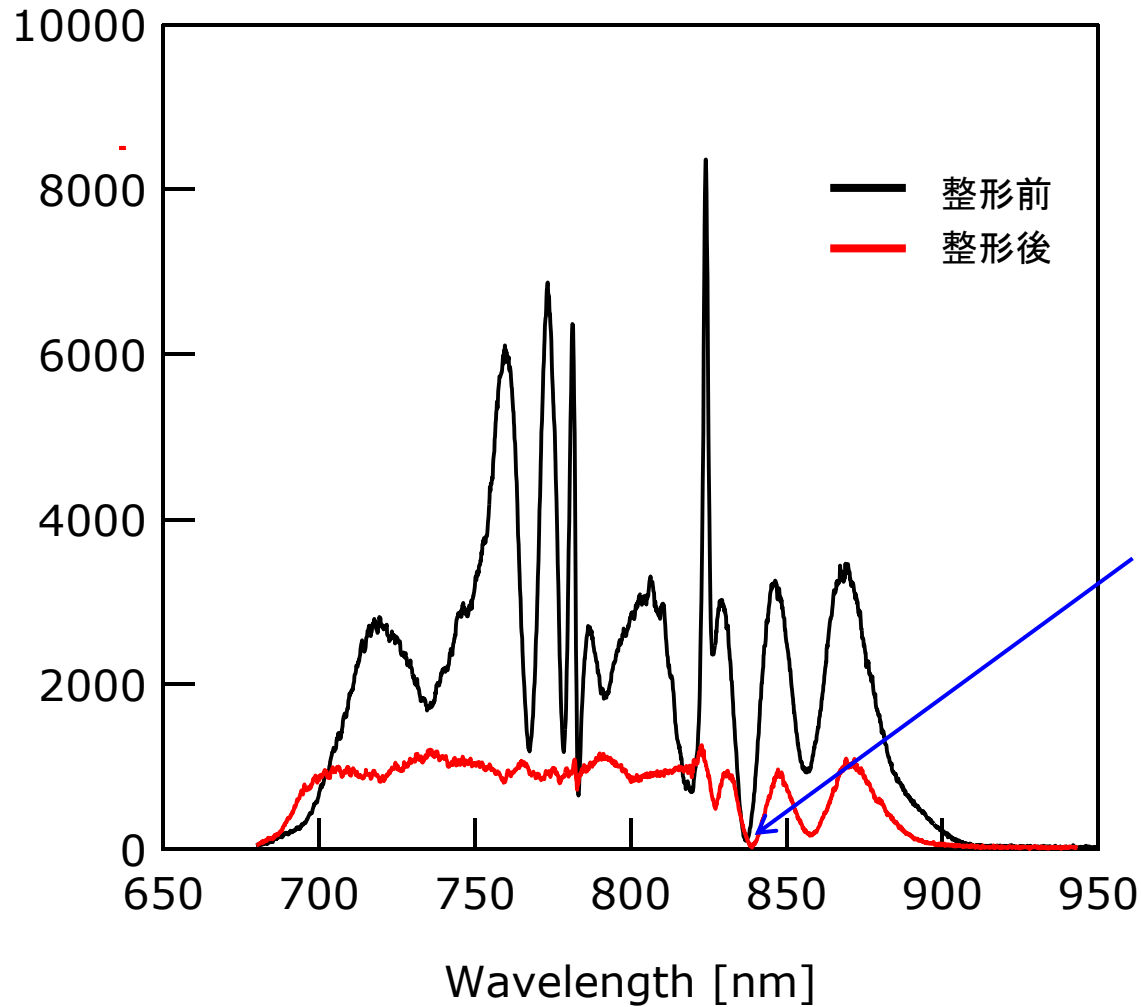


	Dispersion	GVD	TOD
Bulk glass	low	>0	>0
Prism pair	very low	<0	<0
Grating pair	high	<0	>0
Grism pair	high	<0	<0

DAZZLERによる波形整形

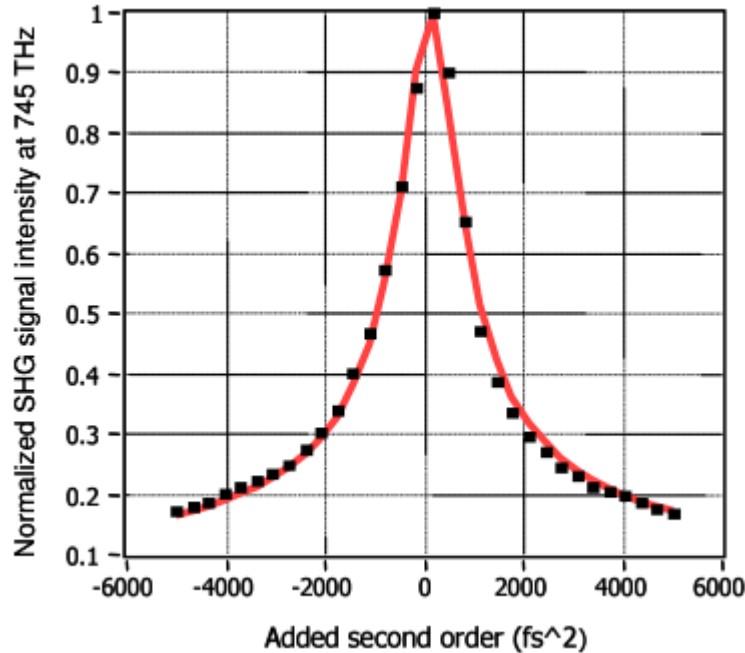


DAZZLERによる波形整形

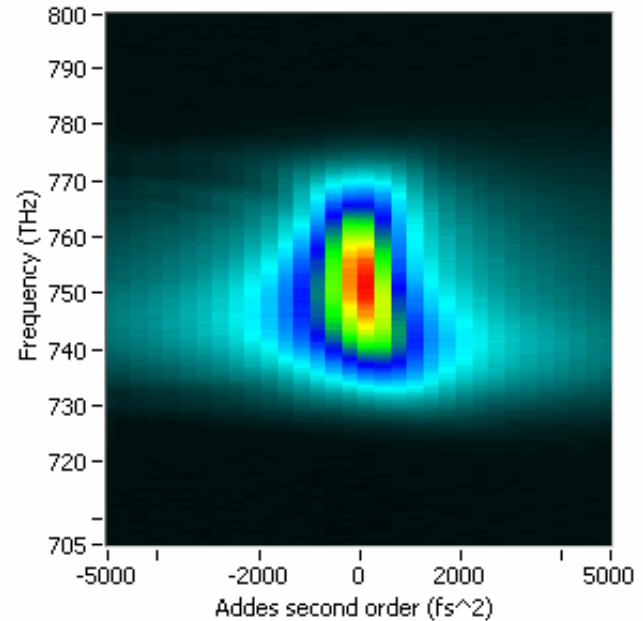


チャープスキャン法による位相計測

○ DAZZLERで2次分散をスキャンしながら、2倍高調波の強度スペクトルから位相を計測する手法



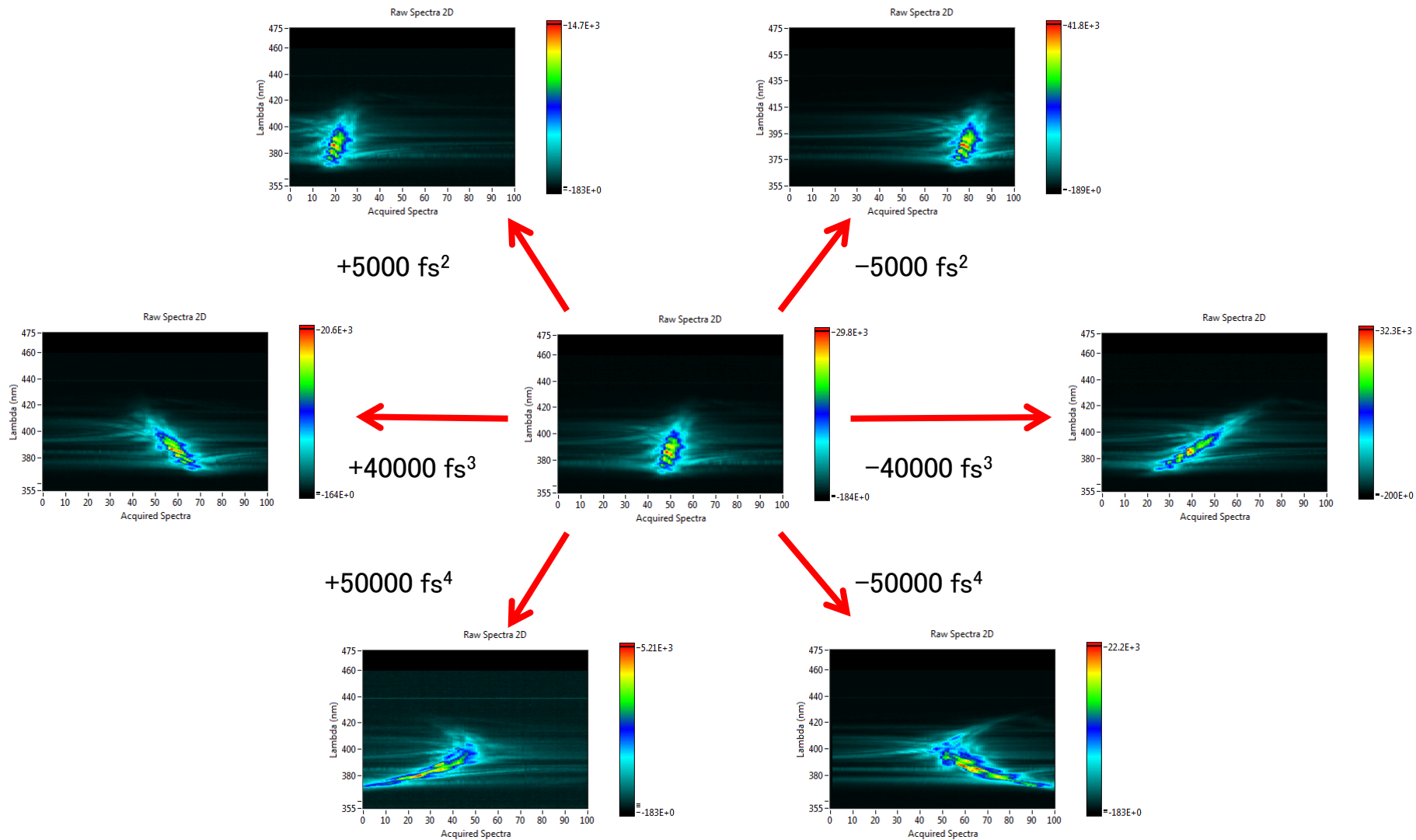
波長400 nmでのスキャン結果



波長と2次分散量の二次元データ

形状などから位相がわかる

分散ごとの位相計測結果の変化



8ch同時計測に必要なパルスエネルギー

○ 分光器 + CCD

光エネルギー: $E = h\nu = h\lambda / c$ (2.48×10^{-19} J@800 nm)

透過率: $\sim 0.075\%$

拡散板: $\sim 10\%$

スリット: $\sim 30\%$

分光器: $\sim 15\%$

CCDの量子効率: 3% (InGaAs: 600–950 nm)

CCD 1ピクセルあたりの波長: 0.66 nm

必要フォトン数: **1000**カウント以上



2.8 pJ/nm必要 → 波長帯域300 nmでは 0.8 nJ
トータル6.4 nJ (0.8 nJ x 8ch) のパルスエネルギーが必要
(円環ビームに対する開口率: 30% ~ 50%)

○ システム全体の透過率

DAZZLER: 回折効率 20%

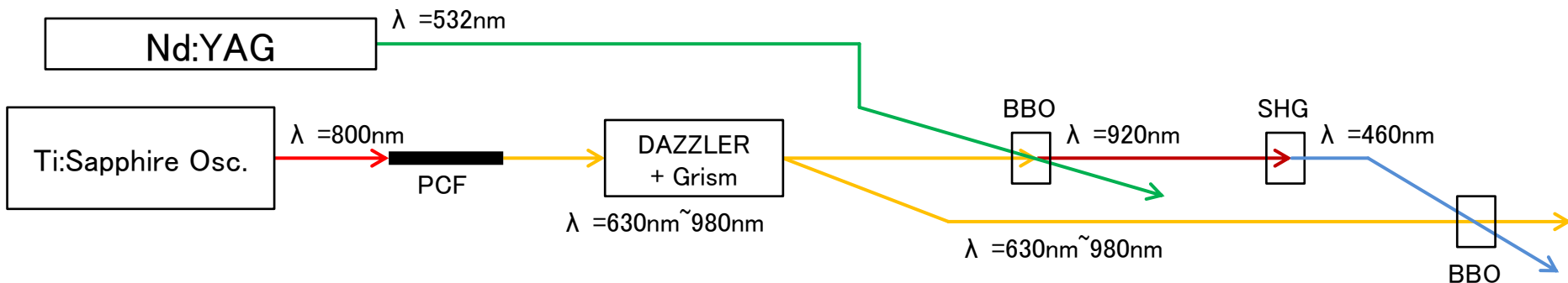
スペクトル整形効率 $> 10\%$

Grism対: 透過率 40%

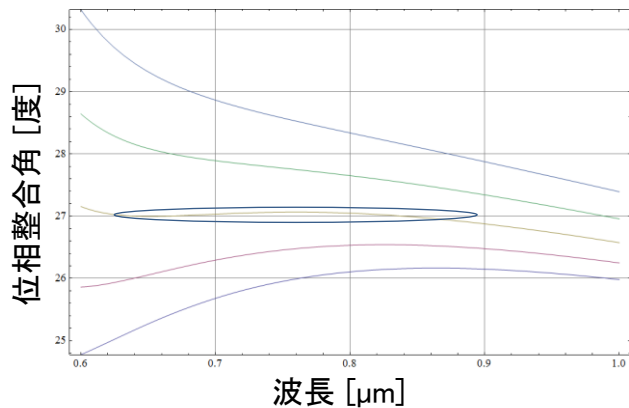
→ 2~3 μ J必要 (余裕を見て10 μ J以上)

超広帯域増幅

○ 励起光を460nmとすることで630nmからの超広帯域OPAが可能



励起光波長460nmでの位相整合条件の計算



この増幅によりスペクトルの谷を埋め、10 μJ のパルスエネルギーを得る

まとめ

○ 電子バンチを非破壊、リアルタイム、シングルショットで高分解能EOサンプリング計測を行うための技術開発を行っている

- ・試験加速器SCSSにおいて実験を行い、EO計測結果からシードのタイミングへフィードバックが可能になった。
- ・3次元EO計測のために、ファイバーバンドル分光器を用いた8ch(4ch x2)同時計測用分光システムを開発中
- ・高時間分解能のために、帯域 > 350 nmの超広帯域プローブ光を開発している。また、8ch同時計測に必要な数 μ Jのパルスエネルギーを得るための増幅システムも準備中