

「先端光源を駆使した光科学・光技術の融合展開」  
平成 20 年度採択研究代表者

辛 埴

東京大学・物性研究所・教授

高繰り返しコヒーレント軟 X 線光源の開発と光電子科学への新しい応用

## 1. 研究実施の概要

本CRESTプロジェクトの目的は、新しい高繰り返しコヒーレント軟 X 線光源の開発することと、それを用いて光電子科学への新しい応用を行うことである。光源開発を担当する小林グループは新規ファイバーレーザーの基礎を開発中である。

光電子測定を担当する辛グループは、以下の 3 点について、軟 X 線光源を用いた高いエネルギー分解能、時間分解、空間分解能を持つ光電子分光システムを開発しつつ、それを用いた物性研究にも成果を上げつつある。

- (1) H20 年度は、極低温クライオスタットを H21, 22 年度に開発するための基礎技術を開発すると同時に、超高分解能・極低温光電子分光を用いたフェルミ面付近の電子状態の研究を行う。
- (2) 時間分解光電子は、ほとんど行われていない実験である。そこで、H20 年度は、フェムト秒レーザーを用いてよく知られている光誘起現象を起こす物質群について、時間分解光電子分光を行い、時間分解光電子分光そのものが持つ問題点を明らかにした。
- (3) レーザー光電子顕微分光を行うために、既存のレーザーを用いた実験装置の開発を行った。ポッケルスセルを用い、円 2 色性を得るためのプログラムの開発を行った。標準物質を用いた実験システムの調整を行った。

一方、光源開発を担当する小林グループは、分光グループに供する光源システムの設計及び開発を行った。超高分解光電子分光には大きく二つの方向性のレーザーシステムが必要となる。超高エネルギー分解分光用には狭帯域レーザーシステム、そして、超高時間分解分光用にはフェムト秒レーザーシステムである。今年度はフェムト秒ファイバーレーザーシステムについて、下記の 2 点を行った。

- (1) 発振器、増幅器、エンハンスメント共振器など光源システム全体の設計。高平均パワー、フェムト秒レーザーシステムは非常に複雑なシステムとなる。すべてのコンポーネントは市販され

ていないため、試作研究する必要がある。これら全体の設計が出来上がった。

(2) フェムト秒システムのフロントエンドとなる Yb ファイバー発振器の開発を行った。上記システムのうち、フェムト秒モード同期ファイバー発振器を作成した。

## 2. 研究実施内容

本CRESTプロジェクトの目的は、新しい高繰り返しコヒーレント軟 X 線光源の開発することと、それを用いて光電子科学への新しい応用を行うことである。H20 年度は光源系、光電子測定系とも独自の基礎技術の開発を行った。光電子測定グループは既存光源を利用し、鉄の新規超伝導体、銅酸化物高温超伝導体を中心に成果を上げている。

光電子測定グループは、以下の研究を行った。

### (1) 極低温・高分解能光電子分光の開発とフェルミ面付近の電子状態の研究

まず、現有するヘリウム4クライオスタットを用いて最低温度 1.5K を目指して、真空中における試料冷却技術を開発する。現時点までに蓄積された真空中冷却に関する技術は他の追従を許さないものであり、輻射熱を含んだシミュレーション計算において現状の冷却性能をほぼ再現できるところまで達成している。H20 年度は熱シールドの工夫を試行錯誤で行った。光電子分光器においては分解能を律速しているスリットの改造をスウェーデンの光電子分光器会社と共同研究で行っている。

また、特に今年度発見された鉄系の新規超伝導体のフェルミ面を明瞭に観測し、そのメカニズムを解明する研究を行った。

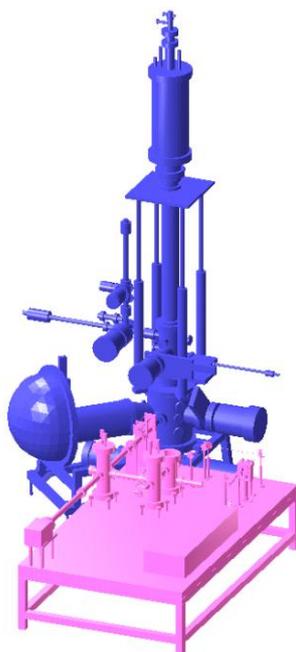


図 1 極低温・超高分解能光電子分光の開発

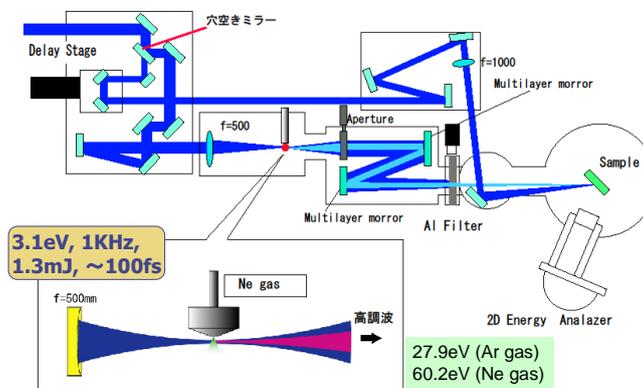


図 2 60eV レーザー光電子分光システムの開発

## (2) 時間分解光電子の開発と、光誘起現象の研究

現有する 250 kHz のチタンサファイアレーザーによる 6 eV 励起光を用い、よく知られている VO<sub>2</sub>、コバルトペロブスカイト酸化物などの光誘起相転移を調べるために時間分解光電子分光を行った。その結果、光誘起を起こす事が知られているポンプ光の閾値に達する前に大強度ポンプ光特有のバックグラウンドが生じ、目的とするフェルミ準位近傍の光電子分光を測定する事ができない事が判明した。この技術的問題点を解決するために、よりエネルギーの高い 60 eV 高調波レーザーを開発して実験を行うことにした。60eV 励起であると、フェルミ準位付近の電子の運動エネルギーが高く、6 eV 励起に比べて、バックグラウンドを著しく減少させることに成功した。現在、これらの物質において、光誘起相転移に伴う時間分解光電子分光を測定中である。60eV 励起光は分解能が悪く、精度が上がらないという欠点があるが、ポンプ光閾値が高い光誘起相転移現象(ほとんどの物質がこれに相当する)を観測する事に向いていることが判明した。今後は、物質に応じて、6eV 励起光と 60eV 励起光を使い分けることにした。

一方、Bi2212 高温超伝導体においては、弱いポンプ光を用いても光誘起現象を観測することに成功したので、6eV の励起光を用いることにより高精度の時間分解光電子を行っており、目的とする成果が得られつつある。

## (3) レーザー光電子顕微分光によるナノ構造の研究

250 kHz のチタンサファイアレーザーまたは、ファイバーレーザーと光パラメトリック増幅器(OPA)等を用い、エネルギー可変にし、物質の仕事関数すれすれの波長に合わせることで色収差を取り除き、50nm の分解能を達成するための手法を開発した。H20 年度はポッケルスセルにより、円偏光の高速切り替えを行い、精度良く円 2 色性を測定できることを明らかにした。また、高速で、切り替わる円偏光に伴う 2 色性を調べるためにプログラムの開発をおこなった。

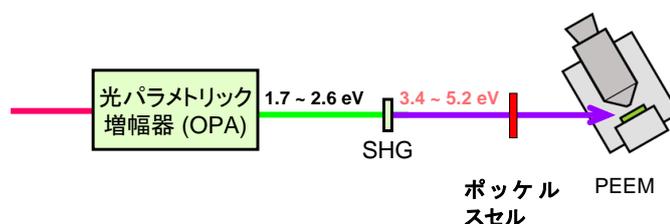


図3 レーザー光電子顕微分光の開発

一方、光源開発グループは、以下の研究を行った。

### (1) 発振器、増幅器、エンハンスメント共振器など光源システム全体の設計

光電子分光用の高繰り返し XUV 光源はファイバーレーザーベースで開発する。そのためのグランドデザインを行った。Yb ファイバーレーザーシステムはだまかに①レーザー発振器、②パルス伸長器、③増幅器、④パルス圧縮器、⑤エンハンスメント共振器から構成される(図4)。時間分解分光と高エネルギー分解分光用光源それぞれについてレーザーシステムの設計をおこなった。その結果、~100フェムト秒、~30W 程度のアンプシステムすべてのコンポーネントの設計が出来上がった。さらなるハイパワー化と、高エネルギー分解用光源の狭帯域パルスレーザーシステムについてはまだ今後の検討課題が残っている。

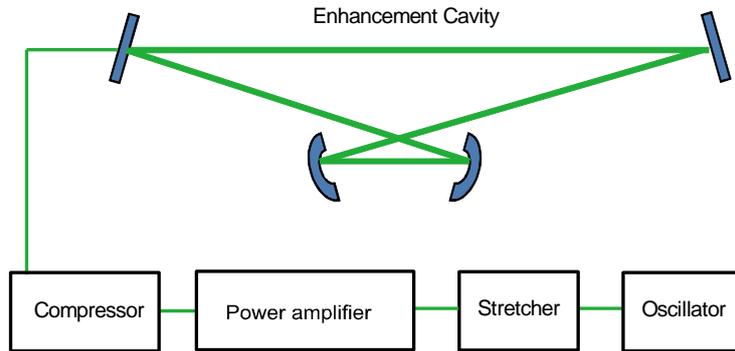


図4 フェムト秒 Yb ファイバーレーザーシステム

## (2)フェムト秒システムのフロントエンドとなる Yb ファイバー発振器の開発

フェムト秒レーザーシステムのフロントエンドには非線形偏波回転モード同期 Yb ファイバーレーザーを用いる。発振器の性能として繰り返し周波数は 50~100 MHz、パルス幅 100 fs 程度、平均パワーは 50 mW 程度を実現する、という目標のもとにレーザーを設計、作成した。レーザーの構成を図 5(左)に示す。976nm のレーザーダイオードをポンプ光として Yb がドープされたファイバーを励起する。フリースペースの部分で回折格子により分散補償をし、またファイバーに戻るリング共振器となっている。このモード同期を掛けることに成功し、図 5(右)に示すようなスペクトルが得られた。裾で 1000nm~1100nm あり、Yb ファイバーレーザーとしては市販品では得られない優れた性能を持つことが分かる。

まとめると、

- 繰り返し周波数：80 MHz
- パルス幅：<100 fs
- 平均強度：70 mW

となり、目標を達成した。ただし、パルス幅は測定してはいない。スペクトルのフーリエ変換から計算される値である。

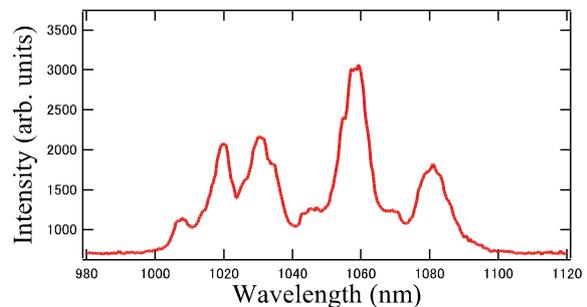
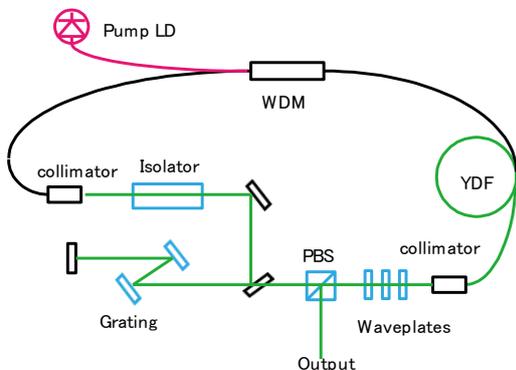


図5 左:非線形偏波回転モード同期発振器の構成図。

右:得られたモード同期パルスのスペクトル

### 3. 研究実施体制

#### (1)「辛」グループ

①研究分担グループ長:辛 埴 (東京大学、教授)

#### ②研究項目

軟X線・紫外レーザーを用いた

- (1) 究極のエネルギー分解能を持つ光電子分光によるフェルミ面付近の電子状態の研究
- (2) 究極の精度を持つ時間分解光電子による緩和現象、化学反応の研究
- (3) レーザー光電子顕微分光によるナノ構造の研究

#### (2)「小林」グループ

①研究分担グループ長:小林 洋平 (東京大学、准教授)

#### ②研究項目

- (1) 発振器、増幅器、エンハンスメント共振器など光源システム全体の設計
- (2) フェムト秒システムのフロントエンドとなる Yb ファイバー発振器の開発

### 4. 研究成果の発表等

#### (1) 論文発表 (原著論文)

1. Temperature-dependent pseudogap in the oxypnictides  $\text{LaFeAsO}_{1-x}\text{F}_x$  and  $\text{LaFePO}_{1-x}\text{F}_x$  seen via angle-integrated photoemission Y.Ishida, T.Shimajima, K.Ishizaka, T.Kiss, M.Okawa, T.Togashi, S.Watanabe, X.Y.Wang, C.T.Chen, Y.Kamihara, M.Hirano, H.Hosono, S.Shin Phys. Rev. B **79** (2009) 060503-060506.

#### (2) 特許出願

平成 20 年度 国内特許出願件数 : 0 件 (CREST 研究期間累積件数 : 0 件)