

## 研究課題別中間評価結果

1. 研究課題名：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

2. 研究代表者：辛 埴（国立大学法人 東京大学物性研究所・教授）

### 3. 研究概要

本研究目的は、新しい高繰り返しコヒーレント軟 X 線光源を開発することと、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。MHz 以上の高繰り返しを可能にする Yb ファイバーレーザーの特性を最大限に生かし、物性研究に適したピコ秒からフェムト秒までの軟 X 線コヒーレント光源を開発する。一方、光電子分光が軟 X 線以上の高エネルギー光にのみ可能な物性実験であることに着目し、レーザーと光電子科学の両者を結びつけた新しい光科学を目指す。本研究では究極のエネルギー分解、時間分解を追求し、世界最高の性能とそれを用いた新しい物性研究の開発を行う。

これまでに、7eV 準 CW レーザーを用いて、超高分解能光電子の分解能は設計通りの  $70 \mu\text{eV}$  を達成することができた。温度も設計通りの 1.5K を達成することができた。本装置を用いて新規鉄超伝導体の超伝導ギャップを観測し、超伝導メカニズムに関する新たな発見を行った。また、時間分解光電子分光に関しては、グラフィットの測定に成功し、Ultrafast Boosting という新しい効果が存在することを発見した。更に、近藤半導体 YbB<sub>12</sub> の時間分解光電子分光に成功し、ギャップが開くことにより、寿命が延びることを発見した。

高エネルギー分解光電子分光および高時間分解光電子分光用それぞれのレーザー開発も行った。前者についてはエネルギー幅が狭い真空紫外光が必要である。計画にはなかった KBBF という真空紫外まで波長変換ができる非線形結晶を使う機会に恵まれ、急きよこの結晶を用いた未踏の 8eV 狭線幅レーザー光の開発に取り組んだ結果、153nm (8eV) のコヒーレント光を発生させることに成功した。後者についてはフェムト秒パルス列を外部共振器に高効率に閉じ込めることにより内部パワーで 2kW を達成し、7 次高調波発生でサブマイクロワットを得ている。

本研究成果はこれまでの物性研究を一変させるほどの極めて重要な実験手段を与える。今後はこれらの光源の改良を進めるとともに、高分解能光電子分光を用いた超伝導の研究や、時間分解光電子による強相関物質や半導体の光励起緩和過程や化学反応・触媒機能の研究を積極的に行い、物性研究においても更なる成果を上げている。

### 4. 中間評価結果

#### 4-1. 研究の進捗状況及び研究成果の現状

ファイバーレーザーの開発と KBBF 結晶の組み合わせによって固体結晶を用いた波長変換では世界最短の 8 eV の準 CW ピコ秒レーザー光の開発に成功したこと、光電子分光でエネルギー分解能  $70 \mu\text{eV}$ 、試料温度 1.5 K の極低温での実験を実現したこと、光電子分光装置の周辺機器を改良し、従来より 1 桁高いエネルギー分解能を実現したこと、この手法を鉄系超伝導系に応用し、電子軌道由来の新しい超伝導機構を見出したことなど、方法論的にも応用面でも今後の発展を期待させる非常にインパクトがある成果といえる。100W クラスのピコ秒レーザーも完成しており、8eV 励起による全てのブリルアンゾーン観測が、近い将来実現できると期待できる。当初計画で、かなり意欲的な数値目標を提示していたが、その線にそって着々と進捗している。このように、最先端レーザー技術と、最先端光電子分光技術を融合させ、軟 X 線領域のレーザー光源をもちいて高分解能光電子分光計測を成功させたことは、期待通りの好ましい展開である。最先端の光源開発により光電子分光研究において世界トップの地位に達しつつある。

計画の初期の段階で気体による高調波発生が困難であることが分かり、固体結晶による高調波発生に計画変更となったが、測定に必要な出力が得られ、かつ安定性にも優れており、この方針変更は良い判断であった。光電子の高分解能化が達成されたことにより、研究対象として、超伝導材料のみならず、重い電子、スピントロニクスなどの広い分野の物性研究が追加されたことは、望ましい展開である。光電子分光の専門家とレーザー光源の専門家グループがそれぞれ計画以上の成果を達成しており、同一研究所内で相互の連携も良くなされている。研究チームとして研究代表者・共同研究者の連名で多数の論文発表・学会発表を行っており、インパクトの高いジャーナルへの論文発表等も高く評価できる。

#### 4-2. 今後の研究に向けて

KBBF の利用によって世界に先駆けて 8 eV の光源が実現したことは、ブリルアンゾーン全体を観測できるという意味で、光電子分光では極めて有利な手法であり、要となる KBBF 素子の開発研究が今後重要となる。さらに、これからの挑戦は、高エネルギーで大強度の安定なレーザー光源を開発することにあるように思われる。プロジェクトの期間内に、光源グループが開発したレーザー光源を光電子分光グループが開発した高分解の光電子分光装置に効果的に組み込み、世界的に他の追随を許さない光電子分光装置を完成し、物性研究で画期的なデータが得られることを期待する。高分解能光電子分光、時間分解光電子分光、顕微光電子分光などが自由に行える装置の利点を生かして、超伝導系、強相関係物質の諸現象解明、また、半導体の励起・緩和過程の解明など幅広い応用が考えられる。

#### 4-3. 総合的評価

光電子分光は物性研究にとっては基本的かつ重要なツールであり、そのエネルギー分解能、空間分解能、時間分解能の 3 方向に向けて、先端的なレーザーを開発する研究者と、高分解能光電子分光計測を得意とする研究者が連携して、世界的にもその性能を誇ることができる光電子分光計測システムを構築したことは高く評価できる。また、レーザー光電子分光の弱点であった励起エネルギーの高エネルギー化においても世界に先駆けて成功しており、これを用いた応用研究も目覚ましいものがある。インパクトの高いジャーナルへの論文発表等の努力も大いに評価できる。

今後、この計測システムを用いた物性研究の展開が大いに期待される。測定システムの実用化に向けた展開も期待できるので、知財の取得なども研究活動の一環として位置づけることを期待する。