

## 研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名 「光・電子波束エンジニアリング」
2. 研究代表者名及び主たる研究参加者名（研究機関名・職名は研究参加期間終了時点）

研究代表者 覧具 博義（東京農工大学 工学部物理システム工学科 教授）

主たる共同研究者

三沢 和彦（東京農工大学 工学部物理システム工学科 助教授）

浅川 潔（フェムト秒テクノロジー研究機構 グループリーダー）

西 研一（日本電気(株) システムデバイス研究所 部長）

佐藤 幸紀（東北大学 名誉教授）

上田 潔（東北大学 多元物質科学研究所 教授）

大森 賢治（自然科学研究機構 分子科学研究所 教授）

3. 研究内容及び成果

本プロジェクトは、超短光パルスの内部位相を任意に制御して、フォトリソの超高速性をより多様に展開する新しい技術のコンセプト「波束制御エンジニアリング」を提唱し、その実現を目指した。特に、内部位相を制御することによって単一光パルスに複数ビットの情報を担わせる自由度の高い新しい光情報伝送方式の可能性を探索した。具体的には、光パルスと媒質のコヒーレント相互作用を通じて量子波束を励起する過程を通じて光パルス内部位相の記憶・検出・制御などの機能を実証することを目指した。

位相制御光源・位相検出分光などの要素技術の開発、および凝集系と気相における量子波束形成・制御の実証にわたる研究成果は以下に要約される。

なお、プロジェクト期間中に6件の特許出願を行い、うち2件は既に成立している。

- 1) 位相制御光源システムおよびデバイス（農工大 G）

フェムト秒パルスレーザー光源に、位相変調器、位相解析器を組み合わせたフィードバック制御システムにより、0.8  $\mu\text{m}$  帯、および 1.1 ~ 1.6  $\mu\text{m}$  帯可変波長フェムト秒位相制御光源システムを開発し安定なルーティン稼働を実現した。任意の位相プロファイルを付加できるプログラマブル性が特徴である。特に波長可変位相制御光源は、化学・バイオの領域からも強い関心を集めている。

また、応用上重要なチャープ制御に特化した位相制御器として、コンパクトで光学損傷しきい値が高いチャープ可変デバイスを開発し特許を取得した。安定でシステムの大幅な小型化を可能にするため、複数の外部機関の依頼で協同研究に供している。

- 2) 光位相検出分光法の開発（農工大 G）

超短光パルスと媒質との相互作用により生じる光パルス内の非線形位相シフトを波長分解かつフェムト秒域時間分解で測定する偏光分割フェムト秒サニャック型干渉計を開発し特許を取得した。高安定で、従来方式に較べて $10^4$ 倍の大幅な感度向上を達成したほか、この分野の装置として異例のコンパクト性と可搬性を実現した。これをキーデバイスとした極限的フォトリソ量子制御の協同研究が開始されている。

従来の光パルス位相検出方式は、複数パルスについて平均化された位相しか検出できないが、時系列でランダムな位相情報を持つパルス列からの検出には、単一パルスの位相測定が必須である。そこで、スペクトル領域干渉計とストリークカメラを組み合わせ、フェムト秒光パルスの GHz レベルの高速繰り返し動作単一ショット位相検出方式を初めて実現した。

- 3) 波束励起のための半導体ナノ構造（農工大 G + NEC・FESTA G）

量子波束の形成のためには、単一準位から複数準位への、波動関数の重ね合わせ状態の励起が必要である。単純な量子井戸構造のバンド間遷移選択則を改変して多準位励起を可能にする非対称階段型量子井戸（Asymmetric Stepped Quantum Well: ASQW）構造を提案・試作し、変調反射分光測定により意図した選択則改変を確認した。この ASQW 構造は高効率テラヘルツ波発生などへの応用も期待される。

また、チャープパルスによる多準位系励起の理論解析により、励起がチャープの方向と大きさに

強く依存する現象を見だし、ASQW によるチャープ検出の可能性を示した。

#### 4) 凝縮系媒質における量子波束の誘起と検出(農工大 G)

チャープ制御パルスを生アニン色素分子に照射してその蛍光強度のチャープの方向および大きさへの依存性を見出した。この、光パルスの位相情報を蛍光の振幅に変換する「振幅位相変換機能」のダイナミクスを理論解析により説明した。

量子波束の時間発展を完全に可視化すれば、位相制御光パルスで媒質中に書き込んだ情報を最大限抽出できる。そこで、量子波束の振幅・位相情報を直接読み出すラピッドスキャン型分光測光装置 (Rapid-scanning multi-channel spectrometer; RSMCS) を開発し、生アニン色素分子 DTTCl における量子波束の実時間観測に成功した。ポテンシャル中を往復する量子波束を時分解かつエネルギー分解で可視化したもので、凝集系での実証は世界で初めてである。これは、本プロジェクトの中心課題である「波束制御エンジニアリング」の可能性を実証したもので、また、開発した RSMCS は、今後の量子波束研究を大きく加速するものと期待される。

#### 5) 分子気体における核波束のコヒーレント制御 (東北大 G)

二連光パルス間の遅延時間をアト秒レベルの前例のない高精度で制御する精密光干渉装置 (アト秒位相制御装置; APM) を実現した。この二連パルスを HgAr 分子に照射して、二つのパルスが励起する分子核波束の間でコントラストほぼ 100% の物質波干渉を観測した。これは、光位相による分子核波束の精密制御を実現したもので、分子の光位相量子メモリー機能の原理実証でもある。この成果は、多数分子のアンサンブルに対して高コントラストの量子干渉を実現した点で、国内外で高く評価されている。さらに、 $I_2$  分子を用いて、分子波束の生成制御過程の実時間観測にも成功した。

また、強いレーザーパルスによる多光子イオン化によって希薄気体中の原子から放出される“光電子波束”の位相制御を追求した。位相制御光源からの二連パルスを Xe 原子気体流に集光し、Xe 原子の 5 光子イオン化によって放出される光電子強度の位相変調を観測し、位相制御光源が持つ位相特性が、光電子波束の位相特性に鋭敏に反映されることを示した。これは、光位相を伝達・中継する媒体として光電子を利用する技術や高次非線形過程を用いた新たな光源 (例えば超短パルス光源や軟 X 線光源) への展開が見込まれる。

### 4. 事後評価結果

4 - 1. 外部発表(論文、口頭発表等)、特許、研究を通じての新たな知見の取得等の研究成果の状況  
論文発表は英文 34 件、和文 7 件、口頭発表(ポスター発表含む)は国際会議 43 件、国内会議 55 件、そのうち招待されたものが夫々 18 件、2 件、特許出願は国内 6 件、海外 2 件など国際的評価の高い学会誌や国際会議に多くの優れた研究成果が発表されており、下記は其中でも特筆すべきもので、いずれも世界で初めて報告された独創的な成果である。

- 位相制御フェムト秒光パルス光源、位相制御デバイスの実現
- フェムト秒光位相検出分光技術の確立
- 独自の半導体ナノ構造の設計、製作、評価
- 凝集系での量子波束の生成、検出
- アト秒精度の分子核波束の生成、制御、検出
- 分子の内部量子状態を用いた光位相敏感メモリーの提案と実証

#### 4 - 2. 成果の戦略目標・科学技術への貢献

波束制御エンジニアリングとして光波の位相制御を行い、その位相情報を物質内の量子波束に転写し、それを読み出す実験に成功し、当初の研究構想を満足するものである。本研究の遂行に関連し、光の位相制御、検出に関する実用的な装置を考案試作し、他研究チームにも提供したこと、アト秒精度での分子波束の生成、制御・検出を行い、振動固有状態間に生ずる Ramsey 振動の位相のずれを観測したこと、光位相による光電子波束の制御において、4 次、5 次の interferogram を初めて観測したことは当初の期待以上の成果である。

波束制御エンジニアリング、即ち光波の位相制御をし、この物質内の量子波束に転写し、またこれを読み出すという基本概念自身が特許出願されていることから明らかなように、本チームの独

創によるものであり、科学的、技術的インパクトは大きい。又、それと共に実用的なチャープ可変装置、偏光分割サニャック干渉計、ラピッドスキャン型マルチチャンネル波束測定装置を考案、完成した技術的インパクトは大きい。更に物質内の量子波束を利用した光位相敏感メモリーの発展も期待できる。

#### 4 - 3 . その他の特記事項

超短光パルスに位相情報を書き込み、その光パルスをパケットとして通信に使うというアイデアは独創的、挑戦的で高く評価できる。位相制御パルス光源と位相検出分光について原理実証に成功し、さらに凝縮系と希薄分子系において光パルス位相の転写と波束の観測に成功した。また研究の過程でフェムト秒位相制御光源、チャープ位相制御素子、高精度のサニャック干渉計など画期的な技術を開発し、特許を積極的に出願した。これらの成果はいくつもの他研究グループに大いに活用されている。このように、当プロジェクトは光・電子波束の位相を制御するという所期の目的を原理レベルでは十分に達成したといえる。