

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 時空間モルフォロジーの制御による能動メゾ光学

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

五神 真 (東京大学大学院理学系研究科 教授)

主たる共同研究者

三沢 和彦 (東京農工大学工学研究院・先端物理工学部門 教授) (平成 18 年 10 月～平成 24 年 3 月)

3. 研究実施概要

レーザーの発明から半世紀が経過した現在、レーザー技術の発展はより加速しており、学術分野だけでなく様々な場面で人類社会を支える基盤技術となっている。超高速大容量の光伝送通信技術や GPS の高度化など、光科学技術のさらなる発展への期待はますます高まっている。近年の光科学技術の革新の原動力は、レーザー光を光波としてとらえ、その振幅や位相を完全に制御する技術が確立したことである。光はベクトル波であり、位相、振幅以外にも偏光という自由度をもつ。これらの光の全自由度を自在に制御する技術をさらに追求し、物質と光の潜在力を引き出すことが求められている。本研究では、偏光自由度に加えて光の波長と同程度のモルフォロジーに着眼し、それらをダイナミックに制御することで、物質が光に対して鋭敏に応答しさらにそれを光の状態変化につなげる仕組みを創出することを目指すものである。

東大グループは、電子励起状態の分光研究や微小球による光閉じ込め、人工キラル構造による光波制御などで実績を上げてきた。一方、農工大グループは、極超短パルスを精緻に制御する技術の研究で世界をリードしてきた。本研究では、両グループの連携でこれらを融合させ、時間軸と空間軸の両方で同時に制御された光を用いて物質の励起状態を巧みに制御して新現象を発現させると共に、波長以下の特異構造を動的に制御することによって新しい光機能を引き出す、“能動メゾ光学”を開拓することを目指した。これによって、光と物質の基礎科学を深化させ、新たな光技術・光物性研究の突破口を見いだすことを狙った。研究の遂行にあたっては、以下の研究項目を設定し、相互に連携させながら進めた。個々の項目と本研究の成果をまとめると以下のとおりである。

・東大グループ

I.モルフォロジー制御による光機能発現

金属キラルナノ格子巨大旋光性の発現機構の解明、誘電体導波路上人工キラルナノ格子における巨大旋光性の観測、金属人工キラル構造によるテラヘルツ(THz)旋光性の発現、光励起キャリアによる THz 領域の三次元キラリティーの創成、半導体キラルナノ周期構造による円偏光放射制御の実現、結合ファブリーペロー共振器構造を用いた反強磁性からの磁気放射制御

II.巨大光応答物質相の探索

位相制御パルスによる極低温励起子の選択的生成、サブケルビン下での励起子 BEC 転移の観測、フェムト秒モード同期ファイバーレーザーの製作、角運動量保存則の観点に基づく光誘起磁化の新しい選択則の発見、反強磁性中における光を用いた磁化の THz ベクトル制御の実現

・農工大グループ

III.時空間波形制御技術の開拓

パルス光波の振幅・位相・偏光の完全制御技術の確立とねじれ偏光パルスの実現、広帯域光位相変調技術を用いた CARS 散乱分光の高感度化と生体内分子検出への応用、

IV.能動的三次元時空間制御造形法の開拓

位相制御パルスを用いた振動モードの選択的励起による光異性化ダイナミクスの制御、高速高感度時間分解エリプソメリー測定系の開発

・東大農工大連携課題

光励起キャリア擬2次元人工キラル格子の形成とテラヘルツ偏光制御の実現

ねじれ偏光パルス励起による結晶内分極の任意ベクトル制御の実現

本研究においては、両グループ連携のシナジー効果が如何なく発揮された。東大グループにおける位相制御パルスによる極低温励起子の選択的生成の成功や、自作フェムト秒ファイバーレーザーの着手には、農工大グループの技術的支援が不可欠であった。その一方で、農工大グループの先端光源の長所を最大限に引き出す物質系の選定には、東大グループから効果的なアドバイスを与えることができた。その過程で培われた強力な連携体制の下で、本 CREST 期間中に各グループによって達成された「光を用いた磁化のベクトル的制御(東大)」と「ねじれ偏光パルスの実現(農工大)」を直接的に組み合わせる実験を成功させることができた。この際には、農工大で開発した波形制御ユニットを東大のラボに持ち込んで両グループの大学院生が共同で実験を行った。情報共用のみならず、装置、人の交流も含めた強力な連携体制が、数々の研究成果の創出につながったものである。

本 CREST 研究を通じて、位相、振幅、偏光という光の全自由度を自在に制御する技術、によって、これまでにない新たな物質の潜在的な能力を引き出すことが可能であることが実際に示された。従来の物性研究においてレーザーは、ユーザーとしての立場でもっぱら利用するだけのことが多かったが、本研究を通じてその技術開発に自ら切り込むことができるようになったことは大きな成果である。これを契機として、光源研究の研究者と一体となった光科学の研究を推進することに積極的に取り組んでいる。

4. 事後評価結果

4-1. 研究の達成状況及び得られた研究成果(論文・口頭発表等の外部発表、特許の取得状況等を含む)

本研究は、空間的・時間的に光を自在に制御し、光と物質の相互作用を巨大化する、あるいは波長以下のスケールで形態を制御して巨大な光機能を発現する「能動メゾ光学」の実現を目指すもので、極めて挑戦的な研究課題である。得られた主な成果は次のとおり。

[モルフォロジー制御による光機能発現]

人工キラル構造では、金属キラル格子の巨大な旋光性のメカニズムを解明、これが表面プラズモンとの結合に起因することを明らかにした。また、誘電体キラル(キラルナノフォトニック結晶構造)においても導波路共鳴の効果によって巨大な旋光性を見出した。さらに、半導体キラルでは円偏光の発光を観測、SLMに光励起キラルを書き込みTHz波を偏光するなど、人工キラルを用いて、モルフォロジー制御による光機能発現(形態に依存する光学応答)を実証した。

また、極低温における励起子の高密度化(BEC)については、BEC臨界粒子数を超えるとパラ励起子の緩和爆発が起こることを観測した。

光と物質の相互作用を巨大化する物質相の探索については、チタンサファイアレーザー再生増幅器の3倍高調波を用いた二光子励起法により、結晶中におけるポリ励起子束縛状態からの発光を観測した。

[時空間光波束操作]

新たに 3 次元時空間制御された光パルス光源を開発した。これはマッハツエンダー干渉計とパルス整形器を組み合わせたもので、直交偏光成分を独立に振幅・位相変調できる。実験では、周波数の異なる左右円偏光を重ね合わせて「ねじれ偏光パルス」の発生に成功した。ねじれのピッチは左右円偏光の周波数差で決まり、これは正に光軸に沿って空間的かつ時間的に制御された光パルスである。このねじれパルスをCARS励起光に利用している。

本研究は、一見難解な研究課題であるが極めて挑戦的であり、一つ一つの課題を具体的な物理現象に対応させ、問題の本質に迫り、巨大な光機能発現や光と物質の相互作用の巨大化などについて具体的に重要な知見を引き出している。ねじれ偏光パルス発生についても、3次元空間で時間的に光の振幅、位相を自在に制御する新技術であり、全く独創的な多波長光源である。

発表論文数は必ずしも多くはないが、Nature Commun.や Phys. Rev. Letter などの評価の高い雑誌に、主要論文を公表している。更に、国際会議でも多くの招待講演をおこなっていることなどから、質の点で

評価できるものといえる

4-2. 研究成果の科学技術や社会へのインパクト、戦略目標への貢献

励起子 BEC の研究は、それが確定されれば、間違いなく重要な研究であり、科学への貢献度は高い。また、時空間制御光パルスによる物質制御技術は、技術そのものは世界初というわけではないが、それを具体化し、なおかつ、簡便で使いやすい光源に仕上げた手腕は高く評価できる。今後、それらが生体物理や医療分野に応用できれば、社会・科学技術への貢献度は高いものになるであろう。キラル構造誘起については、光誘起キャリアで旋光性が誘起できることを確証した点で貢献があった。ただし、その結果、サイズのサブミリメートルサイズとなっており、具体的に光学領域に応用することは難しい。最近、多層ナノ構造間の電界成分結合により、キラル特性が誘起されることが知られるようになり、新しい研究が始められている。原理的には同様のプラズモン作用とされており、本研究がそれらの端緒となったとすれば、それも大きな貢献といえよう。

4-3. 総合的評価

独創的な研究が実施され、学術的、技術的インパクトの高い成果が多数得られており、社会的インパクトも期待できる。亜酸化銅における $1s$ オルソ励起子系において、励起子を低温のまま生成できることを実証したこと、左右の振動モードが縮退した磁気共鳴を選択的に励起し、テラヘルツ円偏光放射としての検出に成功したこと、直交する二つの偏光成分をそれぞれ波形整形した後に干渉させ、任意の偏光状態を有するパルス波の生成に成功したことなど、物理学の分野に貢献する顕著な成果を得ている。