

戦略的国際科学技術協力推進事業（日本ードイツ 研究交流）

1. 研究課題名：「近接場光相互作用を介した光励起移動の探求：デバイスと評価」
2. 研究期間：平成20年10月～平成24年3月
3. 支援額： 総額 18,993,700 円
4. 主な参加研究者名：

日本側（研究代表者を含め6名までを記載）

|              | 氏名   | 所属                 | 役職    |
|--------------|------|--------------------|-------|
| 研究代表者        | 大津元一 | 東京大学大学院工学系研究科      | 教授    |
| 研究者          | 小林潔  | 山梨大学大学院医学工学総合研究部   | 教授    |
| 研究者          | 八井崇  | 東京大学大学院工学系研究科      | 准教授   |
| 研究者          | 成瀬誠  | 情報通信研究機構光ネットワーク研究所 | 主任研究員 |
| 研究者          | 川添忠  | 東京大学大学院工学系研究科      | 特任研究員 |
| 研究者          | 野村航  | 東京大学大学院工学系研究科      | 特任研究員 |
| 参加研究者 のべ 8 名 |      |                    |       |

ドイツ側（研究代表者を含め6名までを記載）

|              | 氏名               | 所属   | 役職                |
|--------------|------------------|--|-------------------|
| 研究代表者        | Christoph Lienau | Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, Institut für Physik    | Professor         |
| 研究者          | Painda Vasa      | Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, Institut für Physik    | Humboldt Fellow   |
| 研究者          | Joanna Kolny     | Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, Institut für Physik    | Junior-Professor  |
| 研究者          | Leonid Govor     | Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, Institut für Physik    | Senior Researcher |
| 研究者          | Eric Runge       | Technische Universität Ilmenau, Institut für Theoretische Physik | Professor         |
| 参加研究者 のべ 5 名 |                  |  |                   |

5. 研究・交流の目的

本研究交流はナノ領域での近接場光相互作用の理解をさらに深め、光励起移動の詳細解明を目的とする。

具体的には、日本側の近接場光相互作用を介した光励起移動の理論ならびにデバイス・材料作製技術と、ドイツ側のナノ領域での光物質相互作用に関する素過程の理論および超高速分光分析に代表される分析技術を組み合わせ、ナノ領域における光励起移動の理解をさらに深めるとともに、光励起移動の素過程を実験的に明らかにする。

本共同研究で日独が交流を通じて相互的に取り組むことで、光デバイスや光システムの

微細化や機能化などの革新に結び付き、ひいてはさまざまな産業並びに社会に貢献することが期待される。

## 6. 研究・交流の成果

### 6-1 研究の成果

本研究成果としては以下のものがあげられる。

#### (1) 積層量子ドットにおける光移送励起輸送の効率向上

積層量子ドットにおける光励起輸送において近接場光相互作用のネットワークの概念を導入することにより効率の高い光励起輸送が生じることを明らかにした。近接場光相互作用を考慮した理論計算により、実験と良い一致を示す結果を得た。さらに、量子ドットのネットワーク構造を制御することによりさらなる発光効率の向上が可能であることを示した。

#### (2) ランダムに配置された量子ドット群における長距離光励起移動

CdSe/ZnS コアシェル量子ドットをランダムに配置し光励起輸送路を作製した。量子ドット間の共鳴励起準位を介した近接場光相互作用を利用することにより、輸送距離  $4.7\mu\text{m}$  の長距離において光励起輸送を伝搬光に変換し出力信号として取り出すことに成功した。

#### (3) 干渉オートコリレーション (IFRAC) 顕微鏡法による ZnO 薄膜における非線形光学特性の測定

ZnO 薄膜における非線形光学特性を干渉オートコリレーション (IFRAC) 顕微鏡法により測定した。 $1\mu\text{m}$  のスポットに集光された波長  $800\text{nm}$  のバンドギャップ以下の光による超高速励起 (6fs) と干渉フリンジの波長依存性の解析によりこれらの発光がそれぞれコヒーレントな第 2 高調波放出によるものと、インコヒーレントな多光子誘起フォトルミネッセンスによるものであることを明らかにした。

#### (4) ZnO ナノニードルにおける光の局在の観測

ZnO ナノニードルにおける光の局在を第 2 高調波顕微鏡法により観測した。ZnO ナノニードルは空間分布に無秩序性があるため光の局在が確認された。さらにシミュレーション計算からも局在性が裏付けられた。さらにナノロッドの直径を変更することで、局在性を強めることができた。

これらの研究成果は、日本側が有していた近接場光相互作用の理論及び材料技術と、ドイツ側のナノ領域での光物質相互作用に関する素過程の理論及び超高速分光分析技術の協同により初めて達成することができた内容である。さらに、日本側にとっては従来測定できていなかった特性が、ドイツ側の測定技術により明らかになり材料・構造ならびにナノ領域での光過程に関する理解を深めることができ、一方、ドイツ側にとっては、日本側から供給された優れた試料を用いることにより新測定手法の確立及びナノ領域における光過程の観測を明確に実現することができた。以上の研究成果は Nature Photonics や Physical Review などのハイインパクトジャーナルでの掲載に至ることができた。

なお、本研究で対象としてきた近接場光相互作用を介した光励起移動や光の局在過程はナノ物質間の近接場光相互作用に基づく。本研究で明らかになった理論及び実験的結果はナノフォトニクスにおける基礎・基盤の内容であるとともに、光エネルギーの効率的な収集等の観点から環境エネルギーなどの具体的応用や社会貢献に向けて重要な基礎的知見を提供する内容でもある。

### 6-2 人的交流の成果

研究交流は毎年 1 回、日本またはドイツにて参加研究者全体が集う共同研究全体会合を開催し、双方の研究進捗・研究成果を報告するとともに今後の方針についてディスカッションを行った。全員が一堂に会することにより共同研究の円滑な運営・推進を図った。また、必要に応じて研究者個人単位で各研究機関を訪問し打ち合わせの機会を設けた。これにより研究実施者間の議論を円滑かつ効率的に推進したほか、このような綿密な連携を通

じて双方の信頼関係を熟成し、本研究開発終了後においても持続的でより発展的な研究協力に発展させることを見据えて研究推進を図った。

以上のような人的交流を通して、ドイツ側で精力的に行われていたナノフォトニクス of 素過程分析と日本側の近接場光相互作用の理論及び実現技術の積み上げが互いに相補的に結びつくことにより、新領域の開拓につながる成果を得ることができた。また、共同研究者として若手研究者の参加が積極的に行われ、研究期間終了後も長期にわたる展開を期待できる状況に至らせることができた。既にいくつかの研究協力が本研究期間終了後も続く見込みとなっており、それらが、再度今回のような共同研究プロジェクトに発展し持続的に展開することが期待される。



ドイツにおける共同研究全体会議の様子  
(2009年9月 ドイツ・ドレメンホルスト)

#### 7. 主な論文発表・特許等（5件以内）

相手国側との共著論文については、その旨を備考欄にご記載ください。

| 論文<br>or<br>特許 | ・論文の場合： 著者名、タイトル、掲載誌名、巻、号、ページ、発行年<br>・特許の場合： 知的財産権の種類、発明等の名称、出願国、出願日、<br>出願番号、出願人、発明者等   | 備考 |
|----------------|--|----|
| 論文             | M. Naruse, E. Runge, K. Kobayashi, and M. Ohtsu, "Efficient optical excitation transfer in layered quantum dot nanostructures networked via optical near-field interactions," <i>Physical Review B</i> , Vol. 82, No. 12, pp. 125417 1-8, 2010                       |    |
| 論文             | S. Schmidt, M. Mascheck, M. Silies, T. Yatsui, K. Kitamura, M. Ohtsu, and C. Lienau, "Distinguishing between ultrafast optical harmonic generation and multi-photon-induced luminescence from ZnO," <i>Optics Express</i> , Vol. 18, Issue 24, pp. 25016-25028, 2010 |    |
| 論文             | M. Mascheck, S. Schmidt, M. Silies, T. Yatsui, K. Kitamura, M. Ohtsu, D. Leipold, E. Runge, and C. Lienau, "Observing the localization of light in space and time by ultrafast second harmonic microscopy," <i>Nature Photonics</i> , published online               |    |
| 論文             | W. Nomura, T. Yatsui, T. Kawazoe, M. Naruse, E. Runge, C. Lienau, and M. Ohtsu, "Direct observation of optical excitation transfer based on resonant optical near-field interaction," <i>Applied Physics B- Lasers and Optics</i> , published online first           |    |