

「新しい物理現象や動作原理に基づくナノデバイス・システムの創製」  
平成 13 年度採択研究代表者

三澤 弘明

(徳島大学大学院工学研究科エコシステム工学専攻 教授)

## 「量子相関光子ビームナノ加工」

### 1. 研究実施の概要

従来のフォトリソグラフィーが有する高いスループットを活かし、かつ光の回折による制約を受けないナノ加工技術の開発は、ナノテクノロジーの産業応用を図る上で重要である。これに対応すべく多光子プロセスや近接場光による方法論も提案されているが、飛躍的な加工分解能の向上は原理的に望めない状況である。

このような状況をブレイクスルーし、高スループットを保ちつつ真のナノメートルスケールの光加工技術を構築するために、新しい光物理現象である「量子相関を有するもつれ合い光子」を用い、回折限界をはるかに超える高い加工分解能を実現する多光子ナノ加工技術の開発を目指している。

本年度は、もつれ合い光子による2光子吸収干渉パターンに関する理論的解析と基礎的な実験、高密度もつれ合い光子の発生システム、高感度多光子吸収分子材料などに関する研究を行った。

### 2. 研究実施内容

「量子相関を有するもつれ合い光子」を用いた多光子ナノ加工技術について、昨年度に引き続いて理論解析・シミュレーションを行うとともに、原理検証のための実験システムを試作し、もつれ合い光子の干渉ならびに高密度もつれ合い光子の発生について研究を進めた。

- ・もつれ合い光子による2光子吸収干渉パターン形成の理論解析・実験（徳島大、北大）

現在、量子リソグラフィーの基礎的検証実験の為のシステムの構築を行っている。量子リソグラフィー 実現の為には、高効率かつ2光子干渉性の良い量子相関光子発生用の光源が必要となるため、光源の評価を行うことは非常に重要となる。我々は、このような光源として、パラメトリック下方変換によってビーム状に発生する蛍光対に着目している。しかし、このような高効率かつ2光子干渉性の良い光源を得るためには、発生したパラメトリック蛍光対の個々の光子の伝播特性や同時計数を行った場合の伝播特性を詳しく調べ、最適な空間モードマッチングを行う必要がある。

本年度の実験では、光源部の光学系を構築し、ビーム状に発生したTypeIIパラメトリック

蛍光対の1光子計数、同時計数分布（図1(a), (b)）の空間伝播特性の測定を行った。その結果、それぞれパラメトリック下方変換の位相整合条件と蛍光対間のポストセレクションの効果に起因して、1光子計数分布と同時計数分布の空間伝播の様子が異なることを明らかにした。また、蛍光対より量子相関光子対を得るためには、最適な空間モードの選択が重要となる。そこで、空間モード選択を行う開口径に対して、1光子計数率に対する同時計数率の割合である集光効率を測定し、最適な開口サイズにおいて極大値が存在することを示した（図2）。また、その結果をパラメトリック蛍光対を介した同時計数イメージングの概念で説明し、得られた結果と良く一致する事を示した。

今後は、同様に他の光源（TypeIの非線形結晶や分極反転導波路）について同様な測定を行い、量子リソグラフィにとって最適な光源の選択を行う。その後、干渉部の光学系の構築を進め、2光子干渉に関する実験を行う予定である。

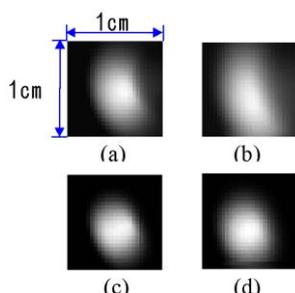


図1 異常光線の一光子計数率分布（結晶より(a)40, (b)70 cmの位置）と同時計数率分布（結晶より(c)40, (d)70 cmの位置）

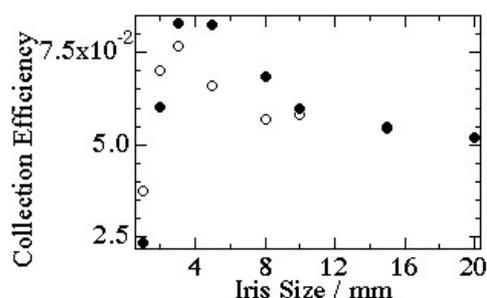


図2 集光効率の開口径依存性  
結晶より40cm(○)、70cm(●)の位置

・高密度もつれ合い光子発生システムの試作（徳島大、北大）

非線形光学結晶におけるダウンコンバージョン過程を光共振器内で誘起し、シグナル・アイドラー光ともに異なるモードで増幅するシステムの基礎実験、設計および試作を進めた。非線形光学結晶におけるダウンコンバージョンで発生する二光子の空間分布パターンが、非線形光学結晶への入射角度によって変化することを確認した。この時、相関させる二光子を取り出す位置をアパーチャーを使って限定し、強度と時間相関を測定して、高密度のもつれ合い光子が得られる条件について検討した。

・もつれ合い2光子吸収干渉用高感度レジスト材料の試作（松下電工）

もつれ合い光子による2光子吸収干渉パターン形成の研究成果に基づいて、ナノ加工を実現するための2光子吸収レジスト材料の試作を行なった。特に、高感度化のため、もつれ合い2光子プロセスの吸収断面積ができるだけ大きくなるような分子構造について引き続き理論的な検討を行なった。これらを検証するための、2光子吸収断面積を高精度で測定する実験装置の検討も行なった。

### 3. 研究実施体制

#### 三澤 グループ

- ① 研究分担グループ長：三澤 弘明（徳島大学大学院工学研究科エコシステム工学専攻・教授）
- ② 研究項目：量子相関光子を用いたナノ加工技術の開発

#### 笹木 グループ

- ① 研究分担グループ長：笹木 敬司（北海道大学電子科学研究所・教授）
- ② 研究項目：量子相関光子ナノ加工の理論的解析

#### 松嶋 グループ

- ① 研究分担グループ長：松嶋 朝明（松下電工（株）融合技術研究所 nBT開発部・主幹研究員）
- ② 研究項目：量子相関光子ナノ加工のための材料開発

### 4. 主な研究成果の発表（論文発表および特許出願）

#### (1) 論文発表

- S. Juodkazis, K. Fujiwara, T. Takahashi, S. Matsuo, and H. Misawa, “Morphology-Dependent Resonant Laser Emission of Dye-Doped Ellipsoidal Microcavity”, J. Appl. Phys, 91(2), 916-921 (2002)
- T. Takasone, S. Juodkazis, Y. Kawagishi, A. Yamaguchi, S. Matsuo, A. Sakakibara, H. Nakayama and H. Misawa, “Flexural Rigidity of a Single Microtubule” Jpn. J. Appl. Phys., 41, 3015-3019 (2002).
- S. Matsuo and H. Misawa, “Direct Measurement of Laser Power through a High Numerical Aperture Oil Immersion Objective Lens Using a Solid Immersion Lens”, Rev. Sci. Instr. Vol. 73, No.5, pp.2011-2015 (2002).
- A. Marcinkevicius, V. Mizeikis, S. Juodkazis, S. Matsuo and H. Misawa, “Effect of Refractive Index-Mismatch on Laser Microfabrication in Silica Glass”, Appl. Phys. A, 76, 257-260 (2002).
- K. Yamasaki, S. Juodkazis, T. Lippert, M. Watanabe, S. Matsuo and H. Misawa, “Dielectric Breakdown of Rubber Materials by Femtosecond Irradiation”, Appl. Phys. A, 76, 325-329 (2002).
- S. Juodkazis, S. Matsuo, H. Misawa, V. Mizeikis, A. Marcinkevicius, H.-B. Sun, Y. Tokuda, M. Takahashi, T. Yoko, J. Nishii, “Application of Femtosecond Laser Pulses for Microfabrication of Transparent Media”, Appl. Surface Science, 197-198, 705-709 (2002).

- J-Y. Ye, V. Mizeikis, Y. Xu, S. Matsuo and H. Misawa,  
“Fabrication and Optical Characteristics of Silicon-based Two-Dimensional Photonic Crystals with Honeycomb Lattice”  
Opt. Comm, 211, 205-213 (2002).
- T. Kondo, S. Matsuo, S. Juodkazis, V. Mizeikis and H. Misawa,  
“Multi-Photon Fabrication of Periodic Structures by Multi-Beam Interference of Femtosecond Pulses” ,  
Appl. Phys. Lett, 82(17), 2758-2760 (2003).
- E. Vanagas, I. Kudryashov, D. Tuzhilin, S. Juodkazis, S. Matsuo and H. Misawa,  
“Surface Nanostructuring of Silica by Femtosecond nJ Energy Pulses” ,  
Appl. Phys. Lett, 82(17), 2901-2903 (2003).
- K. Wada, K. Sasaki and H. Masuhara  
“Electric Charge Measurement on a Single Microparticle Using Thermodynamic Analysis of Electrostatic forces”  
Appl. Phys. Lett, 81(10), 1768-1770 (2003).
- S. Matsuo, T. Fujine, K. Fukuda, S. Juodkazis and H. Misawa,  
“Formation of Free-Standing Micro Pyramidal Colloidal Crystals Grown on Silicon Substrate”  
Appl. Phys. Lett, in press (2003).
- V. Mizeikis, S. Juodkazis, J-Y. Ye, A. Rode, S. Matsuo and H. Misawa,  
“Silicon Surface Processing Techniques for Micro-Systems Fabrication” ,  
Thin Solid Films, in press (2003)
- K. Yamasaki, S. Juodkazis, S. Matsuo, and H. Misawa,  
“Three-Dimensional Micro-Channels in Polymers: One Step Fabrication”  
Appl. Phys. A. in press (2003)
- S. Tomonari, H. Yoshida, M. Kamakura, K. Yoshida, K. Kawahito, M. Saitoh, H. Kawada, S. Juodkazis, and H. Misawa,  
“Miniaturization of a Thermally Driven Ni | Si Bimorph”  
Jpn. J. Appl. Phys, in press (2003)
- S. Tomonari, H. Yoshida, M. Kamakura, K. Yoshida, K. Kawahito, M. Saitoh, H. Kawada, S. Juodkazis, and H. Misawa,  
“Efficient Microvalve Driven by a Si-Ni Bimorph”  
Jpn. J. Appl. Phys, in press (2003)

(2) 特許出願

2件