

「電子・光子等の機能制御」  
平成11年度採択研究代表者

覧具 博義

(東京農工大学工学部 教授)

「光・電子波束制御エンジニアリング」

## 1. 研究実施の概要

本プロジェクトは、フェムト秒領域の超短光パルス光の位相を高速かつ高精度に制御し利用する技術の開発を目指している。特に、この光位相の制御と利用は、位相を制御したフェムト秒領域の超短光パルスと、半導体ナノ構造中に形成した電子波束との相互作用を用いることを、プロジェクトの中心課題にしている。この部分の研究は、主として東京農工大学のフェムト秒量子制御グループで実施している。半導体ナノ構造の作成は、NECおよびフェムト秒テクノロジー研究機構所属のプロジェクトメンバーが構成する量子構造材料グループで実施している。

平成11年度にプロジェクトを開始して以来、フェムト秒位相制御光源およびフェムト秒位相分光法という基本技術の開発を重点的に進めてきた。また、有機色素分子を用いた実験でフェムト秒量子波束制御の原理実証を達成した。今年度は、半導体ナノ構造における量子波束形成・制御の実証に注力した。

一方、量子波束の生成・制御の原理的な実証は、分光学的なデータが豊富で位相緩和時間が長い分子を媒質として用いることによって先行的に検証できる部分が多いと期待される。このプロジェクトは東北大分子核波束グループの分子を用いたアト秒レベルの超精密分光計測研究を迎え入れることによって、波束制御の原理実証と応用可能性をいっそう効果的に追求した。

## 2. 研究実施内容

### 2. 1. フェムト秒波束制御グループおよび量子構造材料グループ

#### (1) 非対称階段型量子井戸構造の評価

光パルスを半導体ナノ構造に照射し光波束の位相情報を量子波束に書き込むためには、価電子帯の単一準位から伝導帯の複数準位へのコヒーレント励起が可能であることが求められる。我々はいままでに非対称階段型量子井戸(ASQW)のステップの幅と深さを適切に選ぶことで、そのような遷移が許容となることを示してきた。NECグループでは、農工大グループとの共同設計により、非対称量子微細構造を作製した。特に、非対称に結合した量子井戸については、単原子層レベルの膜厚、組成の精密制御技術

を立ち上げ、これにより、量子井戸の界面を単原子層レベルで平坦化した、組成変動の極めて小さい構造を実現した。

本研究では井戸層GaAs 30 Å/A10.1Ga0.9As 60 Å・バリア層A10.3Ga0.7As 100 Å (25周期)、及び井戸層In0.1Ga0.9As 30 Å/GaAs 60 Å・バリア層A10.3Ga0.7As 100 Å (25周期)のASQWについて、光変調反射(PR)法により光学遷移の選択則を調べた。PRスペクトルには、価電子帯の基底準位から伝導帯の基底準位(1H)だけでなく伝導帯の第2準位(2H)への遷移エネルギーにおいても構造が確認される。選択則の解析にあたり、多重反射効果を考慮することで、ポンプ光によるレベルシフト変調のみでPRスペクトル形状が説明できることがわかった。

#### (2) 単一ショット位相解析装置の開発

従来の光位相の検出技術は複数のパルス列が持つ平均的な情報を積算して取得せざるを得なかった。超短光パルスが持つ広帯域スペクトル成分の内部位相を情報伝送に利用するためには、パルスごとに異なる内部位相変調を与え、かつ、その位相を個別に測定する「単一ショット位相測定」が必要不可欠である。今回、我々は位相変調したパルス列の単一ショット位相シフト測定に成功した。このためには、遅延時間を掃引することなく位相情報を抽出できるスペクトル領域干渉計とフェムト秒領域の光パルスのパルス列を時間的にとらえることができるストリークカメラを組み合わせた。非線形光学媒質中での光励起屈折率変化を用いて、繰り返し周波数76MHz のパルス列の中の特定の光パルスだけに位相変調を与え、その非線形位相シフトを単一のパルスで測定した。

#### (3) フェムト秒位相分光法の半導体ナノ構造への応用

半導体量子構造の光学非線形複素感受率スペクトルの時間分解測定は、超高速光デバイス材料を評価する際に不可欠となる。しかしこれまで、非線形複素感受率の実部と虚部を分離して、フェムト秒の時間分解能でスペクトルを直接測定することは困難であった。そこで本研究では、フェムト秒偏光分割サニャック干渉計(P S I)を開発し、これを用いて光励起された半導体量子構造材料による光の非線形位相・振幅変化を同時にフェムト秒時間分解かつ周波数分解で直接測定した。非対称階段型量子井戸(Ga0.3A10.7As/A10.1Ga0.9As/GaAs)の非線形位相変化( $\Delta\theta$ )と非線形振幅変化( $\Delta E/E$ )スペクトルから、光励起による半導体量子構造の非線形項の起源には、吸収飽和とエネルギー準位がシフトした効果の両方が寄与していると結論された。

#### (4) 量子波束の時間発展の実時間観測

位相制御光パルスで媒質中に記憶させた情報は、量子波束を形成する量子状態の振幅・位相をすべて読み出すことによって完全に復元できる。本プロジェクトでこれまで示してきた成果では、光パルスのチャープの向きなど、位相情報の一部を読みだしたのにすぎなかった。書き込んだ情報を最大限活用するには、量子波束の波形をできるだけ完全に可視化する技術が必要である。そこで、量子波束の振幅・位相情報を直接読み出す方法を開発した。すでに本プロジェクトで波束のチャープ制御を実証した

シアニン系分子について、フェムト秒周波数分解ポンププローブ法で波束の実時間測定に成功した。

#### (5) 量子構造半導体中での量子波束制御実験

フェムト秒パルスの持つ振幅・位相情報を量子構造半導体中に生成された量子波束の振幅・位相情報に転写し、またその逆の動作も可能とするデバイスの原理を実証する。具体的には、非対称量子井戸に位相制御パルスを照射して波束を生成し、位相分光法で検出を試みている。

### 2. 2. 分子核波束グループ

#### (1) 分光解析によるアト秒位相制御光源の特性評価

フェムト秒パルスレーザーとマイケルソン型干渉計との組み合わせにより発生させた二連のレーザーパルスは、パルス間時間差をレーザーの光学サイクルよりも十分に短い精度で掃査すると、任意の波長成分間の相対位相を制御することのできる位相制御光源と成り得る。当グループが製作したアト秒位相変調器 (APM) は高精度の位相制御光源であることを分光測定から確かめた。周波数領域の干渉スペクトルから時間領域の光位相を抽出する方法は、農工大Gとの議論に負うものである。

#### (2) 高精度分子核波束干渉の観測

300フェムト秒パルス (中心波長254nm) と上記APMからの二連パルスをHgAr分子に照射し、ほぼ100%の干渉コントラストを有する分子核波束干渉を観測した。これは、位相制御光源の光位相が、分子内量子波束の位相に転写された結果であると解釈することができ、分子が光位相の量子メモリとなることの原理実証を行った。

#### (3) 位相制御されたヨウ素分子核波束の実時間観測

100フェムト秒パルス (中心波長616nm) と上記APMからの二連パルスをヨウ素分子 (I<sub>2</sub>) に照射して分子振動波束を生成・制御し、さらに別の100フェムト秒パルス (中心波長389nm) をプローブパルスに用いて、波束生成制御の時間経過を実時間観測した。これは (2) とは相補的な観測であり、制御された波束の位相についての情報を付加する可能性がある。

#### (4) 多光子イオン化によるコヒーレント電子の発生と位相制御

キセノン原子に高強度の100フェムト秒レーザーパルスを照射し、4光子、5光子、6光子・・・の多光子励起によって発生するコヒーレント電子のエネルギースペクトル測定を行った。4光子励起で遊離した電子が更に1光子、2光子、・・・を吸収して加速される現象を観測した。平成16年度には、このような高次非線形現象によるコヒーレント電子の位相制御を試みる。

### 3. 研究実施体制

フェムト秒量子制御グループ

① 研究分担グループ長： 覧具博義 (東京農工大学・工学部、教授)

② 研究項目：

- (1) 非対称階段型量子井戸構造の評価
- (2) 単一ショット位相解析装置の開発
- (3) フェムト秒位相分光法の半導体ナノ構造への応用
- (4) 量子波束の時間発展の実時間観測
- (5) 量子構造半導体中での量子波束制御実験

#### 量子構造材料グループ

- ① 研究分担グループ長：西研一（日本電気(株) システムデバイス研究所、主任研究員）
- ② 研究項目：
  - (1) 膜厚揺らぎの小さい非対称ポテンシャル量子井戸の作製

#### 分子核波束グループ

- ① 研究分担グループ長：上田潔（東北大学多元物質科学研究所、教授）
- ② 研究項目：
  - (1) 分光解析によるアト秒位相制御光源の特性評価
  - (2) 高精度分子核波束干渉の観測
  - (3) 位相制御されたヨウ素分子核波束の実時間観測
  - (4) 多光子イオン化によるコヒーレント電子の発生と位相制御

#### 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

- Kiyoshi Ueda, Alberto De Fanis, Norio Saito, Masatake Machida, Keiichiro Kubozuka, Hisashi Chiba, Yoko Muramatsu, Y. Sato, Achim Czasch, Ottmar Jauzki, Reinhard Dörner, Amine Cassimi, Masashi Kitajima, Tomoya Furuta, Hiroshi Tanaka, Stacey L. Sorensen, Kazumasa Okada, Shu-ichiro Tanimoto, Kazumasa Ikejiri, Yusuke Tamenori, Haruhiko Ohashi, and Inosuke Koyano, “Nuclear motion and symmetry breaking of the B 1s-excited BF<sub>3</sub> molecule”, Chemical Physics 289, 135 (2003).
- Kaoru Sasaki, Yuya Hashimoto, Naoyuki T. Hashimoto, Kazuhiko Misawa, Kenichi Nishi and Roy Lang, “Asymmetric Stepped Quantum Well Structures for Electronic Wave Packet Excitations”, The 10<sup>th</sup> International Workshop on Femtosecond Technology Abstracts FST2003 p.112 (2003).
- Hiroshi Takeuchi, Isao Matsuda, Kazuhiko Misawa and Roy Lang, “Phase-programmed femtosecond pulses tunable in the near infrared”, The 10<sup>th</sup> International Workshop on Femtosecond Technology Abstracts FST2003 p.178 (2003).

- Koichiro Adachi, Kazuhiko Misawa and Roy Lang, “Analysis of Coherent Excitation of 3 Level System”, The 10<sup>th</sup> International Workshop on Femtosecond Technology The 10th International Workshop on Femtosecond Technology Abstracts FST2003 p.177 (2003).
- Fumikazu Inuzuka, Kazuhiko Misawa, Kiyoshi Asakawa and Roy Lang, “Femtosecond nonlinear phase and amplitude changes in quantum wells measured using polarization-division Sagnac interferometer”, The 10<sup>th</sup> International Workshop on Femtosecond Technology Abstracts FST2003 p.175 (2003).
- Isao Matsuda, Kazuhiko Misawa and Roy Lang, “Chirp-dependent fluorescence saturation observed by means of femtosecond variable chirp device” The 10<sup>th</sup> International Workshop on Femtosecond Technology Abstracts FST2003 p.40 (2003).
- Kazuhiko Misawa, Fumikazu Inuzuka and Roy Lang, “Femtosecond Sagnac interferometer for the measurement of complex third-order optical susceptibilities”, SPIE Proceedings, vol. 5212, pp.270-281 (2003).
- Kenji Ohmori, Yukinori Sato, Evgueni E. Nikitin, and Stuart A. Rice, “High-precision molecular wave-packet interferometry with HgAr dimers”, Physical Review Letters, Volume 91, 243003-1 – 243003-4 (2003) .

(2) 特許出願

H15年度特許出願件数：1件（CREST研究期間累積件数：6件）