

「量子効果等の物理現象」
平成9年度採択研究代表者

白田 耕藏

(電気通信大学電気通信学部 教授)

「量子固体と非線形光学:新しい光学過程の開拓」

1. 研究実施の概要

本計画のねらい「孤立系の量子性と凝縮系の高密度性を兼ね備える量子固体:固体水素結晶」を作業媒質として用い、非線形光学や量子光学に従来の枠組み・制約を越えた新しい可能性を切り拓くことである。また、このための基礎を与える固体水素の基礎特性についての高精度のデータベースを構築することも重要な目的である。

現在までの成果は、概ね以下の5点にまとめられる。(1)固体水素のバイブロンラマン遷移に大きなコヒーレンスを生成し強結合状態を準備する事により、位相整合の制約のない、任意で高効率な非線形ラマンサイドバンド発生を実現した。(2)バイブロンラマン遷移に準備した大きなコヒーレンスにより、サブフェムト秒の光パルスが得られることを理論的に示した。(3)バイブロンラマン遷移を用いることにより、透明媒質においてすら光パルスの伝播速度を真空中の光速度から4桁も制御できる事を理論・実験の両面から示した。(4)液体水素微小球により 10^9 を越える巨大Q値の光共振器を実現し、非線形光学効果の増強により紫外から近赤外にわたるコヒーレントな光の系列(光コム)が実現できる事を示した。(5)固体水素の非線形光学/量子光学の作業物質としての基礎特性を高精度で定量的に評価する方法を確立した。

2. 研究実施内容

量子結晶発振器

固体水素の大きなラマンコヒーレンスは時間的にも空間的にもインコヒーレントな蛍光ともパラメトリックに相互作用しラマンサイドバンドを高効率に発生できることを理論・実験の両面から既に実証した。我々はこの固体水素の量子コヒーレンス系を量子結晶発振器と呼んでいる。この量子結晶発振器の魅力ある特長の一つは、125THzという超高周波で大振幅の位相変調が行えることであり、その結果としてフェムト秒光パルスを変調することによりサブフェムト秒光パルスの発生が期待できる。量子結晶発振器をレーザーに関わる一つの極限技術として完成させるため、フェムト秒レーザーパルスの変調によるサブフェムト秒光パルスの発生を基軸とした以下に示す項目について実験的・理論的検討を行った。

- ① 量子結晶発振器の理論構築
- ② 固体水素薄膜の作成法の開発

- ③ ドライブレーザーからサブフェムト秒レーザーパルスの空間的な分離法
- ④ 変調伝播過程の 3 次元シミュレーションコードの開発
- ⑤ サブフェムト秒光パルスの検出法の検討

項目①については、詳細な理論的検討を行った。量子クリスタル発振器は通常の小振幅の位相変調器とおおきく異なる点が明確になった。大振幅の量子クリスタル発振器における変調では、通常のベッセル関数による表現が不適切であり、コヒーレントなバイブロン振動により定義されるコンプレッション因子が重要な意味を持つことが示された。コンプレッション因子の解析的な表現を導出した。サブフェムト秒光パルスの発生には窓なしの固体水素結晶薄膜を準備する必要がある。気相成長法により固体水素薄膜を作成する方法を開発した。薄膜の評価は高分解能ラマンロス分光により行い最適条件を確立しつつある。③に関してはバイブロンコヒーレンスを非同軸の 2 本のレーザーにより準備し、フェムト秒レーザーをコヒーレンスの端数ベクトルと同軸に入射する方法を実験的に実証した。③のスキームでの条件を確定するため理論的・数値シミュレーション的に最適条件を確定した(④)。関連研究として、固体水素と平衡状態で存在する低温水素気体についてパラメトリックなラマンサイドバンド発生を行い、良好な結果を得た。純固体水素の方法と相補的な手法になり得るものである。

光伝播の制御

固体水素が高密度性と共に孤立系の量子性をも併せ持つ系であることは、光パルスの伝播についても重要な効果をもつ。既に固体水素のように透明な系においても光パルスの伝播速度は真空中の光速の 30,000 分の 1 にもなる事が示された。今年度はさらに固体パラ水素に少量存在するオルソ水素の振動遷移を用いて共鳴ラマン(EIT)のスキームで光パルスの伝播を制御する試みを開始した。要点は、固体水素中ではオルソ水素の振動遷移が結晶場により許容となることであり、またオルソ水素は核スピン(I=1)を持つのでゼーマン副準位間のコヒーレンスが生成可能であることである。我々が既に測定した振動緩和定数や NMR のデータを用いて理論的にシミュレートすることにより、優れた固体 EIT 媒質になりえることが示された。用いるレーザーの波長は 2.4μ であるが、この波長帯の単一波長・波長可変レーザーをトウェンテ大(オランダ)の Boller, Klein 博士のグループと共同で開発した。

超高 Q 値球状光共振器

液体水素で実証した凝縮系水素と光共振器の組み合わせの際立って優れた特長を、球のサイズ・光導入法などについての制御性を向上させる方法を開発しつつある。具体的には、液体水素もしくは固体水素中に熔融石英球を担持し、熔融石英球の WG モードにレーザー光をファイバーカップリングの手法により導入する。熔融石英球の WG モードが光共振器の機能を受け持ち、石英球周辺のエヴァネッセント領域の凝縮系水素が光共振器のエヴァネッセント波との非線形相互作用を受け持つ。今期においてはファイバーカップリングによりレーザー光を熔融石英球に導入する方法を開発しつつある。

固体水素振動遷移の位相緩和

バイブロン振動エネルギーの格子系への緩和とその格子系のエネルギーの熱拡散の挙動を

定量的に明らかにするため熱レンズ分光法による計測を系統的に行った。熱レンズ分光法の実験条件下での緩和と拡散を定量的にモデル化し実効的な物理パラメータを決定する手法を確立した。バイブロン緩和の時定数は10マイクロ秒程度であることを得た。この結果はオルソ水素のEIT実験に非常に重要な設計指針を与えるものである。また固体水素の高分解能分光については着実に進展しつつある。バイブロン系の各種の振動回転遷移を高分解能での分光を行い、回転準位の結晶場による分裂を詳細に解析することにより固体水素の結晶構造やフォノン系と振動系の相互作用を定量的に明らかにする方法を確立した。バイブロン系の高密度励起に伴う位相緩和の増大の効果については、バイブロン間の相互作用に介在し位相緩和を引き起こす第3体を明らかにするため温度依存性を定量的に計測した。その結果は明瞭な温度依存性を示すものではなく、その事は位相緩和の増大に音響フォノン系が介在していないことを示すものである。高密度バイブロン系の緩和を支配する温度依存性を持たない第3体を明らかにするため研究を継続している。

3. 研究実施体制

非線形・量子光学グループ(電通大グループ)

- ① 研究グループ長名
白田耕藏 電気通信大学電気通信学部 教授
- ② 研究項目
固体水素の非線形光学
量子クリスタル発振器の非線形光学
超短サブフェムト秒光パルスの発生
ラマン共鳴媒質中の非線形光伝播
固体水素の定常的ラマンコヒーレンスの評価
球滴高Q光共振器中の非線形光学
超高分解能低周波非線形光散乱分光法の開発
高品質固体水素結晶作成法の開発

高分解能分光グループ(京都大グループ)

- ① 研究グループ長名
百瀬孝昌 京都大学大学院理学研究科 助教授
- ② 研究項目
固体パラ水素の高分解能レーザー分光
固体パラ水素中の励起状態とその緩和の研究
固体パラ水素の結晶状態の評価と制御

物性グループ(東北大グループ)

- ① 研究グループ長名
齋官清四郎 東北大学大学院 教授

② 研究項目

固体水素の光散乱分光学

固体水素の基底状態の緩和の研究

4. 研究成果の発表

(1) 論文発表

- S. Uetake and K. Hakuta, “Stimulated Raman scattering of a high-Q liquid hydrogen droplet in ultraviolet region”, *Optics Letters*, Vol. 27, March 15 (2002).
- Nguyen Hong Shon, Fam Le Kien, and K. Hakuta, and A.V. Sokolov, “Two-dimensional model for femtosecond pulse conversion and compression using high-order stimulated Raman scattering in solid hydrogen”, *Physical Review A*, Vol. 65, 033809 (2002).
- J. Q. Liang, M. Katsuragawa, Fam Le Kien, and K. Hakuta, “Slow light produced by stimulated Raman scattering in solid hydrogen”, *Physical Review A*, Vol. 65, 031801(R) (2002).
- M. Katsuragawa, J. Q. Liang, Fam Le Kien, and K. Hakuta, “Efficient Frequency Conversion of Incoherent Fluorescence Light”, *Physical Review A*, Vol. 65, 025801 (2002).
- Fam Le Kien, Nguyen Hong Shon, and K. Hakuta, “Generation of subfemtosecond pulses by beating a fs pulse with a Raman coherence adiabatically prepared in solid hydrogen”, *Physical Review A*, Vol. 64, 051803(R) (2001).
- K. Kuroda, J. Z. Li, M. Suzuki, M. Katsuragawa, and K. Hakuta, “Coherent Brillouin spectroscopy in solid parahydrogen”, *Journal of Low Temperature Physics*, Vol. 125, 39-48 (2001).
- 白田耕藏, “固体水素: 光を制御する魅力的な場”, *固体物理(トピックス)*, Vol. 36, 343 (2001).
- J. Z. Li, M. Suzuki, M. Katsuragawa, and K. Hakuta, “Measurement of the energy decay for the first vibrational-excited-state in solid parahydrogen”, *Journal of Chemical Physics*, Vol. 115, 930 (2001).
- S. Uetake and K. Hakuta, “Nonlinear optics with liquid hydrogen droplet”, *SPIE Proceedings*, Vol. 4270, pp. 19-28 (2001).
- K. Edamatsu, T. Ito, K. Matsuda, and S. Saikan, “Resonant luminescence linewidths and confined-phonon sidebands of CuCl quantum dots”, *Phys. Stat. Sol. (b)*224, 629-632 (2001).
- K. Edamatsu, T. Ito, K. Matsuda, and S. Saikan, “Homogeneous linewidths and confined-phonon sidebands of the resonant exciton luminescence of CuCl quantum dots”, *Phys. Rev. B*64 195317 (2001).
- Mizuho Fushitani, Takamasa Momose, and Tadamas Shida “The $2P_{1/2}$ - $2P_{3/2}$ Transition of the Iodine Atom Photoproduced from Alkyl Iodides in the Solid Parahydrogen: Detection of New Absorptions” *Chem. Phys. Lett.* 356(3/4) 375-382 (2002)

(2) 特許出願

国内3件