

「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

本計画の目的は「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」を光学媒質として用い、従来の枠組み・制約を越えた新しい光学過程を開拓することである。現在までに、固体水素の純振動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。この結果は、いわばどのような光であっても任意に水素分子の振動周波数に対応する125THzという超高周波で効率良く変調できる事を意味し、量子クリスタル発振器とでも言えるものが実現した事を意味する。量子クリスタル発振器をレーザーに関わる極限技術として展開することを目指して、フェムト秒光パルスを変調する事を理論・実験の両面から検討している。理論の予測によれば、固体水素の大きなコヒーレンスによりフェムト秒光パルスを変調すれば、単一のサブフェムト秒光パルス発生という前人未到の技術が達成できる。現在、更に詳細な理論的検討及び実験スキームの検討を行っている。また、量子クリスタル発振器の応用例として、光パルスの伝播速度を真空中の光速から4桁も制御できる事を理論・実験の両面から示した。更に、量子固体を高Q光共振器と組み合わせる事により新しい側面を開拓する研究も行っている。現在までのところ、作業物質は液体水素を用いて行っている。液体水素微小球により 10^9 を越える巨大Q値が実現でき、その結果として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。一方、固体水素中に導入した原子・分子を用いた共鳴量子干渉光学媒質の実現を目指して研究を展開している。固体水素系でこのように様々な新しい光学過程が実現できるのは、固体水素の量子固体として際立った特徴によるものである。光学過程の基礎を支える土台としての固体水素の基礎特性についての詳細なデータベースを構築するべく、高分解能レーザー分光の諸手法を用いた研究を同時進行させている。

2. 研究実施内容

量子クリスタル発振器

固体水素の大きなラマンコヒーレンスはどのような光ともビートできサイドバ

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。具体的には、ラマン共鳴を満たす2台の単一周波数パルスレーザー(パルス幅10nsFWHM)により固体水素中にコヒーレンスを生成し、ビートする光として 300cm^{-1} (10THz)と極めて広いバンド幅を持ち、通常のパラメトリック過程としては位相整合がみだすことが困難なレーザーを用いてサイドバンド光の高効率発生を実証し、更に発展させビート光としてコヒーレント光ではなく、通常のインコヒーレントな蛍光を用いてサイドバンド発生を行った。蛍光のバンド幅は $1,700\text{cm}^{-1}$ にも達するものであり、自己相関時間は12フェムト秒と見積もれる。結果は明瞭であり、入射インコヒーレント光と同一のスペクトル形状を持つ変調周波数 $4,100\text{cm}^{-1}$ (120THz)のサイドバンド光がストークス・反ストークス成分ともに高効率(30%)で発生できる事が示された。インコヒーレント光は基本的には自己相関時間に対応するコヒーレント光パルスのランダムな重ねあわせである事を考えれば、上記の結果は固体水素の大きなコヒーレンスは12フェムト秒の光パルスをも変調できる事を示している。今年度においては、量子クリスタル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。

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の理論構築

大きなコヒーレンスの駆動レーザーから被変調レーザーパルスの空間的な分離法

変調伝播過程の3次元シミュレーションコードの開発

変調過程に対する駆動レーザー波長の最適化

項目 については、理論の結果は極めて明快でありほぼ単一のサブフェムト秒光パルスが、mJ級の2台のナノ秒レーザーパルスとnJ級のフェムト秒レーザー(約12フェムト秒のパルス幅)により発生可能である事を示している。更に項目 - において具体的な実験スキーム等について研究を進めている。

超低速光の伝播

米国のグループが光と物質の共鳴ラマン強結合系においてパルス光の伝播速度(群速度)が真空中の光速の1000万分の1にも超低速化でき、また群速度が超低速化するため物質系との相互作用時間が長くなり非線形光学効果が桁違いに増強される事を報告し大きな注目を浴びている。このような効果は中間状態に対して遠共鳴の系であっても、ラマンコヒーレンスの緩和が十分遅くまた相互作用物質の密度が十分あれば生じ得る。我々の理論的検討の結果は、遠共鳴の場合の超低速化の機構は共鳴系と異なり反ストークスとストークスのサイドバンド間のパラ

メトリック相互作用であり、かつ光パルス伝播には2つのサイドバンドの線形結合であらわされる伝播固有モードが存在し、一方は真空中の光速で伝播し他方は超低速群速度で伝播する。本年度において、試料厚さ100 μm の固体水素結晶を作成し、強いレーザー場のもとでほぼラマン共鳴する弱いプローブ光パルスの伝播を定量的に研究した。その結果、レーザー場強度が1 GW/cm²でプローブ光を+70MHz離調した場合、伝播の結果プローブパルスは二つのパルスに分裂する事を見出した。この分裂は遠共鳴系のパルス伝播のノーマルモードに対応するものである。分裂時間幅から低速伝播モードの伝播速度は真空中の光速の40,000分の1にもなる事が示された。この結果は理論の予測を良く裏付けるものである。

超高Q値球状光共振器

昨年度までに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、また固体水素への拡張を行うための新方法の開発を開始している。基本的な指針は高Q光共振器の役割と非線形光学媒質としての役割を分離し十分な制御性を確保する事である。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を用いず直接にパルスレーザーによりWGモードを立ち上げる事により誘導ラマン散乱がエヴァネッセント領域で観測される事を確認した。この事により高安定な高Q光共振器と凝縮系水素のラマン遷移の特長を生かして、光制御もしくは共振器QEDの研究が可能になる。安定な低温環境を用いた新しいタイプの周波数標準として発展する可能性もある。

固体水素振動遷移の位相緩和

分解能1 MHzの高精度ラマン損失分光システムを用い、固体水素のラマン周波数・スペクトル線幅の詳細な温度依存性を測定した。スペクトル線幅は5 MHz以下にも達するものであり、凝縮系としては異例に狭い事が実証された。また、ラマン周波数・スペクトル線幅の温度依存性は分子振動(バイブロン)と音響フォノンとの相互作用で定量的に記述できる事を示した。また、時間領域のコヒーレンスの緩和測定を様々な励起強度において行った。その結果、バイブロンの密度が大きくなることにより位相緩和速度が速くなる事が見出された。この観測結果はバイブロン(励起子)間の相互作用について明確な示唆を与える事になる。現在、バイブロンの緩和過程を高密度領域まで扱える理論を構築する研究を進めている。

3 . 主な研究成果の発表 (論文発表)

S. Uetake and K. Hakuta, "Nonlinear optics with liquid hydrogen droplet", SPIE Proceedings, Vol. 4270, pp. 19-28(2001)

白田耕藏, "量子コヒーレンスによる光学応答の制御", 応用物理(総合報告) Vol. 70, No. 2, 138-148(2001)

桂川眞幸、百瀬孝昌、鈴木勝、是枝聡肇、白田耕藏、"固体水素を用いた新しい光学過程", 光学(解説) Vol. 30, No. 2, 111-116(2001)

M. Katsuragawa, J. Q. Liang, and K. Hakuta, "Parametric stimulated Raman scattering with solid hydrogen", Journal of Low Temperature Physics, Vol. 122, 359-365(2001)

Fam Le Kien and K. Hakuta, "Normal modes and propagation dynamics in a strongly coupled Raman medium", Physical Review A, Vol. 63, 023807(6)(2001)

J. Q. Liang, M. Katsuragawa, Fam Le Kien, and K. Hakuta, "Sideband generation using strongly-driven Raman coherence in solid hydrogen", Physical Review Letters, Vol. 85, 2474-2477(2000)

Fam Le Kien and K. Hakuta, "Stimulated Raman scattering with slow light", Canadian Journal of Physics(Festschrift for 75th Birthday of B. P. Stoicheff) Vol. 78, Issue 5-6, 543-559(2000)

Fam Le Kien, Nguyen Hong Quang, and K. Hakuta, "Spontaneous emission from an atom inside a dielectric sphere", Optics Communications, Vol. 178, 151-164 (2000)

J. Z. Li, M. Katsuragawa, and K. Hakuta, "Single-longitudinal-mode pulsed dye laser with coaxial end-pumping and self-seeding", Optical Review, Vol. 7, 275 (2000)

Masaaki Miki and Takamasa Momose, "Rovibrational Transitions and Nuclear Spin Conversion of Methane in Parahydrogen Crystals" Low Temp. Phys. 26(9 /10), 661-668(2000) [Fiz. Nizk. Temp. 26(9/10), 899-908(2000)]

K. Uchikawa, M. Sakamoto, A. Koreeda, and S. Saikan, "Accumulated photon echo spectroscopy for stained tissue samples" J. Opt. Soc. Am. B17, 1058(2000)