

平成 21 年 6 月 4 日現在

研究種目：若手研究（スタートアップ）

研究期間：2007～2008

課題番号：19840015

研究課題名（和文） 励起子超流動の励起子ライマン分光法による検証

研究課題名（英文） Study of excitonic superfluidity by excitonic Lyman spectroscopy

研究代表者

吉岡 孝高（YOSHIOKA KOSUKE）

東京大学・大学院工学系研究科・助教

研究者番号 70451804

研究成果の概要：

炭酸ガスレーザーおよび近年開発が進んでいる量子カスケードレーザーを活用し、亜酸化銅 1 s パラ励起子の中赤外波長域に存在する内部量子遷移を用いた高感度・高波長分解能検出法を開発した。この検出法により、1 s パラ励起子の高密度励起時に生じる励起子間の衝突が励起子の消失につながり、さらにその衝突断面積が当初想定されていたものより桁違いに大きく、低温において発散型となることを見出した。このことにより、液体ヘリウム 4 を用いた励起子の冷却では、励起子ボース・アインシュタイン凝縮（BEC）の臨界密度が高く励起子の消失レートが高すぎるため、BEC が安定にならない可能性が高まった。そこで、液体ヘリウム 3 を用いたサブケルビン領域の冷却実験に移行し、結晶内に 3 次元トラップした 1 s パラ励起子の高空間分解能発光測定の実現、および高密度励起による結晶内の熱発生の影響について数値計算による検討を行った。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	1,350,000	0	1,350,000
2008 年度	1,350,000	405,000	1,755,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,700,000	405,000	3,105,000

研究分野：励起子のボース・アインシュタイン凝縮

科研費の分科・細目：物性

キーワード：励起子・超流動・レーザー分光

## 1. 研究開始当初の背景

励起子のボース・アインシュタイン凝縮（BEC）の実験的実証は 40 年来未解決の問題である。固体中の素励起が実在粒子と同様に、量子統計性を反映した相転移を生じるか否かという重要な問題であるばかりでなく、高温超伝導と密接な関係を持つことが想像さ

れ他分野への波及効果も大きな課題である。直接遷移型半導体亜酸化銅における 1 s パラ励起子は、特異的に長い寿命を有することから BEC 実現の有力候補とされてきたが、微弱な発光による定量性の欠如が問題であった。一方、発光に代わる励起子の観測法として開発された電流検出法により、液体ヘリウム温

度において高密度励起時に超流動的伝播を示すことが報告され、注目を集めた一方で、何を観測したかが定かではなく、より分光学的な手法での検証が切望されていた。

## 2. 研究の目的

代表者らが開発してきた、CW レーザーを用いた高感度  $1\text{ s} - 2\text{ p}$  誘導吸収スペクトル測定法により、電流検出により報告されたパラ励起子の超流動的な伝播信号の分光学的検証を行う。

## 3. 研究の方法

$1\text{ s} - 2\text{ p}$  誘導吸収スペクトル観測による  $1\text{ s}$  パラ励起子の検出法のための光源として、5 桁のダイナミックレンジを実現してきた炭酸ガスレーザーだけではなく、近年開発が進んでいる量子カスケードレーザーを積極的に活用する。これにより高感度かつ高い周波数分解能を確保し、パルスレーザーによる高密度励起子生成後の結晶内の伝播の様子を、時空間分解誘導吸収スペクトルを観測することで追跡し、超流動的伝播信号の起源を明らかにする。

## 4. 研究成果

まず、波長可変 CW 単一ライン炭酸ガスレーザーによる亜酸化銅における  $1\text{ s}$  パラ励起子検出を行う配置で実験を立ち上げることで、パラ励起子  $1\text{ s} - 2\text{ p}$  遷移誘導吸収量の  $100$  ナノ秒から  $10$  マイクロ秒における時間分解測定が可能となった。励起には、当初予定していた Q スイッチ YAG レーザーの前に、単一周波数発振色素レーザーの音響光学素子による切り出しを用いて安定な励起子生成を行い、励起子検出系の最適化を図った。CW 炭酸ガスレーザーの出力は、セレン化亜鉛を用いた音響光学素子を使用することでパルスの切り出しを行った。検出器の電源など低雑音化を進め、雑音に対する誘導吸収信号として 6 桁台に達する小さな信号検出を実現した。また、時間分解能  $70$  ナノ秒を達成した。この結果、密度に依存する励起子の消失を排除した低密度極限での  $1\text{ s}$  パラ励起子の寿命を測定することが可能となり、実際に数百ナノ秒からマイクロ秒に達する長い寿命を有することを確認した。さらにその温度依存性を測定して寿命の機構解明を進めた。

次に、パラ励起子密度の励起強度依存性が飽和傾向を示した実験結果について、励起子の 3 次元的拡散や寿命の温度依存性を考慮した励起強度依存性の数値計算を進めた。実験との比較から、 $1\text{ s}$  パラ励起子の衝突誘起非輻射緩和のレートが、理論的予想に反して  $1\text{ s}$  オルソ励起子と同程度の大きな値であ

ることを見出した。さらに、その緩和レートに温度依存性がないことも明らかにし、量子力学的な散乱過程との関連を議論した。

一方、亜酸化銅天然結晶中にパラ励起子を生成する励起用レーザーとの PLL による電氣的同期を行うことで、プローブ光として外部共振器付き量子カスケードレーザーを使用したものとして初めて、パラ励起子の励起子内部遷移に由来する誘導吸収スペクトルを取得可能となった。しかし、この量子カスケードレーザーがパルス発振型であるため、ショット毎に発振波長が僅かにモードホップすることが大きな強度変調につながり、誘導吸収量測定における SN 比を劣化させることが判明した。そこで製造業者との性能面での協議の上、連続発振型モードホップフリーレーザーへの改良を行い、高い SN 比による測定の準備を進めた。

一方で、パラ励起子密度の励起強度依存性に関して、本研究において昨年度進めた数値計算の結果、パラ励起子間の非弾性衝突によるロスが原因で、液体ヘリウム温度における励起子 BEC 臨界密度への到達が極めて難しいことが判明した。そのため、BEC を実現するには、励起子温度をさらに下げることで臨界密度を下げる必要が生じた。そこで、サブケルビン領域まで冷却したパラ励起子を歪誘起 3 次元トラップを用いて空間的に閉じ込め、準安定状態励起子 BEC を実現するための実験を主に進めた。本研究では特に、無冷媒冷凍機内で生じる振動による発光イメージの振動を補償する光学系および回路の設計・製作を行った。また、励起子の崩壊が熱を発生することを想定し、熱伝導係数と比熱の温度依存性から、トラップ中での局所的な結晶温度上昇の数値シミュレーションを行った。この結果とともに、非弾性衝突レートが支配的な場合のトラップ中の BEC の安定性を議論した。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[ 雑誌論文 ] (計 0 件)

[ 学会発表 ] (計 4 件)

[1] 吉岡孝高, 井手口拓郎, 五神真, 「 $\text{Cu}_2\text{O}$  パラ励起子における衝突誘起非輻射緩和過程の観測」, 日本物理学会第 63 回年次大会, 2008 年 3 月 23 日, 近畿大学

[2] 吉岡孝高, 蔡恩美, 鈴木理仁, 五神真, 「トラップした  $\text{Cu}_2\text{O}$  パラ励起子のサブケルビン領域における量子縮退状態」, 日本物理学会 2008 年秋季大会, 2008 年 9 月 22 日,

岩手大学

[3]吉岡孝高, 蔡恩美, 五神真, 「サブケルビン領域における量子縮退励起子の観測とその安定性」, 日本物理学会第64回年次大会, 2009年3月28日, 立教大学

[4] K. Yoshioka, T. Ideguchi, M. Kuwata-Gonokami, "Density-dependent loss of paraexcitons in cuprous oxide probed by excitonic Lyman spectroscopy," 9th International Workshop on Nonlinear Optics and Excitation Kinetics in Semiconductors, May 28, 2008.

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

吉岡 孝高 (YOSHIOKA KOSUKE)  
東京大学・大学院工学系研究科・助教  
研究者番号: 70451804

### (2)研究分担者

なし

### (3)連携研究者

なし