

課題別研究評価

1. 研究課題名： 磁束の量子化過渡現象と新規物性の解明
2. 研究者氏名： 斗内 政吉
3. 研究のねらい

固体中における量子化現象の研究対象は、定常量子状態が主であった。一方、近年の極短光パルス発生技術の進展により超高速でのキャリア変調が可能となり、統計領域の扱えない非マルコフ過程における研究が可能となってきた。本研究では、巨視的量子効果の実現される超伝導体を用いて、特に磁束量子に注目し、その量子状態を極短光パルスで変調することで、新しい光磁束量子相互作用の現象を観測すること、および解明することを試みるとともに、その変調される過程をダイナミックに観測することで、量子化状態の過渡現象を研究する分野を新しく切り開くことを目指している。更に、この新しい現象に基づく光磁束量子変換機構を用いて、フェムト秒光パルスに対するメモリーの開発も視野に入れている。

研究課題

当初研究計画では、以下の3項目の課題を設定し、研究を開始した。

研究項目 A：磁束量子の光生成・変調の観測と新規物性の解明

- 細目 1：磁場下での磁束量子光パルス生成・変調の観測
- 細目 2：超伝導電流の光パルス変調による磁束量子の生成と変調
- 細目 3：極短光単一パルスによる磁束量子生成・変調の観測
- 細目 4：磁束観測システムの高感度・高分解能化
- 細目 5：磁束量子の光生成・変調過程のモデル化と解析

研究項目 B：磁束量子光変調過程のダイナミクスの観測

- 細目 1：磁束量子光変調過渡現象観測システムの設計・開発
- 細目 2：過渡現象観測システムによるテラヘルツ電磁波放射の観測
- 細目 3：過渡現象観測システムによる磁束量子光変調過渡現象の観測
- 細目 4：磁束量子光変調過程の過渡的現象のモデル化と解明

研究項目 C：光磁束量子変換メモリーの開発

- 細目 1：光磁束量子変換メモリーの単一セル設計・開発
- 細目 2：光磁束量子変換メモリーの単一セルの基本動作確認
- 細目 3：光磁束量子変換メモリー1次元アレーの設計・開発
- 細目 4：光磁束量子変換メモリー1次元アレーの基本動作確認

4. 研究結果及び自己評価

A. 当初課題に対する研究結果

研究項目 A：磁束量子の光生成・変調の観測と新規物性の解明

細目 1 および 2: 様々な条件下で、超伝導ループにおける磁束量子の生成・変調過程を観測し、フェムト秒光パルスによる磁束量子生成が、従来の超伝導理論では説明されない新現象であることを見出した(4,6)。また磁束の安定性についても詳しく検討し、70K 程度までこの現象が観測可能であり、フォトン、 1×10^{20} 個 / cm^3 以上注入しても安定していることも確認した (到達度 100%)。

細目 3: 単一フェムト秒光パルス照射システムを構築し、磁束量子の単一パルス生成に成功した(10,12)。その時、生成磁束量子が、レーザーパワー、バイアス電流、光パルス数ならびに超伝導ループインダクタンスに大きく依存していることを明らかにした (到達度 100%)。

細目 4: スタート時の超伝導電流分布分解能 $30 \mu\text{m}$ を $8 \mu\text{m}$ (目標 $5 \mu\text{m}$) に改善し、約 20 個の磁束量子まで観測できるテラヘルツ電磁波放射イメージングシステムを構築した(1,2,3,5) (到達度 80%)。

細目 5: 磁束量子の光生成・変調過程を現象論的に説明したが、具体的なモデルの定式化と解析には至らなかった (到達度 40%)。

研究項目 B: 磁束量子光変調過程のダイナミクスの観測

細目 1: 当初計画とは異なるが、新しい超高速光励起ダイナミック観測システム (ポンプ・プローブテラヘルツ電磁波放射) を構築した(9,12) (到達度 80%)。

細目 2: 上記ポンプ・プローブテラヘルツ電磁波放射を観測することで、雪崩的クーパ対破壊過程や緩和過程等超高速電荷ダイナミクスが評価可能であることを明らかにした(9,12) (到達度 60%)。

細目 3 および細目 4: 磁束量子光変調過程の観測について、アイデアを具体的な手法にすることはできたが、人員不足のため直接観測には至らなかった (到達度 20%)。

研究項目 C: 光磁束量子変換メモリーの開発

細目 1: 光磁束量子変換メモリーの単一セル設計・試作を行った(8)。各デバイス部分は動作することが確かめられたが、全体の動作確認計測システムの構築には至らなかった (到達度 80%)。

細目 2: SQUID の電流 - 電圧特性から、光励起に伴う μ_0 の変化を観測し、磁束量子がメモリー内に生成され、その存在を SQUID により検出可能であることを確認した(8)。但し SQUID 信号の観測には至らなかった (到達度 50%)。

細目 3 および細目 4: 時間不足により着手出来なかった (到達度 0%)。

B. 研究期間中の新展開とその結果

研究項目 D: 磁束量子の光生成を用いたフェムト秒レーザーイメージング

細目 1: 超伝導ストリップラインにおけるボルテックスの生成

連続および単一光パルスを照射することにより、超伝導薄膜中にボルテックスが生成されることを見出した(7,11,12)。また、超伝導ストリップライン中に微細なアンチドット

を導入することでボルテックスに対応するピンニング力が増大し、安定した磁束量子が生成されるようになった（到達度 70%）。

細目 2：超伝導イメージングプレートへの展開

連続および単一パルスを用いて、ボルテックスの薄膜内での分布が、レーザービーム径に依存して変化することを見出し、フェムト秒レーザー用超伝導イメージングプレートへの展開が可能であることを見出した(12)（到達度 50%）。

細目 3：超伝導ストリップライン中でのボルテックス生成の発現機構

超伝導ループの場合と同様に、現象論的には説明することが出来た(12)が、明確なモデル化までには至っていない（到達度 10%）。

細目 4：将来応用の提案(12)

超伝導薄膜がフェムト秒レーザー用イメージングプレートとして動作する可能性を指摘したが、それを磁気光学センサーと組合せることで、具体的なシステム化を提案した。また、SQUID アレーと組合せた 2 次元光インターフェイス開発や空間量子ビット研究展開の可能性のあることを指摘した（到達度 50%）。

C. 全体的な研究内容に関する自己評価

本プロジェクト 3 年間における研究成果としては、到達度から見てほぼ満足すべき結果を得ていると考えている。ただし、達成出来なかった項目や、挑戦出来なかったアイデアは多数あり、それらが、主に人員不足と自己研究時間のマネジメント失敗によるものであることから、これを教訓に研究への取組みを改善したいと考えている。また、多くの興味ある成果が出ているにもかかわらず、外部発表の到達度としては、50%にも満たない状態にあると言え、今後アカウンタビリティを向上させることが自己にとって、最も重要な課題といえる。全体としてのプロジェクト達成度は 70 点と自己評価する。

D. 今後の展開

当初の目標であった、超高速電荷ダイナミクス研究と新量子効果研究分野への扉を開くことは、できたと考えている。今後は、上記課題のうち、極限的超高速電荷ダイナミクスの物理と、フェムト秒光信号イメージングおよび光信号処理デバイスへの研究に重点をおき、その研究の質を向上させることで、この分野の重要性を明らかにするとともに、現在、本プロジェクト外で行っている様々な電子材料のテラヘルツ電磁波放射とテラヘルツ波物性評価と統合させることで、強相関電子系材料のテラフォトンクス分野を創製していきたいと考えている。

5. 領域総括の見解：

極短時間レーザー光照射により超伝導体ループ構造に量子化された磁束状態(磁束量子)を発生させ、更にそれを光・磁束量子相互作用により変調・制御する可能性を追求することが、本研究の提案趣旨であった。野心的な研究課題であり、本研究領域の共通課題とも一致する内容で

あるが、提案された実施目標が所定の研究期間内に実行するには多すぎ、いくつかの基本的な研究課題を選んで重点的に研究を進める必要があるという注意が、初年度の領域研究会でアドバイザーから指摘された。

その後の研究の進展により、本研究の中心課題である磁束量子の生成・制御・変調の実験的確認に成功し、ついで、その動作特性評価とデバイス応用の試みがなされた。これらの研究成果は国際的にも評価されているが、微視的機構がきわめて複雑な現象であるため、既存の理論モデルが適用できず、更に詳細な実験データの集積と理論モデルの模索が必要な段階で研究期間を終えた。

本研究でのいくつかの注目すべき成果を端緒として、より組織的な研究の発展が望まれる。

6. 主な論文リストなど

- 1) O. Morikawa, M. Yamashita, H. Saijo, M. Morimoto, M. Tonouchi and M. Hangyo
“ Vector Imaging of Supercurrent Flow in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ - Thin Films Using Terahertz Radiation ”
Appl. Phys. Lett., 75(1999)3387.
- 2) M. Tonouchi, M. Yamashita, and M. Hangyo
“ Terahertz radiation imaging of supercurrent distribution in vortex-penetrated $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ - thin film strips ”
J. Appl. Phys., 87(2000) 7366.
- 3) A. Moto, M. Hangyo, and M. Tonouchi
“ Terahertz Radiation Imaging of Vortex Penetration into YBCO Thin Films with and without Ordered Arrays of Antidots ”
IEICE Trans. Electron., Vol. E84-C, No.1, Jan. (2001) 67.
- 4) M. Tonouchi, K. Shikita, M. Morimoto, and M. Hangyo
"Optical Control of Magnetic Flux Quanta in YBCO Thin Film Loops by Selected Femtosecond Laser Pulses",
IEEE Trans. on Applied Supercond., vol. 11, No. 1, March (2001) 3939.
- 5) M. Tonouchi, A. Moto, M. Yamashita, and M. Hangyo
“ Terahertz Radiation Imaging of Vortices Penetrated into YBCO Thin Films ”,
IEEE Trans. on Appl. Supercond., 11, (2001) 3230.
- 6) M. Tonouchi
"Magnetic Flux Quanta in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ - Thin-Film Loops Controlled by Femtosecond Optical Pulses"
Jpn. J. Appl. Phys Part 2. vol.40, No.6A, 1 June (2001) L542 .
- 7) A. Moto and M. Tonouchi
“ Temperature Dependence of Supercurrent Distribution in YBCO Thin Film Strips Observed by Terahertz Radiation Imaging ” , Physica C, 357-360 (2001) 1603.

- 8) T. Fukui, A. Moto, H. Murakami, and M. Tonouchi
“ Distribution of Optically-Generated Vortices in YBCO Thin Film Strips ”
Physica C, 357-360 (2001) 454.
- 9) M. Morimoto, T. Yoshimura, and M. Tonouchi
“ Fabrication of Superconductive Optical Flux Trap Memory Cell ”
Physica C, 357-360 (2001) 1607.
- 10) H. Wald, P. Seidel, and M. Tonouchi
“ Pump and Probe Terahertz Beam Excitation Technique to Investigate
Carrier Dynamics in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ - Thin Films ” , Physica C, 357-360 (2001) 146.
- 11) M. Tonouchi and K. Shikita
“ Magnetic Flux Generation in an YBCO Thin Film Loop with a Single Shot Femtosecond
Optical Pulse ”
Physica C 367 (2002) 37-40.
- 12) T. Fukui, H. Murakami, and M. Tonouchi
“ Investigation of Optical Magnetic Flux Generation in Superconductive YBCO Strip ”
IEICE Trans. Electron. Vol. E85-C (2002) in press.

特許

- 1) 斗内、小林、村上、“光磁束変換素子、画像検出装置、画像記録装置、画像検出方法および
画像記録方法”、特願 2001-270997