

機関番号：12601

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2013～2013

課題番号：25886005

研究課題名(和文)シリコンの微小球共振器で実現する固体のレーザー冷却

研究課題名(英文)Laser cooling of solids with silicon microsphere resonators

研究代表者

宇佐見 康二(Usami, Koji)

東京大学・先端科学技術研究センター・准教授

研究者番号：90500116

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,100,000円、(間接経費) 330,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、原子気体の冷却で大成功を収めたレーザー冷却の手法を、実用的な観点からより重要な固体の冷却に適用できないかを探索するものである。当初のアイデアは、固体中のフォノンを介した光の散乱過程のうち、高いエネルギーの光が散乱される確率をシリコン微小球共振器で増強するものであった。本研究では、サブミリメートルサイズの球体の強磁性体(YIG)微小球内に励起する長寿命マグノンを介した光の散乱過程で同様の冷却ができる可能性を見出した。この成果は、世界初のマグノンのレーザー冷却の実現に結びつくものと考えられる。

研究成果の概要(英文)：We are aiming at applying hugely successful laser-cooling technique that opened new avenues in atomic physics to cooling more practically-relevant solid-state objects. The initial idea is to exploit photon-phonon scattering processes in which the processes of scattering more energetic photons are enhanced with a silicon microsphere resonator. We found that, instead of photon-phonon scattering processes, photon-magnon scattering processes could be exploited for the same purpose, especially with long-lived magnons in millimeter-sized ferromagnetic (YIG) sphere. This might lead to the first laser cooling of magnons.

研究分野：総合理工

科研費の分科・細目：応用物理・光工学・光量子科学

キーワード：レーザー冷却 微小共振器 量子光学

1. 研究開始当初の背景

(1) 固体は、低温にすると室温ではみえない様々な面白い物理を提供してくれる。たとえば、低温では、強磁性相、超伝導相のような秩序相が熱揺らぎに打ち勝って発現するし、ナノメートルスケールの構造を固体中に作りこむことで、単一電子、単一スピン、単一光子といった単一量子レベルの現象が、観測・制御可能となる。固体をこのような量子効果が顕著になるケルビン領域にまで冷却する手段は、主にヘリウムをもとにした平衡熱力学的な手法であり、高価でかつ大規模な装置を必要とする。

(2) 一方で、真空中に漂う中性原子気体は、比較的安価でエネルギー効率の高いコンパクトな半導体レーザーを利用することで、マイクロケルビンという極低温領域にまで冷却できる。レーザー冷却の機構は、照射する光のエネルギーを原子の共鳴エネルギーより小さくし、原子の運動エネルギーを奪って上準位に励起するアンチストークス吸収を優勢にすること(つまり、ドップラー効果)で原子の温度を下げるというものがある。このような非平衡熱力学的なレーザーを利用する冷却は、概念的には固体にも適用できるはずである。1995年、Epsteinらは、固体中にドープした希土類イオンを原子と見立てることで、原子の冷却と同様にしてホストとなる固体の格子振動のエネルギーを奪い、固体自体の温度を室温から0.3Kだけ冷却することに成功した。現在のところ、この手法により、固体の温度を室温から200K程度まで冷却できるようになってきた。

(3) 上記のような光の吸収特性の非対称性をもとにする冷却手法と相補的な関係にあるのが、対象物の光の散乱特性の非対称性をもとにする共振器冷却である。共振器冷却では、対象物による光散乱を光共振器によってアンチストークス散乱が優勢になるように制御することで、対象物のエネルギーを奪う。近年、共振器冷却が機械振動子のような原子様の吸収線をもたない対象物の冷却にも適用できることが認識されてきた。最近になって、ナノメートルスケールの機械振動子の固有振動モードをゼロ点振動が支配的になる領域にまで冷却する実験が報告され、この種の、巨視的な弾性体の固有振動モードを単一フォノンレベルで観測し制御するという量子オプトメカニクスへ向けた研究が活発化している。我々も、2010年から、エレクトロニクスやフォトンクスデバイスへの応用を視野に入れて、半導体薄膜の冷却実験を開始し、2012年には、ガリウムヒ素メンブレンの振動モードを共振器冷却で室温から4Kまで冷却した旨を報告した。

2. 研究の目的

量子オプトメカニクスの文脈での機械振動子の冷却が、固体自体のレーザー冷却と決定的に違うのは、前者が主に一つのフォノンモード(特に高いQ値を持つモード)の冷却および操作を念頭に置いているのに対して、後者は固体中に励起されているすべてのフォノンモードを冷却する必要がある点である。本研究の目的は、共振器冷却で後者の意味での固体の冷却を実現することである。

3. 研究の方法

(1) 共振器をもとにした固体のレーザー冷却を実現させるための最大の問題は、『いかにして非常に広帯域なフォノンモードをカバーできる光共振器を実現するか?』にある。実際、温度300Kの環境で励起されるフォノンの最大周波数は、およそ6.3THzもある。THzレベルの広帯域光共振器を実現するためには、光の波長程度のサブミクロンスケールの光共振器が必要とされる。本研究では、この問題にシリコン微小球がサポートするウィスパーリングギャラリモードを利用することで挑戦する。シリコンのような高い屈折率を持つ物質は、真空より光を局在させることができる。そのため、共振器のモード体積が小さく共振器内で発生した非弾性散乱光と共振器の結合強度の大きい光共振器を実現できる。冷却は、共振器モードの共鳴中心より低エネルギーの光を入射し、アンチストークス散乱を共振器モードに誘発することで実現される。

(2) 固体のレーザー冷却を確認するための重要な課題の一つは、光の波長と同程度の微小サンプルの冷却を確認する手法を開発することである。この問題には、ドープするエルビウム磁気応答を用いる計画である。エルビウムは、Curieの法則に従う常磁性体であるため、その磁化率を測定することでそのホストであるシリコン球の温度を見積もることができるはずである。

(3) 単一フォノンレベルでの機械振動子制御を念頭に置いた量子オプトメカニクスのコミュニティや単一発光体と光共振器との強結合を狙う共振器QEDのコミュニティが光共振器の狭帯域化(高Q化)を目指しているのに対して、本研究は固体のレーザー冷却を念頭に置いた共振器の広帯域化を目指すことに特色を持つ。本研究で提案する固体の微小共振器冷却は、従来の固体のレーザー冷却を質的に凌駕するケルビン領域への冷却を可能にする手法になるものと信じる。ケルビン領域に達する固体のレーザー冷却が実証されれば、ヘリウムベースの低温物理の実験室の様相が一変することになるばかりか、様々な実験室レベルでの低温デバイスを市場に送り出す可能性を秘める。

4. 研究成果

(1) 当初のアイデアは、固体中のフォノンを介した光の散乱過程のうち、高いエネルギーの光が散乱される確率を屈折率の大きいシリコン製の微小球共振器で増強するものであった。本研究では、比較的屈折率の大きい強磁性絶縁体、イットリウム鉄ガーネット (YIG) に着目し、YIG製のサブミリメートルサイズの微小球内に励起する長寿命マグノンを介した光の散乱過程で同様の冷却ができる可能性を見出した。この成果は、世界初のマグノンモードのレーザー冷却の実現に結びつくものと考えられる。マグノンモードの冷却は、フォノン以外では実現されていない固体内素励起の冷却の可能性を拡大するだけでなく、現在進展が著しいスピントロニクスにも甚大な意味を持つと考えられる。

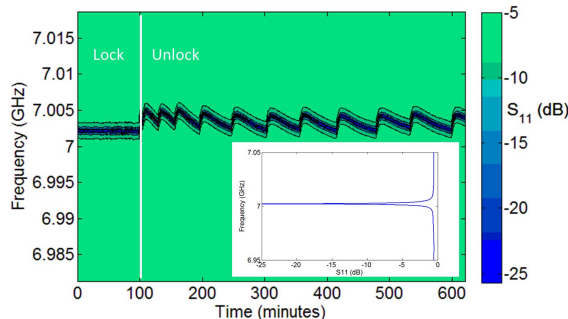


図1. マグノン周波数の時間変化

(2) 本研究では特にYIG微小球の温度を正確に測定するための系の構築を主眼に置いて研究を進めた。当初は、シリコン微小球内に常磁性体のイオンをドーブし、その磁化率測定を磁気力顕微鏡を用いて観測することで温度プローブとすることを提案していた。研究を進める中で、強磁性共鳴を用いた強磁性体の磁化率測定が温度プローブとして非常に優れていることを見出した。具体的には、YIG微小球サンプル内に励起する長寿命マグノンの周波数を測定することで、そのサンプル温度の時間変化が非常にいい精度で見積もれた。図1は、縦軸を注目したマグノンモード (Kittel モード) の磁気共鳴周波数、横軸時間として、一定磁場の下で共鳴周波数の時間変化を示したものである。挿入図は、YIGの強磁性共鳴の共鳴線幅を示した。マグノンモードの中心周波数がほぼ7GHzに対して線幅が3MHz程度という、球形YIGサンプル特有の非常に高いQ値がうかがえる。図1に示した周波数2MHz程度の揺らぎが温度にして0.5度程度であり、マグノン周波数をプローブとすることで100mK以上の分解能で温度をプローブできると考えられる。また、エネルギー保存則が成り立つような系では、周波数のような量子非破壊(QND)測定量を測定対象とするのが理想的で、温度

をマグノン周波数として観測できるYIG微小球サンプルはそのカテゴリーに入るといえる。

(3) 今後、YIG球状サンプルの冷却実験で必要とされるSNを稼ぐためには、長時間の測定が必要となる。それに向けて、マグノン周波数の安定化にも取り組み成功した。安定化の機構は、原子物理でよく利用される、FMサイドバンド法を用いた。すなわち、強磁性共鳴用に導入するマイクロ波領域のAC磁場にFM変調をかけ、その応答信号(マイクロ波の反射信号)を変調周波数で復調することで、磁気共鳴周波数のずれを検出し、その信号をエラー信号として、外部磁場にフィードバックする手法である。図1の左側は、このフィードバックをアクティブにした時の様子であり、温度変化により揺らぐマグノン周波数が安定化されていることが見て取れる。このように、本研究では、積極的に原子物理の精密分光の手法をこれまで高速分光が主であった固体物理の分野に適用する試みをいくつか始めることができたと自負している。

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 2件)

久富隆祐、宇佐見康二、山崎歴舟、田淵豊、石川豊史、佐藤琢哉、中村泰信
光による強磁性体のスピンノイズ測定
日本物理学会「2013年秋季大会」2013年9月25日~28日 於 徳島大学

久富隆祐、宇佐見康二、山崎歴舟、田淵豊、石川豊史、中村泰信
光による強磁性体の熱スピンノイズ測定
日本物理学会「第69回年次大会」2014年3月27日~30日 於 東海大学

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕
出願状況(計 0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況(計 0件)

名称：

発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等
<http://www.qc.rcast.u-tokyo.ac.jp/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

宇佐見 康二 (USAMI Koji)
東京大学・先端科学技術研究センター・准
教授
研究者番号：90500116

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：