

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 5 日現在

機関番号：12608

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K13271

研究課題名(和文)フォノン共振器と量子ナノデバイスのエネルギー変換

研究課題名(英文)Energy conversion on a quantum nano-device in a phonon resonator

研究代表者

藤澤 利正 (Fujisawa, Toshimasa)

東京工業大学・理学院・教授

研究者番号：20212186

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：半導体におけるフォノン系と量子ナノデバイスの電子系とのエネルギー変換に関する研究を進めた。具体的には、AlGaAs/GaAs半導体ヘテロ構造上の周期的金属パターンにより表面弾性波フォノン共振器を形成し、その共振器中に置かれた半導体中二重量子ドットの輸送特性から、電子フォノン結合系を評価した。フォノン支援トンネルの特性から、共振器構造によってフォノン散乱速度が約80倍に増大することを確認し、さらに、スピン反転を伴うフォノン支援トンネル現象を見出し、電子系とフォノン場とのコヒーレントに結合によるラビ分裂の効果が現れることを示した。フォノン版共振器量子電磁力学への発展性が見込まれる。

研究成果の概要(英文)：We have conducted a research on energy conversion between a semiconductor phonon system and an electronic system. Particularly an electron-phonon hybrid system is developed with a semiconductor double quantum dot in a surface-acoustic-wave phonon resonator. The device was fabricated by patterning a metal layer on the surface. Firstly, we evaluated fundamental acoustic characteristics such as the phonon band gap and resonator modes by using time-, frequency-, and space-resolved measurements for piezoelectric potential. Phonon scattering rate in the resonator is significantly enhanced by a factor of about 80, which can be enhanced further by optimizing the structure. Moreover we find novel spin-flip phonon assisted tunneling in the Pauli spin blockade regime. Intriguingly, this tunneling process probes Rabi splitting associated with coherent coupling between electron and phonon systems. The results encourage further development towards phonon version of cavity quantum electrodynamics.

研究分野：半導体量子輸送

キーワード：フォノン共振器 量子ドット 共振器電気力学

1. 研究開始当初の背景

エネルギー散逸は、物理系の特性を大きく左右する重要な問題である。散逸を減らすための努力がなされる中、物質固有の散逸機構を避けることは極めて困難である。本研究で用いる AlGaAs/GaAs ヘテロ構造半導体は、高電子移動度トランジスタ等の電子デバイス、量子ポイント接合や量子ドットなどの量子ナノデバイス、電荷/電子スピン量子ビットなどの量子情報デバイスなどの研究に用いられているが、100 K 以上の温度域での電子移動度や、低温においても励起状態からの緩和過程において、物質固有の電子格子相互作用によるフォノン散乱が本質的な散逸過程として問題となる。相互作用の小さい材料系を探索する研究が国内外で進んでいるが、散逸が皆無になるわけではない。

そこで、本研究では、この問題を直視し、散逸に伴って放出されるフォノンをフォノン共振器に蓄積し、エネルギー変換・循環により再利用する技術確立し、量子ナノデバイスの散逸抑制に関する指針を得ることを目的とした。研究開発当初にこのような考え方に基づく研究はごく少数であったが、フォノンを制御する研究の重要性は徐々に高まりつつあり、本研究はその先駆的な研究の1つになったと認識している。

幸い、量子情報素子の研究によって GaAs 系における電子とフォノンの相互作用の重要性はよく理解される状況にあり、当該の研究を開始する土壌はできつつあった。当時、超伝導素子(量子ビット)と表面弾性波フォノンとの結合に関する実験も開始された時期であったことから、これと相補的な関係にある半導体量子ドットを用いた研究は意義が大きい。超伝導物質では、フォノンによってクーパー対が安定化し超伝導状態に相転移する。このような機構のない半導体では、フォノン散乱が散逸の大きな要因となっていることから、半導体を用いた電子-フォノン結合系でのエネルギー変換の研究を進めることは大変重要で意義のある研究である。

我々の研究室では、GaAs 系の二重量子ドットの二準位系を用いた電荷量子ビットや二量子ビットのコヒーレント制御に成功し、その散逸の主要因がフォノン散乱であることを明らかにしており、電子格子相互作用に関する知見を有していた。また、表面弾性波の照射実験から、表面弾性波フォノンと電子系の結合が顕著であることを見出し、表面弾性波共振器の作製についての予備実験も行っていった。このような背景から、電子・フォノン結合系でのエネルギー変換の研究計画を立案し、2年間の挑戦的萌芽研究を遂行した。

2. 研究の目的

本研究「フォノン共振器と量子ナノデバイスのエネルギー変換」では、半導体表面のナノ構造によって形成されたフォノン共振器

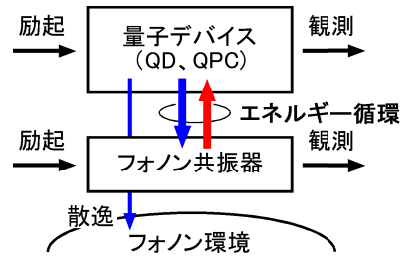


図1 研究の概念図

中のフォノン系と量子ナノデバイスの電子系とのエネルギー変換に関する基本技術確立することを目的とした。図1のその概念図を示す。具体的には、GaAs 半導体表面に作製した周期的金属パターンにより表面弾性波フォノンの禁制帯や共振器を形成し、半導体中の二次元電子で形成される量子ドットや量子ポイント接合などの量子ナノデバイスを用いて研究を進めることとした。

具体的には、2つの目標を設定した。

(1) 半導体表面に微細金属構造を形成することにより、フォノン禁制帯やフォノン共振器を作製し、その中に量子デバイスを作りこむことによりフォノン-電子の結合系を実現する。フォノン系から電子系、電子系からフォノン系へのエネルギー変換に関する実験から、結合強度などの重要な情報を得る。

(2) 上記研究を発展し、フォノン共振器中の量子ナノデバイスにおけるエネルギー循環を実現し、電子系が散逸したエネルギーの再利用を可能にする。コヒーレントなエネルギー再利用に関する検討を行い、フォノン版の共振器電磁気学(cavity QED)の実現指針を得る。

(発展) 発展的な課題として、電子系とフォノン(表面弾性波)との結合により、ラビ分裂・ラビ振動などのコヒーレント現象を観測することを将来構想として設定した。

これらは、量子ナノデバイスにエネルギー循環(リサイクル)機能を持たせ、コヒーレントな電子フォノン結合(フォノン版共振器量子電磁気学)や、高強度のフォノン場を利用した新しい電子状態制御技術につながる点で、意義のある研究である。

量子デバイスの諸問題の多くは、位相緩和とエネルギー緩和(散逸)に帰着される。位相緩和に関しては磁気共鳴のスピンエコーに代表される rephasing の手法が定着しているが、散逸を抑制する手法は十分に確立されていない。本研究は、量子光学で培われた共振器電磁気学に注目し、電子系とフォノン(表面弾性波)との結合により、フォノン版共振器電磁気学の創成を目指した挑戦的萌芽的な研究テーマである。

以下で報告するように、目標(1)は実現し、目標(2)は想定した方法とやや異なる形態での実現に至った。さらに、(発展)の課題につ

いても部分的に実現しており、総合的に十分な成果があったと考える。

3. 研究の方法

本研究では、AlGaAs/GaAs 変調ドープヘテロ構造に金属パターンの構造を設計/作製することにより、表面弾性波フォノン共振器と量子ナノデバイスの結合系を実現し、電子系とフォノン系とのエネルギー変換の測定から真空ラビ結合などの基本特性を評価するとともに、フォノン版共振器量子電磁気学の発展性の指針を得ることとした。

具体的には、

- (1) フォノン共振器の設計、
- (2) 半導体ナノ構造作製プロセス、
- (3) 高周波による表面弾性波共振器の評価
- (4) 極低温における表面弾性波・量子輸送特性の評価

によって研究を実行した。

4. 研究成果

代表的な研究として下記の成果を得た。

(1) 電子-フォノン ハイブリッド系の構築

本研究を遂行するためには、良質な電子-フォノン結合系の試料を作製することが重要である。図2のように AlGaAs/GaAs 二次元電子系ヘテロ構造の表面に周期的金属パターンを形成し、両側の約 200 本の格子によって表面弾性波フォノンのブラッグミラーを形成し、中央の間隙 D (キャビティ寸法) を選ぶことで、フォノンの閉じ込めモードを設計した。さらに、中央部分のゲート電極によって二重量子ドットを形成することができる。このような素子によって、電子-フォノン ハイブリッド素子を作製した。

(2) フォノン禁制帯の測定

図3aのように、共振器長 D が非常に長い試料を用いてブラッグ反射鏡(BR)の反射特性を評価した。左側のブラッグ反射鏡は、交差楕形電極 (IDT) を兼ねており、高周波電源に接続することにより表面弾性波を発生することができる。ここでは、バースト波形の表面弾性波を発生し、左・右のブラッグ反射鏡によって多重反射される様子を時間分解測定で行った。中央のゲート G_0 - G_5 は、量子ポイントコンタクト (5ヶ所のうち1ヶ所を選択) であり、局所的なピエゾポテンシヤ

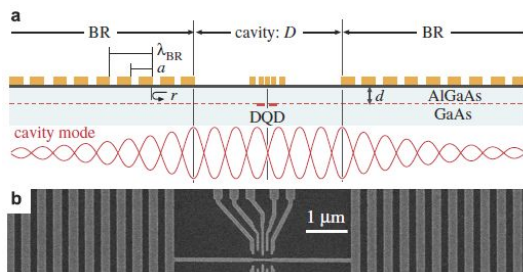


図2 電子-フォノン ハイブリッド素子

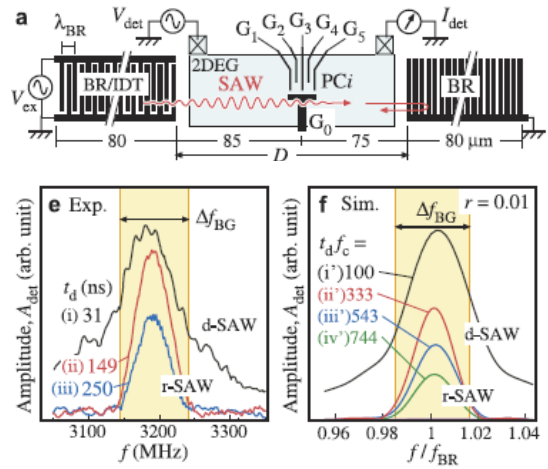


図3 フォノン禁制帯の測定

ルを時間分解で測定するために、検出用の高周波バースト信号 V_{det} をソース電極に印加し、その応答を DC 電流 I_{det} で評価した。

その結果が図3eに示されており、SAW 直接波 (d-SAW) は IDT 電極の特性で表される比較的ブロードな周波数特性を示すのに対して、ブラッグ反射鏡で反射された波 (r-SAW: (ii)は1回反射後、(iii)は2回反射後) は、特定の周波数範囲内ではしか観測されない。これは、ブラッグ反射鏡内でのフォノン禁制帯が形成されたことを反映した結果である。

図2fは、数値計算によるシミュレーションを表しており、金属端における表面弾性波の反射係数 $r = 0.01$ とした場合の計算によって、実験結果をほぼ再現している。

(3) フォノン共振器の特性

図4のように共振器長 D を短くすると、単一モードの表面弾性波共振器が期待される。ここでは、IDT 自体の周波数特性が反映されることのないように、電気的に励起する IDT 電極を 10 ペアと十分に少なくした試料を用いて実験を行った。その周波数特性には、 Q 値 2400 程度の鋭い共鳴ピーク (peak I) が観測され、良好な共振器が形成されていることを確認した。

また、120 nm ずつ離れた5つの量子ポイントコンタクトでの時間分解波形を比較すると、図4b挿入図のように、PC1-3とPC4-5で明瞭な位相反転が観測される。これは、このモードが定在波を示していることを示しており、定在波の節がPC3近傍に形成されていることから、所望のフォノン共振器モードが形成できていることを示している。

周波数スペクトルには他のピーク (II, III) も観測されているが、量子ドットを形成するためのゲート電極によって、1次元共振器構造に影響を与えている可能性がある。

なお、本研究の手法は、二次元電子系が感じるピエゾポテンシャルを直接的に検出している点に大きな特徴があり、電子系への影響を定量的に予測することができ、次の実験(5)(6)へ進むための重要なデータとなった。

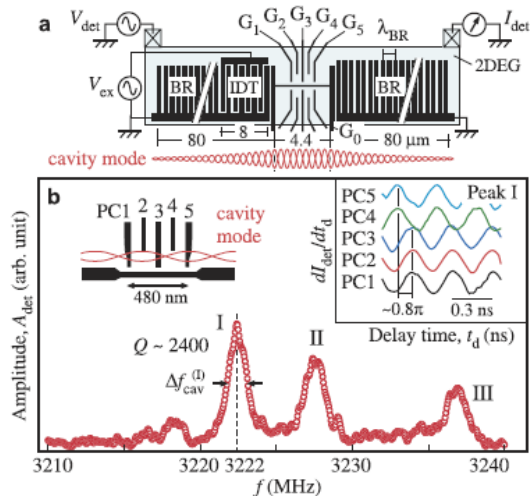


図4 フォノン共振器特性

(4) 金属パターンの最適化

上記のフォノン共振器は、GaAs 系ナノ構造でよく用いられている Ti/Au 積層構造を用いて作製した。しかし、本研究の目的には、フォノン禁制帯幅が大きく、フィネスの大きな共振器を作製することが重要である。そこで、金属の種類を変えて、構造を最適化することが必要である。これは、GaAs と金属との弾性定数によって決まるが、実際に作製される薄膜での特性は実験的には明らかになっていなかった。そこで、金属の種類や膜厚によって、金属膜領域での表面弾性波速度や、金属膜と自由表面の境界での反射率が、どのように変化するのかを系統的に調べた。これ

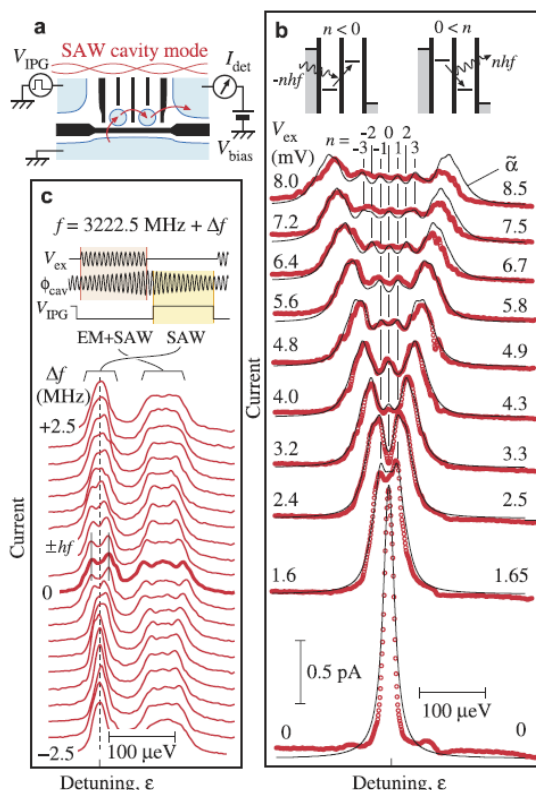


図5 フォノン支援トンネル特性

は、良質な共振器を作製する上での貴重なデータとなるものである。(国際会議投稿中。論文準備中)

(5) フォノン支援トンネル

図5は、フォノン共振器中に置かれた二重量子ドットの輸送特性を示している。フォノンの共振周波数 $f = 3222.5$ MHz の高周波を印加すると、量子ドット間のフォノン支援トンネルを誘起することができる。図5bは、ゲート電圧によって二重量子ドットのエネルギー差 ϵ を変化しながら、量子ドットを流れる電流を測定したものである。表面弾性波を印加しない場合 ($V_{ex} = 0$) には、量子化準位間の共鳴トンネルによる単一の電流ピークのみが観測されている。

共振器内に表面弾性波を蓄積すると、フォノンエネルギー ($13 \mu\text{eV}$) の間隔で複数のピークに分裂する様子が観測された。これは、共振器中のフォノンエネルギーを電子が吸収することによってトンネルする (挿入図の $n < 0$) 場合と、放出する ($n > 0$) 場合によって生じているものであり、量子ドットとフォノン共振器間でのエネルギー輸送について実現されたとみなすことができる。

(6) スピン反転フォノン支援トンネル

当初の計画では想定していなかった内容ではあるが、スピン反転を伴うフォノン支援トンネル現象を見出した。従来から磁場中のゼーマン分離を用いたスピン反転トンネル過程が報告されていたが、これは無磁場で生じるスピン反転トンネルである点で新奇性がある。

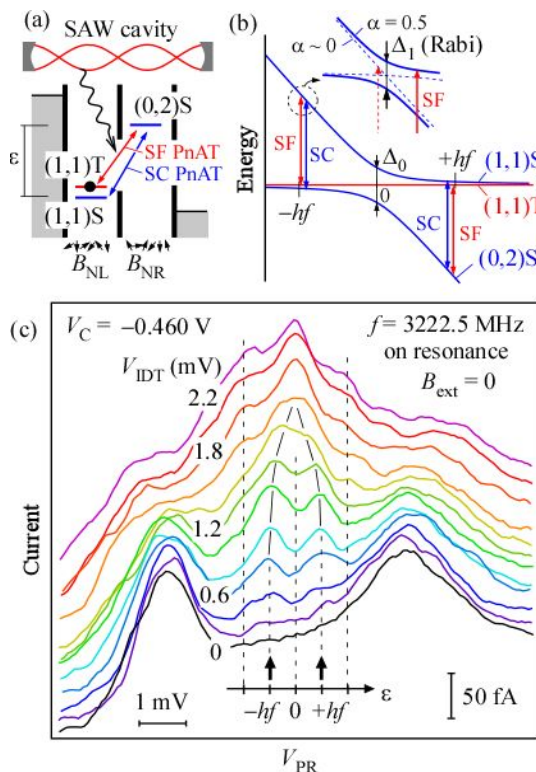


図6 スピン反転フォノン支援トンネル

スピン反転の機構は、母体 GaAs の核スピン揺らぎによって不均一なオーバーハウザー有効磁場が働くためにおこるもので、スピン閉塞領域における二電子系において明瞭に観測される。特に興味深いのは、このスピン反転(SF)フォノン支援トンネル(PnAT)には、スピン保存(SC)のフォノン支援トンネルに起因するラビ分裂の情報が含まれる点である。

図 6 (a)のように、スピン一重項同士(1,1)S から (0,2)S へのスピン保存遷移(SC-PnAT)は、ラビ分裂を引き起こすが、スピン閉塞状態にある電子はスピン三重項(1,1)T にあるのでこの実遷移は実際にはおこらない。しかし、コヒーレントなフォノン場によってラビ分裂は生じている。ここで、スピン三重項(1,1)T からスピン一重項への遷移(SF-PnAT)を観測すると、その条件にはラビ分裂によるエネルギーシフトが影響する。

実験結果は、図 6 (c)に示すように表面弾性波の励起によって SF-PnAT に起因する電流ピークが観測される($\varepsilon = \pm hf$)。このピーク位置に注目すると、強励起になってラビ分裂が顕著になると 2 のピークが近接して 1 つになる。この様子は、上記のラビ分裂を考慮した理論計算ともよく一致する。(論文投稿中)

上記のラビ分裂は、電子系とフォノン系とがコヒーレントに結合した状態が形成されていることを示しており、本研究で発展的課題として想定していた内容に達していることを示している。

(7)フォノン版共振器量子電磁気学への展望

上記で述べたように、電子系とフォノン系とのコヒーレントな結合に成功した。このことは、いわゆる真空ラビ分裂(真空状態から 1 量子エネルギー分だけ高い状態間のコヒーレント結合)に向けて大きく前進した成果である。

現状の試料において真空ラビ分裂の大きさは、フォノン共振器の減衰速度よりも大きいものの、GaAs の電子系の散逸速度よりも 1 桁程度小さいものに留まっている。(4)で述べたようなフォノン共振器構造の最適化を図ることにより、真空ラビ分裂を強結合領域にできる可能性があり、将来の指針が得られたと考えている。

すなわち、本研究計画では、電子フォノン結合系において、古典的なエネルギーの移送を目的として研究し、(5)の実験によってそれは達成された。さらに、将来計画として目指したコヒーレントな結合についても、(6)のコヒーレントフォノンに対するラビ分裂としては実現した。(7)で真空ラビ分裂への指針も得られ、フォノンを用いた量子音響学と呼べる研究領域の創造も夢ではなくなった。

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 1 件)

J. C. H. Chen, Y. Sato, R. Kosaka, M. Hashisaka, K. Muraki, and T. Fujisawa, "Enhanced electron-phonon coupling for a semiconductor charge qubit in a surface phonon cavity", *Sci. Rep.* 5, 15176 (2015) doi:10.1038/srep15176.

〔学会発表〕(計 7 件)

T. Fujisawa, "Cavity quantum acoustics with a double quantum dot", SPICE Workshop Quantum Acoustics - Surface Acoustic Waves meets Solid State Qubits, Mainz, Germany (May17-20, 2016). (招待講演)

Y. Sato, J. Chen, R. Kosaka, M. Hashisaka, K. Muraki, and T. Fujisawa, "Enhanced transition between charge states and spin states of a double quantum dot in a surface acoustic wave cavity", SPICE Workshop Quantum Acoustics - Surface Acoustic Waves meets Solid State Qubits, Mainz, Germany (May17-20, 2016).

Y. Sato, J.C.H. Chen, M. Hashisaka, K. Muraki, and T. Fujisawa, "Phonon-assisted Transport through a Double Quantum Dot in a Surface Acoustic Wave Cavity", A10-8, 5th Summer School on Semiconductor Quantum Coherence Effects and Quantum Information, Nasu, Japan (Sep. 10-12, 2015)

Y. Sato, J.C.H. Chen, M. Hashisaka, K. Muraki, and T. Fujisawa, "Spin-Flip Transport through a Double Quantum Dot in a Surface Acoustic Wave Cavity", Tu-A3-2, 21st International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS), Sendai, Japan (Jul. 26-31, 2015).

藤澤利正, 佐藤裕也, J. C. H. Chen, 橋坂昌幸, 村木康二, 「表面弾性波による二電子系二重量子ドットのラビ分裂」, 15aAB-7, 日本物理学会 2016 年秋季大会、金沢大学(金沢市) (2016.9.13-16)

藤澤利正, 「表面弾性波による量子ドット中のスピン状態制御」, スピントロニクスイノベーション研究推進体研究会、東京工業大学 (2015/8/28)

佐藤裕也, Jason Chen, 橋坂昌幸, 村木康二, 藤澤利正, 「表面弾性波共振器中の二重量子ドットの電子スピン輸送特性」, 第 22 回量子情報関東 Student Chapter 研究会、東京工業大学 (2015/5/13)

〔図書〕(計 0 件)

なし

〔産業財産権〕

なし

出願状況（計0件）

取得状況（計0件）

〔その他〕

ホームページ

<http://fujisawa.phys.titech.ac.jp/>

6．研究組織

(1)研究代表者

藤澤 利正（FUJISAWA, Toshimasa）

東京工業大学・理学院・教授

研究者番号：20212186

(4)研究協力者

佐藤 裕也（SATO, Yuya）

高須 亮（TAKASU, Ryo）