

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 10 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25600014

研究課題名(和文)ゲルマニウム室温ランダウ量子振動素子の創製

研究課題名(英文)Development of germanium based Landau quantum oscillation devices at room temperature

研究代表者

安武 裕輔 (Yasutake, Yuhsuke)

東京大学・総合文化研究科・助教

研究者番号：10526726

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)：シリコン基板上の伸張歪ゲルマニウム・量子井戸構造によるバンド・バレー制御を基盤技術として、共鳴光励起・熱電子緩和利用による室温動作ランダウ量子振動素子を創製に関する研究を行った。

(1)30バンドk・p摂動法によるバレー選択光励起法の開発、(2)時間分解円偏光フォトルミネッセンスによる伸張歪Geへの室温光スピン注入、(3)Ge多重量子井戸への375Kの高温光スピン注入を実証し、磁場中の円偏光蛍光観察から熱電子のバレー散乱を利用した電流駆動室温量子振動素子の動作を確認した。

研究成果の概要(英文)：Aim of this study was development of germanium based Landau quantum oscillation devices operated at room temperature by using band engineering and valleytronics based on tensile strained germanium on silicon and germanium quantum well structures.

We have demonstrated (1)a selective valley optical excitation method by 30 band k・p perturbation theory, (2)optical spin injection into tensile strained germanium at room temperature by time-resolved circular polarized photoluminescence, (3) optical spin injection into germanium multiple quantum wells above 375 K. We have verified the current driven Landau quantum oscillation devices by utilizing inter-valley scattering of hot electron even at room temperature.

研究分野：半導体物性

キーワード：半導体 ゲルマニウム ランダウ準位 室温量子振動 スピン注入

1. 研究開始当初の背景

IV 族半導体ゲルマニウム(Ge)は、同族半導体であるシリコン(Si)ウェハ上における結晶成長技術の蓄積・CMOS 加工技術との高い適合性から次世代電子材料の基盤材料として重要である。一方、Ge の直接遷移端の発光波長が通信波長(1.55 μm)に適合することから、IV 族半導体モノリシック光集積回路の光エミッタの候補としても注目されている。さらに Ge は反転対称性を有するダイヤモンド構造であり、高いキャリア移動度を有し、270meV と比較的大きいスピン軌道相互作用は Rashba 効果による電界効果スピン操作の可能性から、スピン輸送層のプラットフォームとしての期待も高い。

Beyond CMOS としてシリコン基板上における Ge ベースモノリシック光集積回路、スピントロニクスの実現・融合にむけて、IV 族半導体ベースのスピン偏極に敏感な光エミッタ・検出器や新規動作原理を有するスピン素子の実現が渴望されている。スピントロニクスを志向する上で(1)半導体へのスピン注入・操作・検出技術の確立、(2)スピン敏感なエネルギー準位(Zeeman 分裂・Landau 準位)の積極利用が重要な課題である。

2. 研究の目的

本研究では、シリコン基板上の伸張歪みゲルマニウム・ゲルマニウム量子構造を対象として、共鳴励起・ホットエレクトロン励起を利用し、室温生存可能な Landau 準位を基本とした、室温動作ランダウ量子振動素子(スピンフィルタ、波長多重円偏光光源、量子標準素子)を創製することを目的とする。

3. 研究の方法

(1)Ge バレー選択と広温度領域における直接遷移端の活性化

間接遷移半導体である Ge の直接遷移端の活性化には、バレー間散乱が支配的なため、歪み・量子構造によるバンド制御と併せて、波数空間上の緩和を含めた励起方法の開発が重要である。また Ge 直接遷移端の潜在性を探る上で、熱擾乱の少ない低温から室温領域まで探ることは必須であり、従来の手法では不可能であった広い温度領域での測定手法の確立は新規物性評価に重要である。バンド計算から波数空間上でのキャリア緩和を考慮した Ge 光励起マップを作成し、より効率的なバレー選択励起法の実証を行う。

(2)Ge への室温スピン注入の実証

IV 族スピントロニクスの実現を目指す上で、半導体中へのスピン注入の実証は必須である。特に間接遷移端と直接遷移端のエネルギー差が小さい Ge において、バレー散乱を介した上でのスピンの保持・失活に関する知見は重要である。そこでバルク Ge、Si 基板上伸張歪 Ge、Ge 量子井戸において、円偏光フォトルミネッセンス(PL)を介した光スピン注入と検出を行う。

(3)室温量子振動発光素子の創製

量子振動・光スピン融合素子を指向する上で磁場中における発光現象の追跡は必須である。上述した直接遷移の効率の励起法を用いて低温・室温における Ge 直接遷移端の磁場依存円偏光測定を行い、熱い電子を利用した Landau 準位由来量子振動の実証を行う。

また実素子展開を志向する上で、電流駆動は必須である。電流注入による室温量子振動も併せて実証する。

4. 研究成果

(1)Ge バレー選択と広温度領域における直接遷移端の活性化

30 バンド $k \cdot p$ 摂動法を用いて波数空間電荷分離を考慮した光吸収マッピングを作成(図 1)し、近赤外光源による直接遷移端の共鳴励起と併せて、M1 型 van Hove 特異点選択励起による間接遷移端の活性化を見出した。この手法を用いることで、従来低温(150K 以下)では観察が難しい直接遷移端発光を広温度領域で追跡可能(図 2)となるだけでなく、間接遷移端を利用した高効率薄膜太陽電池の新たな設計指針に繋がる。

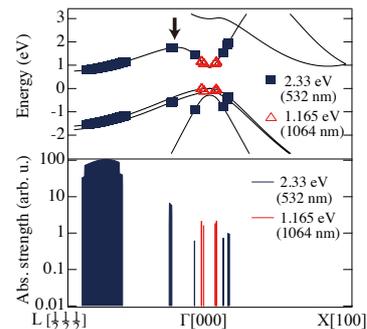


図 1 Ge バンド図と吸収マップ

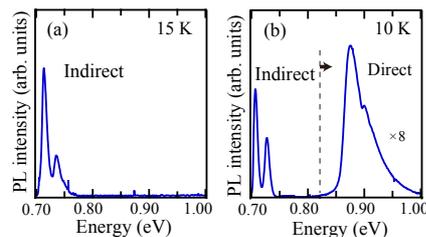


図 2(a)Ge 間接遷移選択励起(532nm 励起)
(b)Ge 直接遷移端選択励起(1064nm 励起)

(2)Ge への室温スピン注入の実証

まず超高真空固体ソース分子線エピタキシー装置を用いて、シリコン基板上伸張歪 Ge 薄膜の作製方法の確立を行った。次に室温において直接遷移端選択励起可能な 1064nm 光源を用いた円偏光 PL 観察から、明瞭な円偏光発光を観察し、室温での伸張歪 Ge への光スピン注入に初めて成功した。これは Si 基板上への Ge 結晶成長時に導入される結晶欠陥が非発光中心として作用し、スピン不敏感な間接遷移端発光を抑制する一方、サブナノ秒程度の再結合寿命を有する直接遷移端が強調された結果である。そのため間接遷移端発

光が直接遷移端発光に重畳するバルク Ge では定常励起による室温での光スピン注入効果の観察は困難であった。そこでパルス光源を用いた時間相関単一光子検出法によるゲーティングを適用することで、バルク Ge の直接遷移端における室温光スピン注入を抽出することに成功した(図 3)。

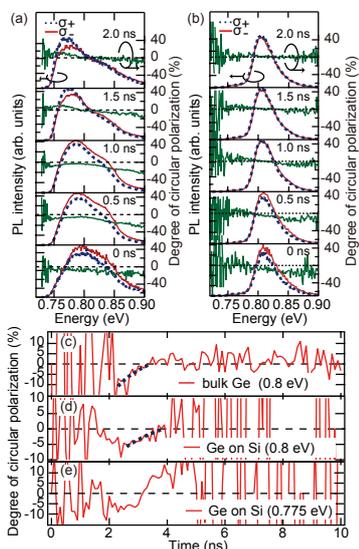


図 3 (a)伸張歪 Ge-on-Si の円偏光時間分解 PL (b)バルク Ge の円偏光時間分解 PL (c)-(e)円偏光 PL の時間プロファイル

また Ge 基板上に作製した Ge 多重量子井戸において、375K 以上の高温において明瞭な光スピン注入を観察した。また低温だが間接遷移端への光スピン注入も観察した(図 4)。高温領域での明瞭な円偏光 PL は実デバイスを志向する上で非常に有効である。また観察された円偏光度の極性から、直接遷移端に励起された HH 由来スピン偏極電子がスピン情報を保持したまま間接遷移端にバレー間散乱を介して注入されていることを示唆しており、共鳴励起以外の新たなスピン注入方法として重要な結果である。

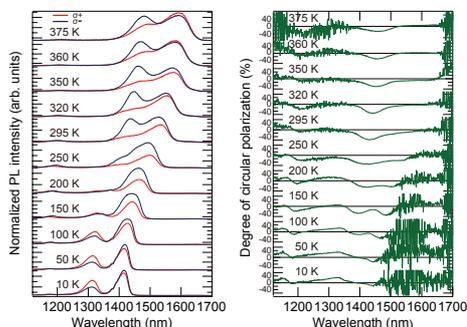


図 4 Ge 多重量子井戸の円偏光 PL 温度依存性

(3)室温量子振動発光素子の創製

上述の成果を踏まえて、室温における共鳴励起磁場円偏光 PL を測定したところ量子振動由来の円偏光度の振動を観察した(図 5)。

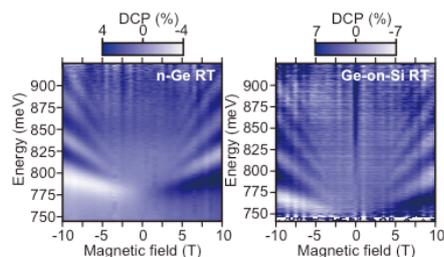


図 5 バルク Ge と伸張歪 Ge の磁場円偏光 PL の円偏光度マッピング

通常 Landau 準位由来の量子振動を観察するにはサイクロトロン周波数が散乱時間よりも十分長く、エネルギー準位が熱エネルギーよりも十分大きい必要があるため、室温での量子振動発現が困難となっている。直接遷移端共鳴励起による熱い電子(高い電子温度)による Fermi-Dirac 分布の広がりや直接-間接間バレー散乱による非常に早い電子緩和の融合により、Landau 準位の室温での観察に至ったものと考えられる。これは間接・直接端の両方にアクセス可能な Ge の特徴であると考えられ、Ge を用いた新規スピン素子の可能性を示している。また今回得られた知見は他のマルチバレー半導体(MoS₂ 等)にも適用可能である。また伸張歪 Ge における磁場中エレクトロルミネッセンスにおいても明瞭な量子振動を観察し、新規スピンフィルタ・円偏光波長多重発光素子を実現する上で重要な知見を得た。

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 5 件)

- ① S. Iba, H. Saito, S. Yuasa, Y. Yasutake, and S. Fukatsu, “Fabrication of Ge-based light-emitting diodes with a ferromagnetic metal / insulator contact”, Jpn. J. Appl. Phys. **54**, 04DM02-1-4 (2015). DOI:10.7567/JJAP.54.04DM02 査読有
- ② T. Sakamoto, S. Hayashi, Y. Yasutake, and S. Fukatsu, “An alternative route for efficient optical indirect-gap excitation in Ge”, Appl. Phys. Lett. **105**, 042101-1-4 (2014). DOI: 10.1063/1.4891755 査読有
- ③ Y. Miyake, Y. Yasutake, and S. Fukatsu, “Morphology-driven Stark shift switching in Ge/Si type-II heterointerfaces”, Advanced Materials Research **893**, 39-44 (2014). DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.893.39 査読有
- ④ M. Matsue, Y. Yasutake, S. Fukatsu, T. Hosoi, T. Shimura, and H. Watanabe, “Strain-induced direct band gap shrinkage in local Ge-on-insulator structures fabricated by lateral liquid-phase epitaxy”, Appl. Phys. Lett. **104**, 031106-1-4 (2014). DOI:10.1063/

- 1.4862890 査読有
- ⑤ Y. Yasutake, S. Hayashi, H. Yaguchi, and S. Fukatsu, "Observation of optical spin injection into Ge-based structure at room temperature" Appl. Phys. Lett. **102**, 242104-1-4 (2013). DOI:10.1063/1.4811495 査読有
- [学会発表] (計 13 件)
- ① 松下智昭、安武裕輔、揖場聡、齋藤秀和、湯浅新治、深津晋、"伸張歪ゲルマニウムにおける間接 L バレー端の円偏光蛍光"、第 62 回応用物理学会春季学術講演会 12p-A16-4, 2015.3.12 東海大学(神奈川・平塚)
- ② 安武裕輔、深津晋、"Si(111)基板上化学修飾ゲルマニウムの作製"、第 62 回応用物理学会春季学術講演会 12p-A16-8、2015.3.12 東海大学(神奈川・平塚)
- ③ T. Sakamoto, S. Hayashi, Y. Yasutake, S. Fukatsu, "Valley-Selected Interband Absorption in Ge", 2014 Materials Research Society Fall Meeting, 2014.11.30-12.05, Hynes Convention Center, Boston, MA. (USA)
- ④ S. Hayashi, T. Tayagaki, Y. Okawa, Y. Yasutake, H. Yaguchi, Y. Kanemitsu, S. Fukatsu, "Parallel- Antiparallel Spin Orientation Control In The Conduction Band Valleys Of Ge", 2014 European Materials Research Society Fall Meeting, 2014.9.15-18, Warsaw University of Technology, Warsaw (Poland)
- ⑤ 安武裕輔、矢口裕之、深津晋、"Ge の磁場中時間分解円偏光フォトルミネッセンス"、第 75 回応用物理学会秋季学術講演会、17p-PA3-7, 2014.9.17 北海道大学(北海道・札幌)
- ⑥ 坂本哲也、安武裕輔、深津晋、"半導体のバレー選択が可能新しい共鳴光励起法の開発"、第 75 回応用物理学会秋季学術講演会、19a-A26-5, 2014.9.19 北海道大学(北海道・札幌)
- ⑦ 大澤茜、安武裕輔、深津晋、"Spin-on dopant を用いた Ge 表面改質による PL 発光増強"、第 61 回応用物理学会春季学術講演会 18p-F9-7、2014.3.18. 青山学院大学(神奈川・相模原)
- ⑧ 坂本哲也、安武裕輔、深津晋、"Ge 伝導帯バレーの選択的光学励起法"、第 61 回応用物理学会春季学術講演会 19a-E11-5、2014.3.19. 青山学院大学(神奈川・相模原)
- ⑨ Y. Miyaka, Y. Yasutake, and S. Fukatsu, "Morphology-driven Stark shift switching in Ge/Si type-II heterointerfaces", 2013 3rd International Conference on Advanced Materials and Engineering Materials, 2013.12.15 The Peninsula Excelsior Hotel Singapore, Singapore (Singapore)
- ⑩ S. Fukatsu, Y. Terada, S. Hayashi and Y. Yasutake, "Bulk Ge Revisited: Toward

- Group-IV Interband Laser", The 3rd International Symposium on Photonics and Electronics Convergence, 2013.11.20, The University of Tokyo, Tokyo (Japan)
- ⑪ 安武裕輔、矢口裕之、深津晋、"Ge/SiGe 多重量子井戸への室温光スピン注入"、第 74 回応用物理学会秋季学術講演会 16p C15-3、2013.9.16. 同志社大学(京都・京田辺)
- ⑫ 松江将博、安武裕輔、深津晋、細井卓治、志村孝功、渡部平司、"横方向液相成長によって作製した GOI 構造のフォトルミネッセンス測定"、第 74 回応用物理学会秋季学術講演会 18a-B4-7、2013.9.18. 同志社大学(京都・京田辺)
- ⑬ 大村史倫、安武裕輔、深津晋、"粗面反射光シミュレーションの検討"、第 74 回応用物理学会秋季学術講演会 18a-C13-2、2013.9.18. 同志社大学(京都・京田辺)

[その他]
ホームページ等
<http://maildbs.c.u-tokyo.ac.jp/~fukatsu/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

安武 裕輔 (YASUTAKE, Yuhusuke)
東京大学・総合文化研究科・助教
研究者番号：10526726