

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 8 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25246021

研究課題名(和文) 直接遷移バレーへの電子注入による室温動作近赤外ゲルマニウムレーザーの開発研究

研究課題名(英文) Development of near-infrared germanium laser operating at room temperature using electron injection into the direct-gap valley.

研究代表者

深津 晋 (FUKATSU, Susumu)

東京大学・総合文化研究科・教授

研究者番号：60199164

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 35,100,000円

研究成果の概要(和文)：ゲルマニウム(Ge)は室温の直接遷移発光が光通信帯波長をカバーし、CMOSプロセス適合性と移動度の高さからチップ搭載・光電子ハイブリッド集積への最短距離に位置している。本研究では、間接遷移半導体Geの直接遷移を利用した室温近赤外レーザーの開発を目指した。これにより歴史的難題であった間接遷移攻略を達成するとともに、直接遷移バレーへの効率的な電子注入を可能にする外場制御型バレートロニクスの開拓を模索した。研究を通じて非平衡電子、バレー間結合、室温ランダウ準位観測、共鳴電子ラマン遷移などGeに特異的な物性への理解を深めるとともにバンド間遷移レーザーの新原理創成につながる知見を集積した。

研究成果の概要(英文)：Germanium (Ge) is the frontrunner in pursuit of integrating and/or hybridizing the photonic/electronic functionalities on one chip. This is due to the fact that its direct-band-gap emission covers the telecommunication wavelengths besides the compatibility with silicon processing and inherent high carrier mobility. An attempt was made to create a new class of near-infrared interband lasers operating at room temperature using such direct-band-gap emission of Ge. We aimed at defeating the otherwise intractable indirect-gap nature of Ge through the development of a viable valleytronic technique that allows efficient electron injection to the direct conduction-band-valley with an applied field. A deeper physical insight was gained into some of the Ge-specific properties such as hot electrons, intervalley coupling and its impact on the room-temperature Landau splitting, and resonant electronic Raman scattering, which likely make inroads into a new realm leading to novel group-IV lasers.

研究分野：応用物理学

キーワード：ゲルマニウム レーザー 直接遷移 電子制御バレートロニクス 量子カスケード類似構造 熱い電子
バレー間ファノン散乱 直接バレー電子注入

1. 研究開始当初の背景

○なぜ今、ゲルマニウム(Ge)か？

高度情報化社会を支えるエレクトロニクスはバンド物理の勝利の証しである。Geはかつてその中心的存在であった。その後、Siに世代交替したが、電荷輸送特性に比べて発光特性が芳しくないことは共通している。これはダイヤモンド構造に由来する生来の「間接遷移」のせいである。この間接遷移の攻略によってもたらされるIV族半導体レーザーは、バンド物理のみならず物質科学の究極目標のひとつに数えられている。現在、ゲルマニウムの「直接遷移」に期待が集まっている。

今世紀初頭、ポストCMOSテクノロジー、光電子集積への立役者としてIV族フォトニクスが誕生した。目下、シリコンエレクトロニクスと光テクノロジーの融合「光電子集積」が急ピッチで進行中である。光通信帯に適合するGeのオンチップ光源は、その牽引役となるべき存在である。

Geレーザーの意義は、第一に人工の産物である化合物半導体の席卷状態からの解放である。資源とシリコンプロセス適合性の観点でもGeは他者の追従を許さない。現代版の産業革命とも言える単一の成功事例が、低迷の続く半導体業界に新産業のシーズと大きな経済効果をもたらすことが期待できる。

Ge光源の台頭は、脱レアアース化の促進、クリーンかつグリーンなテクノロジーに直結し、製造・廃棄にともなう生態系・環境負荷を抑制、持続可能な社会の形成に貢献できる。さらにGeの直接遷移は、長波長吸収型太陽電池の出現を意味し、一石二鳥の効果がある。光通信・エレクトロニクス分野から熱い視線を浴びるIV族導波路や受動素子群は、既に実用化の段階に達している。光源に期待が集中する中、我が国主導でいち早く室温発振Geレーザーを実現することは、学理の探求にとどまらず、技術ただ乗りからの脱却し、国際的に優位、先導的な立場を確保する上において真に国益に叶うものであると言える。

○「直接遷移バレー」が発光？

間接(双極子許容)遷移は、結晶運動量の保存則に縛られる。間接遷移攻略の系譜は、超格子バンドから特異な電子状態の利用に至るまでまさに人智の集大成と言える。しかし、いつしかIV族の光利得は界面・格子欠陥の独壇場と化してしまった感がある。結晶電子状態への回帰は、時代の要請でもある。

Geの励起状態である直接伝導帯バレーは、室温で間接バレーより0.13 eV程度上方に位置する。常識的にはエネルギー緩和のせいで直接バレーの発光は観測できない筈である。ところが選択励起では直接端が高輝度発光することが、近年の研究から判明しつつある。

つまり直接バレーへの電子注入を制御することが、バンド間遷移型Geレーザーの実現に直結する。本研究の動機の原点は、まさにここにある。

2. 研究の目的

Geは室温の直接遷移発光が光通信波長帯をカバーし、CMOSプロセスへの適合性と移動度が高いことからチップ搭載・光電子ハイブリッド集積への最短距離に位置している。

本研究では、間接遷移半導体であるゲルマニウムの「直接遷移」を利用して新原理に基づく室温近赤外レーザーの開発を目指した。直接遷移バレーに効率的に電子注入を行う方法論の開発をターゲットに据え、Geの特徴的な物性に基づいたトンネル結合による量子カスケード構造や電場ヒーティングなど電子注入の方法論を総合的に検討した。

これにより歴史的難題であった間接遷移攻略の達成とともに外場(電場)で制御するバレートロンニクスの可能性を模索した。

3. 研究の方法

室温Geレーザーの発振を視野に入れ、直接バレーへの電子注入の新規方法論を実証的に調べた。とくに電(外)場制御型の効率的な電子注入法の開発を目指した。

予備検証から多谷間半導体のGeでは非平衡電子が容易に発生することが判っており、トンネル結合を含めた実(波数)空間遷移と並行して光、電場等による直接遷移バレーへの熱い電子の供給を試みた。

当初の研究計画概要は以下の通りである。

- (1) 無歪Geベース構造の特性検証
不純物、異方位のバルクGe基板を利用。伸張歪Ge薄膜、SiGe混晶等を比較検討。
- (2) 直接バレー関与の電子励起過程の追跡
光励起下での直接遷移発光を検証
間接・直接バレー間散乱過程の知見集積
- (3) バレートロンニク電子注入法の検討
ヘテロ構造設計(量子カスケード構造他)。
間接バレー電子再利用型の新デザイン。
電場加速による「熱い電子」発生。
発光による検証。脱励起抑制策を検討。
- (4) 外場による直接バレー電子注入の効率化
電場パルスパタン依存性を精査。
磁場を用いた電子注入法の検討。
トンネル、熱い電子2法の性能比較。
- (5) 直接バレー発光の光利得評価
オンオフ利得と光子統計性の評価。
- (6) 導波路ASE発生とレーズング観測の試み
- (7) Geレーザーの性能向上の検討
電流励起利得の評価。
- (8) 共振器の導入
連続発振の試みと出力結合評価。
- (9) 研究の総括
Geレーザーの室温発振に向けた試み。
伸張歪導入の効果を多角的に検討。

4. 研究成果

当初計画に沿って研究を進める中、効率的な電子注入に直結する多くの知見が集積でき、多谷間半導体Geのバレートロンニクス推進に十分な寄与ができたものと考えている。その反面、計画後半の中心であった利得発生とレーザ

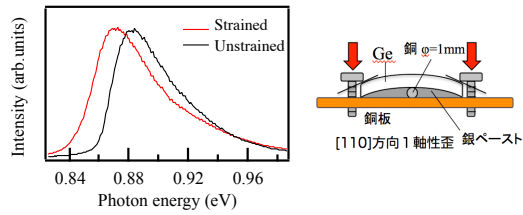


図 1. 1 軸性歪 Ge の発光(間接遷移(左)と直接遷移(右)).

一発振には至らず、先行研究に遡及して問題点を提示する結果となった。それでもスピン偏極のバレー間結合や価電子帯電子ラマン散乱など、今後の発展次第で電子の反転分布形成につながるべき新現象や効果を見出すことができた。以下、成果の概略を述べる。

(1) 無歪 Ge の効用 まず、無歪 Ge ベース構造 (Ge(001), (111), (110)基板) の光学評価から着手した。これには先行研究で指摘されていた伸張歪が光利得の絶対条件ではないことを示す目的がある。比較のため歪 Ge を複数用意し、同時評価を行った。第一群は Si(001), (111) 基板上の面内 2 軸性伸張歪 (< 0.5%) を受けたエピ膜 (Ge-on-Si) で試料、もう一種類は [110] 方向に一軸応力を印加した試料群である。実験との整合性を検証するため 30 基底 $k \cdot p$ 摂動によるバンド計算を行った。1.7% 超の 2 軸伸張歪で直接遷移化する (001) 基板上の Ge では Γ 点の状態密度と振動子強度がバルク Ge より減少し、直接遷移を比較すれば無歪 Ge が有利となる。また理論予測では可能な 2% 伸張歪 (10 GPa の応力相当) を結晶成長のみで達成するのは難しい。ところが意外にも 2 桁小さな 1 軸性応力印加でも 0.1% 伸張歪相当の下方シフト (11 meV) が得られた (図 1)。これは局所的な歪集中を示唆し、微細化や表面修飾によって一様歪を凌駕するバンド端変調が実現できる可能性がある。

(2) 直接遷移発光の同定 直接バレー関与の発光の同定にはスペクトル比較が直裁的かつ有効である。実際、極低温では予想どおり 0.16 eV 分離したスペクトルが得られた (図 2)。ここで励起波長は 1064nm である。ところが励起波長を 532nm に選ぶとより高エネルギーの励起にも拘らず、低エネルギー側の

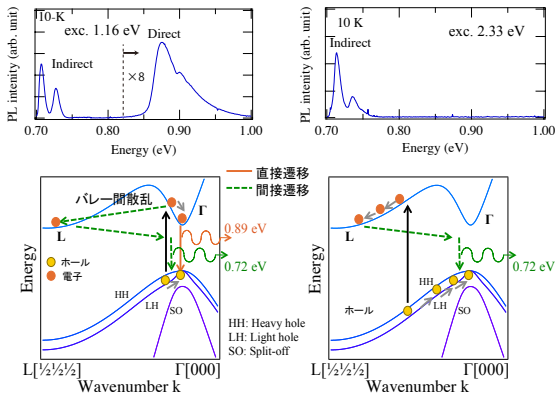


図 2. 無歪 Ge の発光スペクトルと光励起・緩和過程の模式図 (左) 1064 nm 励起 (右) 532 nm 励起).

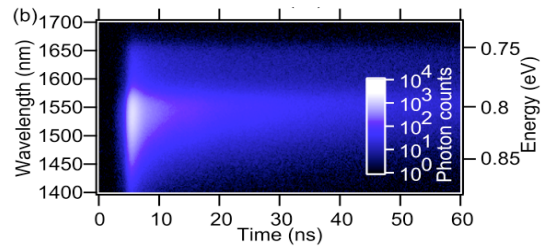


図 3. 室温発光時間発展の波長分散 (1064nm 励起).

間接バレー発光のみが観測されるという一見、奇妙な結果が得られる。これは後述のバレットロニック励起に関係し、間接・直接発光分離の上で留意すべき性質である。室温では直接バレー発光に間接発光が重畳するが、時間分解や円偏光測定がスペクトル分離に有効であった。前者では、発光時間発展の波長分散 (図 3) と立ち上がり・減衰時間の差を利用して両者が分離できた (図 4)。

(3) 円偏光度とスピン偏極 一方、後者は円偏光の光励起による発光の円偏光度の差に依拠している。本研究ではこの円偏光解析が重要な役割を演じた。円偏光度は、左右円偏光の強度の差と和の比で定義され、電子のスピン偏極率に比例する。円偏光度は双極子遷移の選択則 (図 5) から定まる。円偏光発光の発生には適切な励起エネルギーを選ぶ必要がある。価電子帯の縮退が解けると円偏光度は理論上、最大 100% まで上昇できる。実験事実として Ge の直接遷移発光の円偏光度は、符号を除いて高々 50% 以内であった。

(4) スピン緩和時間 右回り円偏光励起した電子スピン偏極の緩和過程は、左右両円

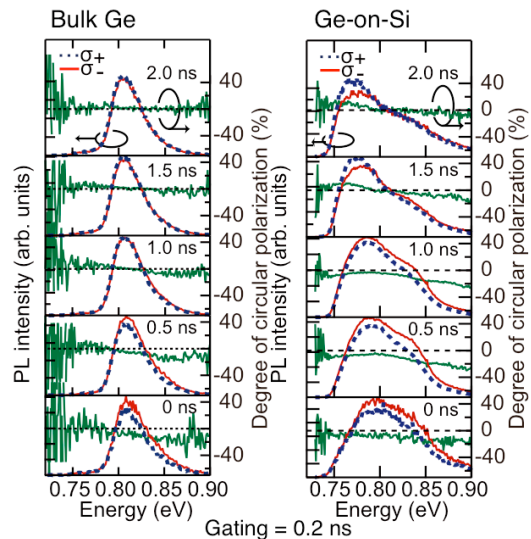


図 4. 時間分解円偏光度のスナップショット.

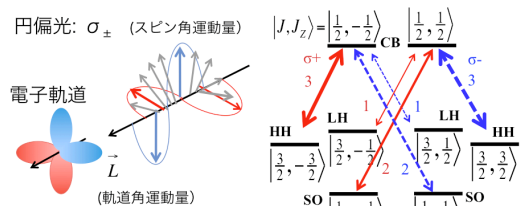


図 5. 円偏光と電子の結合(左)と光学選択則(右).

偏光の時間発展から追跡できる。絶対値ではスピン偏極率が円偏光度よりも大きい。上記例ではスピン偏極度が最大約 80%となる。これはスピン偏極がスピン緩和と輻射再結合の調和平均寿命で決まるためである。図 3 の例では 1.2ns 程度のスピン緩和時間となる。

(5) バルク間接発光の円偏光度 バルク Ge の円偏光度率に関して 2%以上を主張する先行研究が存在する。基板方位とドーピング濃度の異なる基板を用意し、評価光学系を再校正した上で精密測定を行ったところ円偏光度は 0.1%未満に留まった (図 4 の 0.75 eV 付近)。一方、歪 Ge では最大 10%程度の円偏光度が観測された。2%は大きな値でかつ単一試料の結果のため、歪や光学系の特性を誤認した可能性が高い。事実、実験光学系には素子の円偏光特性が重畳することが判った。

(6) 電場制御バレートロンクス 直接遷移バレーに効率的に電子を注入する手法の開発では、バンド工学を駆使した電圧制御型デバイス構造の設計と光支援法を推進した (図 6)。当初計画による量子カスケード構造のデザインでは障壁層の選択が重要となる。Si エピタキシャル成長では CaF_2 が共鳴トンネル構造で知られているほか基板分離・接合技術による $\text{Si}(\text{Ge})\text{O}_2$ 等の可能性を総合的に検討した。材料適合性の観点から本研究では Ge 同素体の germanene の登用を試みた (図 7)。graphene 類似構造の germanene がゼロギャップであるのに対し、面垂直方向の水素終端によって 1.5 eV 程度の可視ギャップ半導体 germanane となる。Ge とはタイプ I 型のバンド接続により障壁層として機能することが期待される。germanane 自体が直接遷移のバンド構造をもつ点も興味深い。germanane は分子線エピタキシーによる Ca と Ge の共蒸着によって CaGe_2 を作製し、Ca をウェットプロセスで水素 (あるいはメタン基) 置換して作製できるが、germanane 障壁/Ge ヘテロ構造上 (図 8) への Ge 再成長が課題として残った。

(7) バレー間結合 バレー間フォノン散乱にともなう非平衡電子のヒーティング効果を詳細に調べた。直接 Γ バレーに光励起した電子は、音響フォノン散乱によって L バレーに高速緩和 ($\approx 10\text{-}100$ fs) するが (図 9)、この傾向は高エネルギーほど顕著になる。これは L バレーの 4 重縮退も含めた状態密度の大きさに比して Γ バレーのそれが 2 桁以上小さいからであり、低温では逆過程は殆ど生じない。その結果、直接伝導帯バレー内の光学フォノン起源のバンド内緩和 ($\approx 1\text{-}2\text{ps}$) は実質的に抑

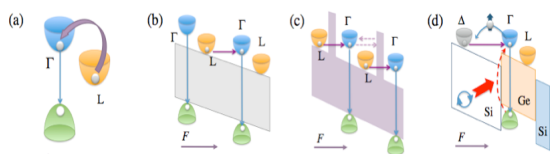


図 6. バレートロンクス電子注入の概念図。(a) バレー間フォノン散乱。(b) 電場加速。(c) 量子カスケード類似構造。(d) Si/Ge/Si ダブルヘテロ構造のスピントラns。

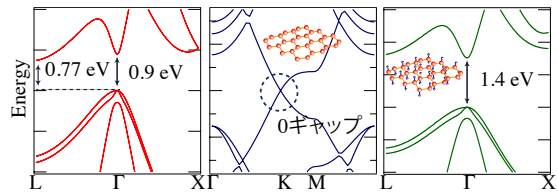


図 7. Ge(左), germanene(中) germanane(右)のバンド分散。

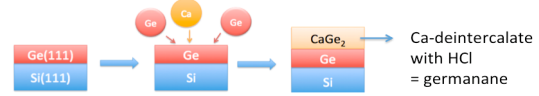


図 8. Ge/germanane 障壁/Ge ヘテロ構造の作製手順。

制される。輻射再結合はバレー間散乱に律速され、電子温度が格子温度より上昇する (図 9)。この効果は、パルス励起 (< 1 ns) においてより顕著になる。格子温度 16 K で測定した光励起発光スペクトル (図 9) では (励起波長 1064 nm)、定常励起でさえ 140 K、サブナノ秒パルス励起では 600 K を超える電子温度の熱い電子が発生することがわかる。

(8) 運動エネルギーの格子緩和 電場を用いて L バレーに実空間遷移させた場合、加速による過剰エネルギーが格子系へ散逸する効果が顕著になることが研究の終盤になって判明した。この影響で系統的に積み上げてきた Franz-Keldysh 効果など電場誘起現象や効果 (図 10) の解釈に再考の余地が生じた。これはカスケード構造でも同様な状況が発生することを意味しており、電場加速を用いる方法に制約が生じることがわかった。

(9) 直接バレー電子注入法 波数空間内遷移にもとづく電子注入を新たに検討に加えることにした。直接バレーから間接 L バレーへの逆過程は低温では抑制される。しかし、室温付近になるとフォノン散乱による逆過程によって L バレーから直接バレーに電子が遷移する (図 11)。室温電流注入発光の機構である。尚、L バレー内の散逸が逆散乱抑制に影響しない矛盾があるが、これは L バレーの中間状態による。バンド計算には取り込めないが、構造設計では考慮すべき事項である。

(10) バレートロンクス光励起法 前述した高エネルギー励起下で低エネルギー側の間接バレー発光が観測される原因は、電子・正孔の緩和の非対称性にあることが判明した。換言すれば、間接バンド分散では励起エネルギーに依存して電子の緩和先が変化する (図 2)。この効果を利用して特定の伝導帯バレー

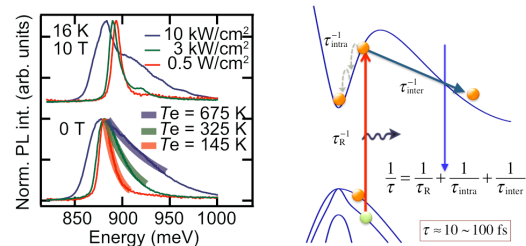


図 9. (右) 光励起後の高速バレー間散乱の概念図。(左) 熱い電子の発光スペクトルの励起密度依存性。下がゼロ磁場, 上が 10T の場合。格子温度は 16K。

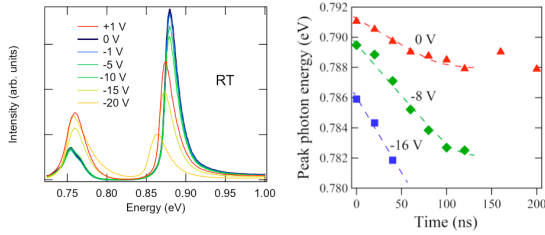


図 10. (左) pin-G 光励起スペクトルのバイアス電圧依存性. (右) Ge 発光ピークのバイアス電圧依存性.

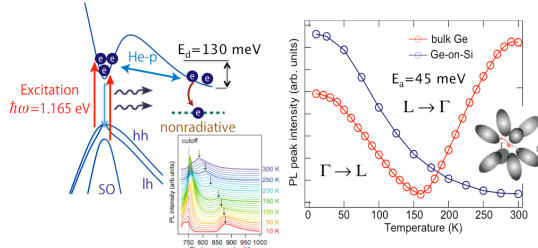


図 11. バレー間散乱(左)と発光強度の温度依存性(右).

一めがけて光エネルギーを指定するだけで電子を励起可能な選択光励起 (バレットロニック光励起法) を開発した。図 12 は Ge のバレー位置と励起エネルギーのマップである。レーザポインタの YAG の第 2 高調波 532nm は Δ 線上の van Hove 特異点群を選択励起し、L 点に緩和した電子が間接遷移発光を生じる。このように図 2 の効果は説明可能である。

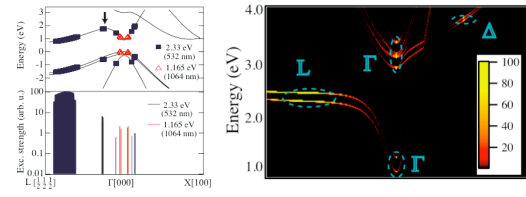


図 12. バレットロニック光励起法. (左) 1064, 532 nm の励起可能位置と振動子強度. (右) 選択励起マップ.

(11) バレットロニック・スピン偏極分布制御 Γ バレー内で生成した熱い電子はフォノン散乱によって状態密度の大きな L バレーに遷移し、バレー間結合が促進される。そのおかげで円偏光の向きとエネルギーに応じて両バレーを占有するスピン偏極が制御できる (図 13)。バンド端励起では下向きスピン偏極が発生して平行支配となるが、LH, SO 価電子帯から電子が励起されると上向き電子が増加し、 Γ と L バレーの偏極反転が生じる。多谷間半導体 Ge にしかできない芸当である。

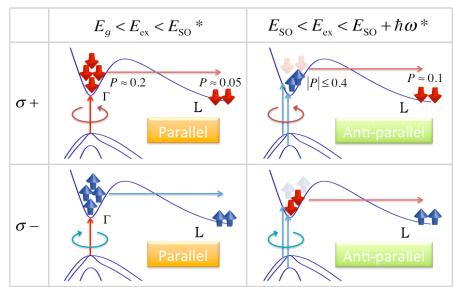


図 13. バレットロニック・スピン分布制御の概念図. 円偏光の向きとエネルギー選択で制御可能.

(12) バレットロニック・スピン偏極電子注入強磁場下のバルク Ge や歪 Ge では、室温でも Γ バレーのランダウ量子化スピン分裂準位が観測され、発光スペクトル上に量子振動が発現する (図 14)。室温でランダウ準位が観測できる例は少なく、グラフェン等の特殊ケースが知られているだけである。今回、Ge では熱い電子のスペクトル拡がり重要であることがわかった (図 9)。その結果、ランダウ準位成立条件 $\hbar\omega_c < k_B T$ の不等号が常識とは逆になることを見出した。尚、正孔の g 値が (-30) 程度になる理由は不明である。一方、L バレーは電子の有効質量が大きく分裂が観測されない。そこで量子カスケード構造の特性を Γ バレーのランダウ準位と L バレー連続状態の共鳴フォノン結合で模倣する新規方法論を開発した。(図 14)。

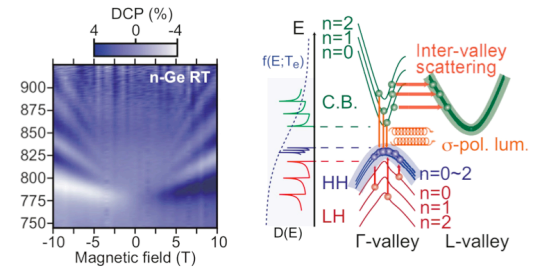


図 14. 室温ランダウスピン分裂の磁場依存性(左). ランダウ準位と L バレーのフォノン結合(右).

(13) 共鳴スピン偏極電子注入非フォニ的垂直緩和を伴う価電子帯の電子ラマン遷移 (散乱) (図 15) が 1064-nm パルス光励起によって共鳴的に増大する効果を見出した (図 16)。さらにスピン軌道分裂(SO) 帯の電子ラマン遷移の発現を歪導入によって制御し (図 16)、格子温度にも同様な効果があることを検証した。この SO 電子ラマン遷移がバンド端で発生する条件 (温度、歪) が整えば、再吸収損失レスの 3 準位系が構成でき、光利得が期待される。

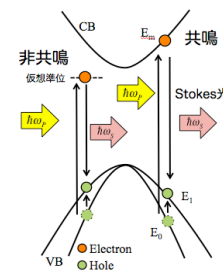


図 15 電子ラマン遷移.

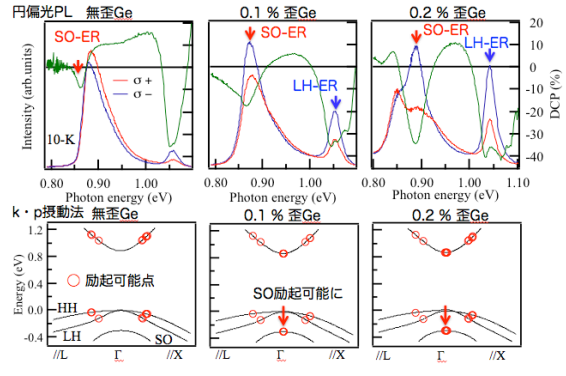


図 16. (上段) 発光スペクトルと円偏光度. 大きな負の円偏光度は電子ラマン遷移(SO, LH)による. (下段) 励起可能な電子状態の理論計算結果.

過去、Ge の電子ラマン遷移の制御については先行例がなかった。一方、バレー間散乱を考慮すると持続的な電子ラマン遷移発生が説明できることがわかった。

(14) 利得とレージングに関して 増幅自然放出光生、室温レーザー発振には至らなかったが、利得発生とその正確な評価に向けて新たな知見が得られた。まず室温連続発振を示唆する先行研究に対して利得に拮抗する損失・散逸の存在が明らかになった。また予備検証におけるパルス励起下のオンオフ利得が温度上昇による見かけ利得と判別不能なことが判明した。さらにレーザー発振を見極めるには、励起曲線に加えてスペクトル狭窄やフォトン統計など総合的な光学的評価が不可欠であるとの認識を深められた。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 7 件)

- ① F.Omura, Y.Yasutake, S.Fukatsu, “Photo-luminescence from a quantum well in a ghost cavity”, *Appl. Phys. Express* **9**, 03402-1-3 (2016), DOI: 10.7567/APX.9.032402 (査読有)
- ② S.Iba, H.Saito, S.Yuasa, Y.Yasutake, S.Fukatsu, “Fabrication of Ge-based light-emitting diodes with a ferromagnetic metal/insulator tunnel contact”, *Jpn. J. Appl. Phys.* **54.4S**, 04DM02-1-4 (2015), DOI: 10.7567/JJAP.54.04DM02 (査読有)
- ③ T.Sakamoto, S.Hayashi, Y.Yasutake, S.Fukatsu, “An alternative route for efficient indirect-gap excitation in Ge”, *Appl. Phys. Lett.* **105**, 042101-1-4 (2014), DOI: 10.1063/1.4891755 (査読有)
- ④ Y.Miyake, Y.Yasutake, S.Fukatsu, “Morphology-driven Stark shift switching in Ge/Si type-II heterointerfaces”, *Adv. Mater. Res.* **893**, 39-44 (2014), DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR/893/39 (査読有)
- ⑤ Y.Yasutake, S.Hayashi, H.Yaguchi, S.Fukatsu, “Observation of optical spin injection into Ge-based structures at room temperature”, *Appl. Phys. Lett.* **102**, 242104-1-4 (2013); DOI: 10.1063/1.4811495 (査読有)
(他 2 件)

[学会発表] (計 22 件)

- ① 松下智昭, 安武裕輔, 揖場聡, 齊藤秀和, 湯浅新治, 深津 晋, “伸張歪ゲルマニウムにおける共鳴電子ラマン遷移”, 第 63 回応用物理学会春季学術講演会 2016 年 3 月 19 日~3 月 22 日 東工大大岡山キャンパス (東京都目黒区)
- ② Y.Yasutake, S.Fukatsu, “Epitaxial growth of methy-terminated germanene multilayers on silicon”, *PacifiChem* 2015, 2015 年 12 月 15 日~12 月 20 日, Hawaii Convention Center, Honolulu, Hawaii, United States

- ③ S.Fukatsu, “Ge Light Emitting Diodes”, *Energy Materials and Nanotechnology*, Bangkok Meeting, 2015 年 11 月 10 日~11 月 13 日, Holiday Inn Bangkok Silom, Bangkok, Thailand
- ④ S.Fukatsu, “Valleytronic photonics in Ge-based structures”, *EMN Meeting of Quantum Technology*, 2015 年 4 月 14 日~4 月 17 日, Beijing Xijiao Hotel, Beijing, China
- ⑤ S.Fukatsu, “Taming Spins in a Band-gap Engineered Germanium by Light Touch”, 2014 年 11 月 30 日~12 月 5 日, Workshop on Innovative Nanoscale Devices and Systems, Hapuna Beach Prince Hotel, Kohala Coast, Hawaii, United States
- ⑥ T.Sakamoto, S.Hayashi, Y.Yasutake, S.Fukatsu, “Valley-selected interband absorption in Ge”, *Materials Research Society Fall Meeting 2014*, 2014 年 11 月 30 日~12 月 5 日, Hynes Convention Center, Boston, Massachusetts, United States
- ⑦ 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 2014 年 9 月 17 日~9 月 20 日, 北海道大学札幌キャンパス (北海道札幌市)
- ⑧ S.Hayashi, T.Tayagaki, Y.Okawa, Y.Yasutake, H.Yaguchi, Y.Kanemitsu, S.Fukatsu, “Paralle -Antiparallel Spin Orientation Control in the Conduction Band Valleys of Ge”, *European Materials Research Society Fall Meeting, 2014*, 2014 年 9 月 15 日~9 月 19 日, Warsaw Institute of Technology, Warsaw, Poland
- ⑨ S.Fukatsu, Y.Terada, S.Hayashi, Y.Yasutake, “Bulk Ge revisited: Toward group-IV interband laser”, *The 3rd International Symposium on Photonics and Electronics Convergence – Advanced Nanophotonics and Silicon Device Systems*, 2013 年 11 月 18 日~11 月 20 日, ENEOS Hall Komaba Research Campus (東京都目黒区)
- ⑩ S.Fukatsu, “Ge: The renaissance of elemental semiconductor?”, *2013 Asia-Pacific Workshop on Fundamentals and Applications of Advanced Semiconductor Devices*, 2013 年 6 月 26 日~6 月 28 日, Korea University, Seoul, 韓国
(他 12 件)

[その他]

研究室 URL <http://park.itc.u-tokyo.ac.jp/fkatz/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

深津 晋 (FUKATSU, Susumu)
東京大学・総合文化研究科・教授
研究者番号: 60199164

(2) 研究分担者

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