

令和 2 年 6 月 5 日現在

機関番号：12601
 研究種目：基盤研究(B) (一般)
 研究期間：2017～2019
 課題番号：17H02773
 研究課題名(和文) 共鳴電子ラマン遷移を用いたゲルマニウムの光利得とバンド間遷移レーザーへの応用

研究課題名(英文) Light amplification due to resonant electronic Raman transitions in germanium and its application to interband lasers

研究代表者
 深津 晋 (Fukatsu, Susumu)
 東京大学・大学院総合文化研究科・教授

研究者番号：60199164
 交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,900,000円

研究成果の概要(和文)：CMOS集積回路の光インターコネクトや自動運転用センサなど広範囲の応用展開に向けてモノリシック 族光機能集積素子が渴望されている。通信波長帯域に適合した 族半導体光エミッタの実現は残された歴史的難題である。本研究では、ゲルマニウム(Ge)の電子ラマン遷移過程を利用した誘導放出光発生の新規方法論に関する物性研究を推進した。(1)歪制御と励起条件最適化による共鳴電子ラマン発現条件の精査、(2)超高速分光による電子ラマン散乱ダイナミクス追跡、(3)低次元構造によるバンド構造制御、(4)歪Ge共振器構造設計と光利得機能実証の研究を通じて未踏の領域であるGeの電子ラマン介在光利得の実証を試みた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

歪Geには疑似直接遷移化による顕著な光学特性・デバイス機能の向上が期待されている。しかし、現状、最も有力とされる本手法も必然的にバンドギャップ縮小を招き、その結果、意図しない中赤外領域へのエネルギーシフトが発生する。いきおいこれを克服することが喫緊の課題である。これに対して本研究は、未踏の新奇電子励起法を軸に高度光機能の発現に向けて非従来型の高機能構造の設計と戦略的な物性の制御を行うことでSWIR域におけるGeの光利得発現の実証を試みるものである。一方で単なる応用展開の模索にとどまることなく、Geの新しい光学特性や機能性は、新奇な半導体光物性の学理探求の契機となることが期待される。

研究成果の概要(英文)：The sought-after group-IV monolithic photofunctional integrated devices offer a wide range of applications such as optical interconnects to integrated CMOS circuits and autonomous vehicle sensors. The group-IV light emitters operating in the telecom bands have been challenged over time in this context. Here we investigate the physical properties of germanium (Ge) in an attempt to observe the first stimulated emission of radiation by designing the intervalley-scattering-controlled electronic-Raman (ER) gain that is unique to the valleytronic semiconductor Ge. The ER-mediated light amplification in strain-engineered Ge is demonstrated by (1) tuning in to a resonance between the split-off hole ER and the band-edge through optimized pumping, (2) tracking the ER dynamics by means of spin-sensitive ultrafast spectroscopy, (3) designing allied Ge allotropes, and (4) coupling the strained Ge to an optical resonator.

研究分野：応用物性・結晶工学・応用量子物理学

キーワード：ゲルマニウム 共鳴電子ラマン遷移 光利得 量子閉じ込め バレー選択励起 バレー間散乱 円偏光フェムト秒励起関連法 Germanane

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

現代の高度情報化社会を下支えするシリコンエレクトロニクスさらなる進展に向けて、シリコンプラットフォーム上の光電子融合回路の実現が期待されている。究極的なシリコン微細加工技術の限界を打破する試みとして2次元から3次元集積への転換が模索されるなか、配線長延伸による信号伝送遅延を克服するためにモノリシックIV族光機能集積回路、特にシリコン透明波長領域(SWIR)適合IV族光エミッタの実現が渴望されている。SWIR領域にバンドギャップを有し、高い環境親和性、CMOSプロセスに適合するIV族半導体ゲルマニウムをベースにした光増幅器・光エミッタに注目が集まっている。しかしながら、これまで有望視されてきた超高伸長歪の印加や電子の過剰ドーピングによるゲルマニウムの擬似直接遷移化は、それ自身がバンドギャップ縮小を引き起こす結果、意図しない中赤外領域へのエネルギーシフトが問題となる。いきおい従来の2準位バンド間光学遷移とは異なるベクトルのアプローチが要求される。

マルチバレー物質のゲルマニウムではバレー間散乱が顕著である。近年、我々は特定の電子バレーを選択光励起すると、バレー間散乱に駆動された垂直緩和過程の一種である電子ラマン遷移が、バンド間光学遷移由来の蛍光を凌駕して顕在化する実験事実を見出した。ここから動的3準位過程である電子ラマン遷移過程を利用したゲルマニウム光増幅機能の強化法を想起した。

2. 研究の目的

本研究では、間接遷移半導体のゲルマニウムによるレーザー発振を究極目標に、新奇な電子励起法を利用した誘導放出光の発生を目的とする。ゲルマニウムで顕著に発生する電子ラマン(Electronic Raman; ER)遷移を利用して2準位バンド間光学遷移の限界を打破し、光利得の劇的な向上を試みる(図1)。共鳴電子ラマンの遷移過程で発生する動的な3準位に注目し、(1)共鳴電子ラマン利得が発現する物理システムの構築、(2)利得特性の包括的な評価、(3)光能動素子と応用展開の3点に関して要素技術の確立と新規開拓を行い、未踏領域であるゲルマニウムのER介在遷移の光利得の実証と光エミッタの実装を目指した。

3. 研究の方法

ゲルマニウムのER介在光利得の実証に向け、以下の項目について物性研究を推進した。

(1) スプリットオフ正孔バンドを介した3準位系由来ER発現機構の実証と制御

ERは光励起波長とほぼ同一波数における垂直緩和過程であり、角運動量保存則から円偏光(光スピン)に敏感な過程である(図1)。直接遷移端蛍光とER遷移過程の共鳴が光発生には有効と考えられるが、無歪ゲルマニウムではHHとLHバンド縮退によってスプリットオフ(SO)正孔バンドがその鍵を握る。そこで30-band $k \cdot p$ 摂動法による理論計算から直接遷移端近傍におけるSO-ER共鳴に最適な励起波長を見積った。共鳴条件に近く、汎用性も高い1064 nmを励起光波長に固定することでゲルマニウムにおけるSO-ER由来の発光と歪の相関関係を詳細に調べた。次にER介在の光利得の観測に向け、前方散乱配置を用いてポンプ・プローブ法による利得の評価を試みた。発光スペクトル上に重畳するER由来の発光と直接遷移端蛍光を分離するため円偏光にもとづくスペクトル分解を利用した。

(2) バレー間電子散乱とスピン光増幅に向けた円偏光励起相関法による超高速発光分光系の構築

バレー間散乱(<100 fs)が電子ダイナミクスに関与するゲルマニウムでは100 fs~10 ps時間領域におけるスペクトル追跡が重要となる。ERが円偏光敏感な過程であることに基づいた円偏光フェムト秒励起相関法を考案し、円偏光スペクトルによるERダイナミクスを追跡した。

(3) ゲルマニウム近縁の低次元構造形成技術の開拓

ゲルマニウム発光能の歪増強効果においてはバンドギャップ縮小に付随する動作波長の赤方シフトが問題となる。ゲルマニウム低次元構造の量子閉じ込め効果を利用したバンドギャップの制御は解決策の候補ではあるが、シリコンとの格子不整合のため結晶成長の観点で技術障壁が高い。そこで基板との格子整合条件が緩和される新低次元構造の形成法として(1)カルシウムインターカラント介在ゲルマニウムエピタキシと(2)結晶成長薄膜転写(HELLO法)+超高精度エッチングによりゲルマニウム二次元単結晶を作製し、電気伝導と光学特性の評価を行なった。

(4) 真空低温下の異方性応力印加機構と光共振器融合

半導体光増幅器・レーザーを指向する上で光共振器構造は必須である。他方、ゲルマニウムの伸長歪制御も要件であるから応力印加機構と光共振器との融合が最重要の解決すべき技術的課題である。ゲルマニウムの薄膜化は、応力印加にとって有利だけでなく、光共振器の平面鏡形成にも利用できる。そこで精密機械研磨により平均膜厚20 μm にまで薄膜化したゲルマニウムの研磨面に金属蒸着を施すことで面(垂直)Fabry-Pérot(VFP)共振器を形成した。小型voice coil actuatorを組み込んだ、真空・低温環境下で薄膜に応力を印加可能なジグを作製し、VFPゲルマニウムの低温でのER由来蛍光の機械歪依存性の系統的な追跡と光利得の評価を行なった。

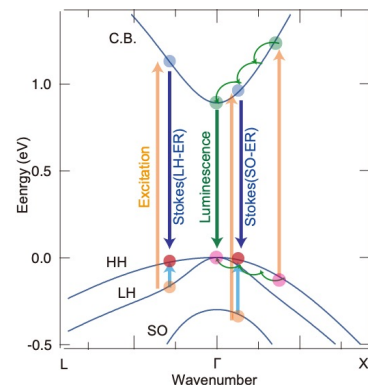


図1 電子ラマン遷移(ER)過程の模式図。

4. 研究成果

(1) スプリットオフ正孔バンドを介した3準位系由来 ER 発現機構の実証と制御

一軸性歪バルクゲルマニウムとシリコン基板上ゲルマニウム薄膜(Ge-on-Si)に円偏光フォトルミネッセンス(PL)を適用した結果、Ge-on-Si からは明瞭な SO-ER(0.9 eV)、LH-ER(1.04 eV) 由来のバンドが観測された(図 2a)。ER 由来の蛍光は共通して負の円偏光度を示し、70°C以上の高温においても明瞭に観測された。次に前方散乱配置で光吸収のポンププローブ測定を行った。ポンプ光(1064-nm パルス光源)on/off 時のプローブ透過光(白色光源)の強度比から Ge-on-Si の SO-ER、LH-ER に対して 30%の明瞭な光増幅効果(負吸収)を観測した(図 2b)。尚、SO-ER 近傍に低利得の直接遷移端由来の蛍光が重畳しているせいで LH-ER に比べて on/off 利得が低くなる傾向があった。ゲルマニウムの ER 介在による光増幅効果の観測はこれが初めてである。一方で Ge-on-Si 構造の Ge 薄膜には 0.15%程度の二軸伸長歪が加わっており、1064-nm 励起時の直接遷移端と ER の共鳴励起条件からは外れている。より詳細な ER 発現条件の精査のため波長可変光源(OPO)を用いてゲルマニウム厚膜(20 μm, 0.03%伸長歪)に対して ER の励起波長依存性を調べた(図 2c)。励起波長 1000 nm では HH を終状態とする SO-ER2 と LH を終状態とする SO-ER1 への分裂が生じ、これに伴って発光強度は減衰した。一方 1070-nm 励起では、直接遷移端由来の蛍光(Direct)と SO-ER が共鳴し、発光強度の増大が観測された。ER は Γ 点を中心に L 方向([1/2, 1/2, 1/2])と X 方向([1,0,0])のバンド分散に依存して分裂するが、Γ 点近傍の共鳴励起では波数方向依存の分裂効果が解消される結果、ER 増大効果がより顕著になることがわかった。

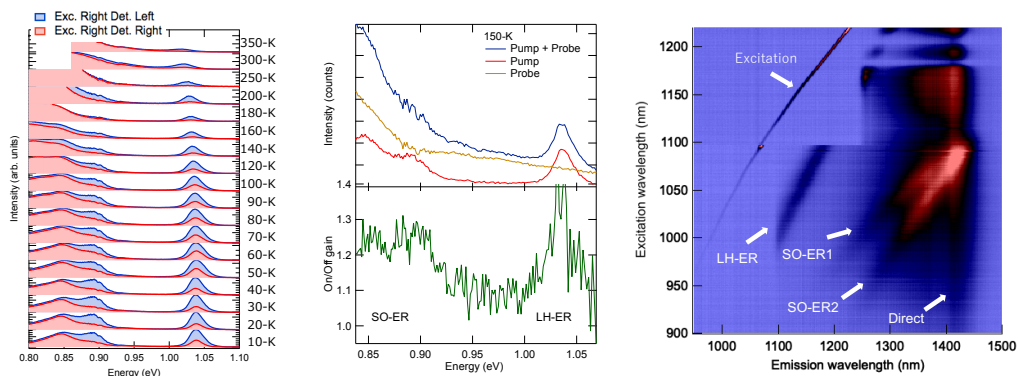


図 2 (a) 伸長歪 Ge-on-Si の円偏光 PL の温度依存性. (b) Ge-on-Si の on/off 光利得. (c) 薄膜 Ge(20 μm)の励起フォトルミネッセンス(PLE).

(2) バレー間電子散乱とスピン光増幅に向けた円偏光励起相関法による超高速発光分光系の構築

ER 遷移は p ドーピングによって増強する。バレー間散乱は光励起のみで p ドーピングを誘起するから ER 介在型のゲルマニウム光機能を指向する上でバレー散乱と発光機構の相関の解明は急務である。実際、ゲルマニウムでは光励起直後の熱い電子が大きな波数のバレー間フォノン散乱を繰り返して複数の電子バレーを飛び回り、運動量緩和の後に電子がエネルギー緩和するが、この一見奇妙な振る舞いを時間・角度分解 2 光子光電子分光から明らかにした。さらに ER の円偏光敏感な特性を利用して円偏光フェムト秒励起相関法(FEC)による ER の超高速時間分解分光計測法を提案・実行した。分割フェムト秒パルス光(1030 nm, 200 fs)で Ge 試料上の同一スポットを励起し、励起時間差(τ)の関数として発光強度(I)の相互相関($I(\tau)$)を求め、励起光強度依存性 (I^n) が非線形な($n \neq 1$)条件下での FEC 信号($n < 1$ で負、 $n > 1$ で正)を検出した。p-Ge では $|\tau| < 1$ ps で負、 $|\tau| > 1$ ps において正の FEC 信号を観測した(図 3a)。直接遷移端蛍光(1250~1420 nm)は SRH 再結合($n = 2$)に伴って正の FEC スペクトルを示し、SO-ER(1400 nm)付近ではバレー間散乱と矛盾しない時定数($\tau = 1.2$ ps)で単調変化する負の FEC スペクトルを観測した(図 3b)。一方、n-Ge の円偏光 FEC (励起・検出共に円偏光) では明瞭な円偏光度の時間発展(図 4)が観測された。2 成分指数関数フィッティングによってスピン偏極信号を分離 (SO-ER ≈ 4 ps、直接遷移端 ≈ 200 ps)できたが、これによってマルチバレー半導体の光物性探索において円偏光 FEC が有効なことを示すと同時に時間領域における SO-ER のスペクトル弁別に初めて成功した。

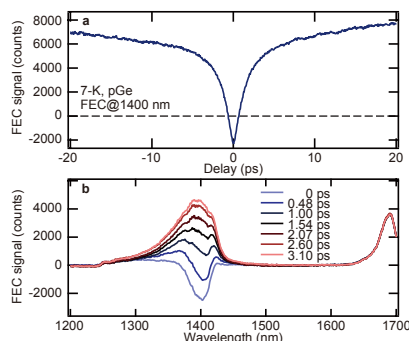


図 3 (a) SO-ER の FEC 信号時間発展 (b) SO-ER の FEC スペクトル.

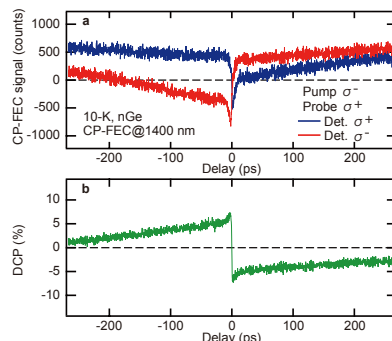


図 4 (a) SO-ER の円偏光 FEC 信号時間発展 (b) SO-ER の円偏光度時間発展.

(3) ゲルマニウム近縁の低次元構造形成技術の開拓と量子閉じ込め効果評価

光利得の視点からゲルマニウム低次元構造形成と量子閉じ込め効果発現に関する研究を推進した。従来の歪制御とはベクトルが異なる新しい構造・エネルギーギャップの制御法を試みた。ボトムアップ的アプローチとしてカルシウムインターカレント介在トポロジ変換エピタキシとトポタクティク反応を利用したシリコン基板上水素終端ゲルマニウム原子層(Germanane)多層構造を作製し、イオン液体ゲートによる電気二重層両極性トランジスタ動作(電子移動度>6500 cm²/Vs)の実証に成功した(図5)。大気安定性等の課題は残っているものの、新規ゲルマニウム低次元構造による劇的なバンド構造改変はIV族半導体光機能素子の応用展開の加速のみならず、新規物理現象探索の舞台としての意義がある。また構造制御性に優れるトップダウン手法で作製したゲルマニウム超薄膜(UTB-Ge)に対し、バンド端由来の蛍光の膜厚依存性から量子閉じ込め効果の検証を行なった。非晶質アルミナ酸化膜(Al₂O₃)をポテンシャル障壁とする石英基板上 UTB-Ge の PL から膜厚減少に伴う発光エネルギーの明瞭な青方シフトを確認した(図6)。シフト量は無限大障壁の無歪 Ge の直接遷移端量子井戸の e₁-HH₁ 遷移と極薄域を除けばほぼ一致し、二次元化に伴う量子閉じ込め効果とも矛盾しない。通常の量子井戸では基板や障壁層における光吸収が光キャリア供給に寄与するが、UTB-GeOI は透明基板と Al₂O₃ 障壁からのキャリア供給が抑制されるにも拘らず明瞭な発光が観測される事実は、UTB-GeOI の低散逸性(高い結晶性)の証左であると同時に低次元ゲルマニウムのフォトニクス応用への適合性を示している。

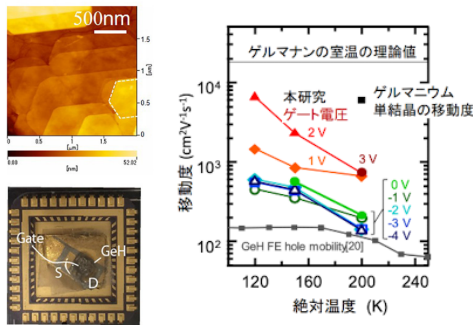


図5 Germanane の原子間力像、デバイス外観移動度のゲート電圧/温度依存性。

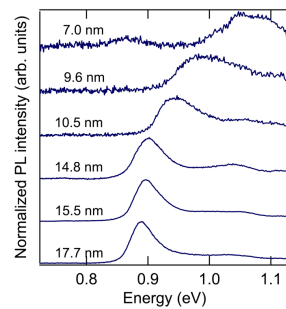


図6 UTB-Ge PL の膜厚依存性。

(4) 真空低温下の異方性応力印加機構と光共振器融合

歪ゲルマニウムの発光波長の SWIR 適合化を図るためには、光共振器構造に組み込んだゲルマニウムを対象に光学特性の歪依存性に関する系統的な評価を行う必要がある。そこで低温試料の歪を機械的に制御した状態で発光をその場観測可能な光学実験系を構築し、VFP 共振器構造内のゲルマニウム(VFP-Ge)の一軸性伸長歪依存性を精査した。試料には機械研磨によって約20 μm にまで薄片化したバルク Ge (undoped(i-Ge) と Sb-doped; 10¹⁸ cm⁻³(n-Ge)) を用いた。裏面には Au 全反射鏡を100 nm 蒸着し、光出射側の部分反射鏡はフレネル反射(≈30%)を利用して VFP (FSR ≈ 1.55 THz, Finesse ≈ 3) を構成した。励起には 1064 nm のサブ ns パルス光源を用い、5 kW/cm² の強励起下で光利得に帰着される PL スペクトル変調の観測を試みた。10-K PL スペクトルから n-Ge において SO-ER 共鳴励起による明瞭な発光増大と共振器由来のスペクトル変調が観測できる(図7a)。次に機械歪にともなうバンド端近傍のスペクトル変化を利用して n-Ge の PL スペクトルに重畳する干渉フリンジの様子を追跡した。n-Ge の一軸性歪を 0.02~0.14 %まで変化させたときの伸長歪によるバンド端の低エネルギーシフトと HH, LH バンド縮退の解消によるスペクトル幅増大が PL スペクトルの変化から直に読み取れる(図7b)。干渉フリンジの発生域が高エネルギー側に伸びる現象は、光増幅の発生を示している。より明確な光増幅の同定に向けて 1030 nm フェムト秒レーザー励起によるスペクトル計測から光利得の発現を示唆するスペクトルフリンジを得た(図7c)。しかし、光吸収に伴う格子温度の上昇のせいで ER 共鳴励起領域からの脱調が起り、レーザー発振には至っていない。効率的な局所排熱構造と高 Finesse 光共振器のための光取り出し技術の基盤形成が今後の課題である。

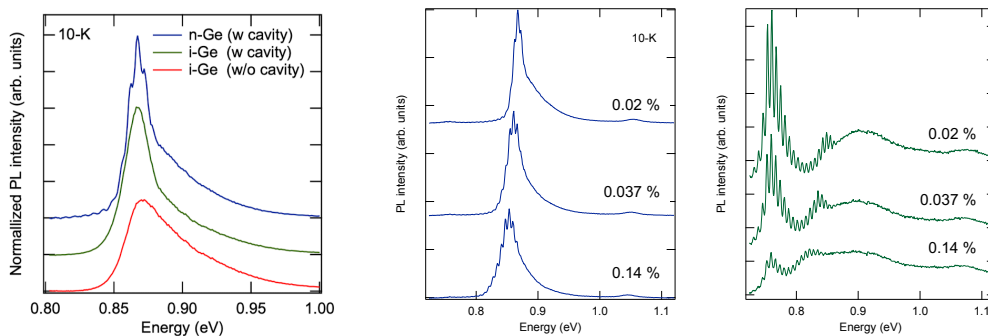


図7 (a) VFP-Ge PL スペクトルのドーピング依存性。 (b) 1064-nm 励起 VFP-Ge PL の一軸性機械歪依存性。 (c) 1030-nm 励起 VFP-Ge PL の一軸性機械歪依存性。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 0件）

| | |
|---|---------------------------|
| 1. 著者名 Yue Wang, Hiroto Kai, Masatoshi Ishida, Sabapathi Gokulnath, Shigeki Mori, Tomotaka Murayama, Atsuya Muranaka, Masanobu Uchiyama, Yuhsuke Yasutake, Susumu Fukatsu, Yusuke Notsuka, Yoshihisa Yamaoka, Mamiko Hanafusa, Michito Yoshizawa, Gakhyun Kim, Dongho Kim, Hiroyuki Furuta | 4. 巻 142 |
| 2. 論文標題 Synthesis of a Black Dye with Absorption Capabilities Across the Visible-to-Near-Infrared Region: A MO-Mixing Approach via Heterometal Coordination of Expanded Porphyrinoid | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Journal of the American Chemical Society | 6. 最初と最後の頁 6807 ~ 6813 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/jacs.0c01824 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 該当する |

| | |
|--|----------------------------|
| 1. 著者名 Yumiko Katayama, Ryoto Yamauchi, Yuhsuke Yasutake, Susumu Fukatsu, Kazunori Ueno | 4. 巻 115 |
| 2. 論文標題 Ambipolar transistor action of germanane electric double layer transistor | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Applied Physics Letters | 6. 最初と最後の頁 122101-1 ~ 5 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5094817 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|--|---------------------------|
| 1. 著者名 Poornenth Pushpanandan, Dong Hoon Won, Shigeki Mori, Yuhsuke Yasutake, Susumu Fukatsu, Masatoshi Ishida, Hiroyuki Furuta | 4. 巻 14 |
| 2. 論文標題 Doubly N Confused Calix [6] phyrin Bis Organopalladium Complexes: Photostable Triplet Sensitizers for Singlet Oxygen Generation | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Chemistry-An Asian Journal | 6. 最初と最後の頁 1729 ~ 1736 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/asia.201801671 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 該当する |

| | |
|--|---------------------|
| 1. 著者名 Youhei Okawa, Shiho Morimoto, Yuhsuke Yasutake, Susumu Fukatsu | 4. 巻 T5A.37 |
| 2. 論文標題 Quantum-Enhanced Magneto-optic Measurements in a Dissipative Medium | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Quantum Information and Measurement (QIM) V: Quantum Technologie | 6. 最初と最後の頁 1 ~ 2 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/QIM.2019.T5A.37 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|---|---------------------------|
| 1. 著者名 Neha Manav, Praseetha E Kesavan, Masatoshi Ishida, Shigeki Mori, Yuhsuke Yasutake, Susumu Fukatsu, Hiroyuki Furuta, Iti Gupta | 4. 巻 48 |
| 2. 論文標題 Phosphorescent rhenium-dipyrinates: efficient photosensitizers for singlet oxygen generation | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Dalton Transactions | 6. 最初と最後の頁 2467 ~ 2478 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C8DT04540B | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 該当する |

| | |
|---|---------------------------|
| 1. 著者名 Yufeng Yang, Masatoshi Ishida, Yuhsuke Yasutake, Susumu Fukatsu, Chihoko Fukakusa, Masa-aki Morikawa, Teppei Yamada, Nobuo Kimizuka, Hiroyuki Furuta | 4. 巻 58 |
| 2. 論文標題 Hierarchical Hybrid Metal/Organic Frameworks: Tuning the Visible/Near-Infrared Optical Properties by a Combination of Porphyrin and Its Isomer Units | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Inorganic Chemistry | 6. 最初と最後の頁 4647 ~ 4656 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.inorgchem.9b00251 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 該当する |

| | |
|--|----------------------|
| 1. 著者名 J. Kanasaki, I. Yamamoto, J. Azuma, S. Fukatsu | 4. 巻 96 |
| 2. 論文標題 Electronic structure of the surface unoccupied band of Ge(001)-c(4×2): Direct imaging of surface electron relaxation pathways | 5. 発行年 2017年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review B | 6. 最初と最後の頁 115301 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.96.115301 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|---|----------------------|
| 1. 著者名 Koichi Murata, Kazushi Miki, Susumu Fukatsu | 4. 巻 111 |
| 2. 論文標題 Autosurfactant of the second kind: Bi enables δ -doping of Bi in Si | 5. 発行年 2017年 |
| 3. 雑誌名 Applied Physics Letters | 6. 最初と最後の頁 152104 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5001154 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|--|-----------------------------|
| 1. 著者名 Pushpanandan Poornenth, Maurya Yogesh Kumar, Omagari Toshihiro, Hirotsawa Ryuji, Ishida Masatoshi, Mori Shigeki, Yasutake Yuhsuke, Fukatsu Susumu, Mack John, Nyokong Tebello, Furuta Hiroyuki | 4. 巻 56 |
| 2. 論文標題 Singly and Doubly N-Confused Calix[4]pyrin Organoplatinum(II) Complexes as Near-IR Triplet Sensitizers | 5. 発行年 2017年 |
| 3. 雑誌名 Inorganic Chemistry | 6. 最初と最後の頁 12572 ~ 12580 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.inorgchem.7b02047 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

〔学会発表〕 計21件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 8件)

| |
|--|
| 1. 発表者名 公平 拓見、安武 裕輔、張 文馨、石井 裕之、入沢 寿史、内田 紀行、前田 辰郎、深津 晋 |
| 2. 発表標題 Ultrathin-body Ge01の円偏光フォトルミネセンス |
| 3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--------------------------------------|
| 1. 発表者名 田中 陽、安武 裕輔、深津 晋 |
| 2. 発表標題 有機無機ペロブスカイトにおける光誘起局所構造相転移 |
| 3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Tetsuya Sakamoto, Yuhsuke Yasutake, Junichi Kanasaki, Susumu Fukatsu |
| 2. 発表標題 Relevance of hidden Valleys in the Dequenching of Room-temperature-emitting Ge Layers |
| 3. 学会等名 AVS 66th International Symposium & Exhibition (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 安武 裕輔、一色 史雄、 深津 晋 |
| 2. 発表標題 伸長歪制御した面直ファブリペロー共振器中Geからの発光 |
| 3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 公平 拓見、安武 裕輔、張 文馨、石井 裕之、入沢 寿史、内田 紀行、前田 辰郎、深津 晋 |
| 2. 発表標題 Ultrathin-body GeOI の量子閉じ込め直接遷移端蛍光 |
| 3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 金崎 順一、山本 勇、東 純平、深津 晋、Sjakste Jelena、Vast Nathalie |
| 2. 発表標題 ゲルマニウムにおける励起電子系の超高速緩和動力学：エネルギー・運動量空間におけるバレー間散乱の重要性 |
| 3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 田中 陽、安武 裕輔、深津 晋 |
| 2. 発表標題 有機無機ペロブスカイトのアンチストークス蛍光の温度依存性 |
| 3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|-------------------------------------|
| 1. 発表者名 Ren Zhaoli、安武 裕輔、深津 晋 |
| 2. 発表標題 有機無機ペロブスカイト単結晶への光学的スピン注入 |
| 3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Yohei Okawa, Shiho Morimoto, Yuhsuke Yasutake, Susumu Fukatsu |
| 2. 発表標題 Quantum-Enhanced Magneto-optic Measurements in a Dissipative Medium |
| 3. 学会等名 Quantum Information and Measurement (QIM) V: Quantum Technologies (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Yuhsuke Yasutake, Susumu Fukatsu |
| 2. 発表標題 Hot Carrier Dynamics in Multi-valleyed Semiconductors |
| 3. 学会等名 The 7th International Conference on Small Science (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Yuhsuke Yasutake, Susumu Fukatsu |
| 2. 発表標題 Electronic Raman Scattering in Ge Studied by Circular-Polarized Femtosecond Excitation Correlation |
| 3. 学会等名 2018 Material Research Society Fall Meeting (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 安武 裕輔、一色 史雄、 深津 晋 |
| 2. 発表標題 一軸伸長歪印加によるGe電子ラマン遷移増強のその場観察 |
| 3. 学会等名 第79回応用物理学会秋季学術講演会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 山内 遼斗、佐藤 洋平、片山 裕美子、安武 裕輔、深津 晋、上野 和紀 |
| 2. 発表標題 電気二重層トランジスタ(EDLT)を用いたゲルマナン薄膜の金属的伝導 |
| 3. 学会等名 第79回応用物理学会秋季学術講演会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|-------------------------------------|
| 1. 発表者名 安武 裕輔 |
| 2. 発表標題 Ge直接遷移化の試みと光機能探索 |
| 3. 学会等名 第6回フォトニクスのための材料研究会（招待講演） |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Youhei Okawa, Fuminori Omura, Yuhsuke Yasutake, Susumu Fukatsu |
| 2. 発表標題 Photon heterodyning and its applications |
| 3. 学会等名 Advanced Photon Counting Techniques XII (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Chang H. Yang, Yuhsuke Yasutake, Susumu Fukatsu |
| 2. 発表標題 Strain-engineered electronic Raman transitions in Ge |
| 3. 学会等名 European Advanced Materials Congress (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Tomoaki Matsushita, Yuhsuke Yasutake, Susumu Fukatsu |
| 2. 発表標題 Electronic Raman scattering due to spin-orbit split-off band in tensilely-strained Ge |
| 3. 学会等名 2018 American Physical Society March Meeting (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Yuhsuke Yasutake, Susumu Fukatsu |
| 2. 発表標題 Surfactant-intercalant duality of Ca in topology-conversion epitaxy of Ge |
| 3. 学会等名 North American Conference on Molecular Beam Epitaxy 2017 (国際学会) |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 安武裕輔、深津 晋 |
| 2. 発表標題 円偏光フェムト秒励起相関分光によるGeキャリア緩和過程の追跡 |
| 3. 学会等名 第65回応用物理学会春季学術講演会 |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 山内遼斗、佐藤洋平、片山裕美子、安武 裕輔、深津 晋、上野和紀 |
| 2. 発表標題 ゲルマニウム薄膜をチャンネルとした電気二重層トランジスタ |
| 3. 学会等名 第78回応用物理学会秋季学術講演会 |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 安武裕輔、深津 晋 |
| 2. 発表標題 Si(111)基板上 CaGe ₂ F _x 膜のエピタキシャル成長 |
| 3. 学会等名 第78回応用物理学会秋季学術講演会 |
| 4. 発表年 2017年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

| |
|--|
| <p>成果・情報公開用ホームページ http://park.itc.u-tokyo.ac.jp/fkatz/</p> |
|--|

6. 研究組織

| | 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|-------|---|---|----|
| 研究分担者 | 安武 裕輔 (Yasutake Yuhsuke) (10526726) | 東京大学・大学院総合文化研究科・助教 (12601) | |