

令和 3 年 5 月 31 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01469

研究課題名(和文) 半導体レーザー利得スイッチから超放射へのクロスオーバーと超短パルス発生限界解明

研究課題名(英文) Study on the crossover from semiconductor gain-switched lasers to superradiance and the limit of short-pulse generation

研究代表者

秋山 英文 (AKIYAMA, HIDEFUMI)

東京大学・物性研究所・教授

研究者番号：40251491

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,400,000円

研究成果の概要(和文)：超放射と利得スイッチのクロスオーバー効果の特徴付ける電子系の量子力学的コヒーレンスの発現を定量的に評価するために、高密度キャリアが反転分布を形成した状態における位相緩和時間を計測した。弱励起条件から徐々にキャリア密度を上げてゆくと、位相緩和時間は数psから、時間分解能以下にまで減少したが、反転分布領域に達すると最長で0.34psまで伸長した。半導体ブロッホ方程式における2次摂動までのレベルで計算し、実験結果が理論的にも説明可能である結果を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

半導体レーザーからの利得スイッチ型の短パルス発生において、超放射の寄与が発生する可能性について肯定的な結論が得られた。利得スイッチから超放射のクロスオーバーに至るレベルまで半導体レーザーからの高速パルスを単発直接発生できれば、パルス繰り返しや発生タイミングの自在制御が可能な小型堅牢光源として、レーザー加工や生命科学・医療分野などへの広い応用が拓ける。

研究成果の概要(英文)：In order to quantitatively evaluate emerging quantum mechanical coherence in the electronic system, and to characterize crossover from gain switching to superradiance, the phase relaxation time was measured in the presence of high-density electron-hole carriers forming population inversion. When the carrier density was gradually increased from weak to intense excitation conditions, the phase relaxation time decreased from several ps to below our time resolution, but then increased to 0.34 ps when population inversion region was formed. Theoretical calculations were made at the level of the second-order perturbation in the semiconductor Bloch equations, which explained the experimental results consistently.

研究分野：半導体物理学

キーワード：半導体レーザー 利得スイッチ 超放射 光物性 非線形性

1. 研究開始当初の背景

光加工や多光子レーザー顕微鏡に資する光源の要請から、半導体レーザーから直接に短パルスを生ずる利得スイッチング現象について、基礎・応用の両面の注目が集まっている。利得スイッチングは、簡単なレート方程式計算が示すように、強いポンピングに伴い、励起キャリア数の急速増大、反転分布の形成、光学利得の比例増大が起こる一方、一旦、光パルスが発生すると、誘導放出によるキャリア消費、それに比例した利得消失が起き、光パルスが立ち下がる極端非線形現象である。我々は、これまで、その高速化の基礎研究に取り組み、最近、半導体レーザーを限界的に強く励起し、半導体中の高速バンド内緩和とスペクトル分離を活用することで、数ピコ秒から最短 670 フェムト秒の光パルスを得る方法を実験的に見出した。

一方、超放射は、反転分布状態にある 2 準位原子集団の特異なコヒーレント現象として、量子光学・原子・分子分野で古くから研究されてきた。レート方程式理論を超えたプロッホ方程式理論により記述され、個別の分極がコヒーレントに位相をそろえて巨大分極を生ずり、集団自然放出を起こし、超短光パルスを生ずる現象である。実用デバイス応用例はまだ無い。比較的最近、反転分布に達した半導体材料においても、超放射(あるいは超蛍光)の観測を示唆する報告がいくつかなされた。例えば、Vasil'ev らは、多セクション半導体レーザーから得たフェムト秒パルスを超放射として解釈している。Noe らは、強磁場下で半導体多重量子井戸試料を強く光励起して得たバースト状パルスを超蛍光として解釈している。ただし、これらの解釈の妥当性は確立していない。

超放射はコヒーレント現象であり、「発生する光のパルス時間幅が位相緩和時間よりも短い」ことが必要条件となり、位相緩和時間の短い半導体中での実現は困難とも考えられることが最大の懸念点である。しかし、もし、利得スイッチングの高速化が進んでフェムト秒領域に突入すると、いつかは必ず、超放射へのクロスオーバー領域に到達するはずであろう。

これらを解明し理解することが出来れば、超短パルスを生成する機構、短パルス化を阻害する要因、そして、短パルス化の限界を決める物理機構、それらの理論的記述を明らかにし、光加工や多光子レーザー顕微鏡に最適のフェムト秒光源の開発に活かされると期待される。

2. 研究の目的

非線型性が顕著に現れると期待されるクリーン量子構造半導体レーザーを作製し、数ピコ～フェムト秒の高速パルスを直接発生する物理機構および限界要因を解明する。高密度キャリアが反転分布を形成した状態における位相緩和時間を実際に評価し、利得スイッチと超放射のクロスオーバー効果を評価・解明し、対応する理論解析と比較しつつ短パルス発生限界を明らかにする。これまで、半導体レーザーからの短パルス発生は、利得スイッチ機構の範囲内でレート方程式レーザー理論に基づく設計・検討がされてきたが、フェムト秒領域では超放射機構まで含めたプロッホ方程式理論レベルの高度な検討を行う。利得スイッチングと超放射は、発生する光パルスの幅が、位相緩和時間よりも長いかわりに短いかわりでクロスオーバーするはずなので、反転分布状態における位相緩和時間測定を行い、2 領域の実測可能な判別基準を得る。

半導体レーザーから高速パルスを単発で直接発生できれば、パルス繰り返しや発生タイミングの自在制御が可能な小型堅牢光源として、レーザー加工や生命科学・医療分野などへの広い応用が拓ける。半導体材料は、極めて超高速の光学応答性を潜在的に有しているが、光強度やキャリア密度に対する強い非線型性の存在とその制御の困難、ダイオードとしての電氣的帯域制限などが障害となり、超高速性はまだ十分に引き出されてはいない。本研究では、半導体レーザー材料固有の非線型性を、回避ではなくむしろ積極的に活用し、フェムト秒の超高速パルスの直接発生を目指す。理論解析にも対応できる高均一・クリーンな試料を用いて実験を行い、特に、高密度キャリアが反転分布を形成した状態における位相緩和時間を評価しつつ、利得スイッチと超放射のクロスオーバー効果を評価・解明し、短パルス発生限界を解明することを目的とする。

3. 研究の方法

高密度キャリアが反転分布を形成した状態における位相緩和時間を実際に四光波混合法(光エコー法)により評価計測する。5ps パルス幅のプレパルスで量子井戸内に反転分布を形成し、同期発生した 300fs パルス幅の k1 および k2 光パルスを用いて四光波混合実験を行う。半導体レーザー構造試料は、不純物や欠陥など外因的效果を抑えた、均一性の高いクリーンで高品質のものを MBE 法により作製し用いる。

半導体レーザーからのフェムト秒高速パルスの直接発生的高速限界を実験的に明らかにする。電氣的帯域による制限を排除するため、光励起法を用いフェムト秒からピコ秒のパルス幅での

励起を試行する。高速オシロスコープおよびストリークカメラによるスペクトルダイナミクス計測と、自己相関計測による高速パルス幅評価を行い、半導体材料・ナノ構造の光素子としての非線型性や広帯域利得、高速緩和性を引き出しつつ、短パルス化のための設計指針を探り出し、それによって半導体レーザーからのフェムト秒パルス発生限界を実験によって明らかにする。標準的な試料として、高品質 GaAs 及び InGaAs 量子井戸を活性層に用いたリッジ型導波路レーザー構造試料を作製し、井戸層数や共振器寿命を変えた試料を系統的に作製し、導波路全体を一様に光インパルス励起し、短パルス発生の特徴や限界要因を、実験的に明らかにする。強い非線型性を引き出すため、多セクション型光励起量子井戸レーザーも作製し、同様の実験を行う。実験結果に基づいて、理論定式化を進め、物理機構や、短パルス限界を明らかにする。

4. 研究成果

超放射と利得スイッチのクロスオーバー効果の特徴付ける電子系の量子力学的コヒーレンスの発現を定量的に評価するために、高密度キャリアが反転分布を形成した状態における位相緩和時間を計測した。2台のレーザーを同期することで、試料の高密度光励起と四光波混合測定を同時に実現した。すなわち、励起用プレパルスの発生に用いる 5ps パルス幅のゲインスイッチレーザーと、四光波混合測定のための k1 および k2 パルスの発生に用いる 300fs パルス幅のチタンサファイアレーザーを電氣的に同期した。同期されたパルス間のタイミングジッターを 7.6ps と評価した。測定用試料として、不純物や欠陥など外因的効果を抑えた、均一性の高いクリーンで高品質の GaAs 量子井戸を MBE 法により作製し、発光および吸収スペクトルを測定して試料品質を評価した。以上の測定系と試料を用いて、四光波混合測定を行い、反転分布が形成された半導体での位相緩和時間を直接計測し、半導体レーザー動作時にコヒーレント現象が重要になる時間スケールを実験的かつ定量的に測定した。弱励起条件から徐々にキャリア密度を上げてゆくと、位相緩和時間は数 ps から、時間分解能 0.17ps 以下にまで減少したが、反転分布領域に達すると最長で 0.34ps まで伸長した。

この実験結果について、半導体ブロッホ方程式理論計算を行い、実験で得られた位相緩和時間の励起密度および試料温度依存性と比較し、位相緩和におけるキャリア間のクーロン相互作用や位相空間充填の寄与の評価を進めた。半導体ブロッホ方程式における散乱項を 2 次摂動までのレベルで計算し、実験で得られた位相緩和時間の励起密度依存性の特徴を解析し、位相緩和におけるキャリア間のクーロン相互作用や位相空間充填の寄与を解析した。学外の理論研究者とも議論を行い、定式化や解析の正当性を確かめた。結果として、高密度励起下での位相緩和時間が 0.3ps 以上になっているという実験結果が理論的にも説明可能であるとの結論を得た。この結果から、半導体レーザーからの利得スイッチ型の短パルス発生において、超放射の寄与が発生する可能性について肯定的な結論が得られた。

利得スイッチング実験の試料としては、これまで、GaAs 多重量子井戸試料を用いてきたが、測定用試料として、InGaAs 多重量子井戸試料を新たに設計し、MBE 法および MOCVD 法をもちいて作製した。発光スペクトルおよび強度の低温から常温までの温度依存性を測定して、高品質試料が得られていることを検証した。並行して、ハロゲン化鉛ペロブスカイト材料や InGaN 材料も準備し、光励起利得スイッチパルス発生実験を行った。GaAs 多重量子井戸試料と類似したパルスダイナミクスを観測し、現象の普遍性を確認した。実験と比較するために、パルス発生特性をシミュレートする計算コードを開発した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計35件（うち査読付論文 34件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Katsumi Ryota, Ota Yasutomo, Osada Alto, Tajiri Takeyoshi, Yamaguchi Takuto, Kakuda Masahiro, Iwamoto Satoshi, Akiyama Hidefumi, Arakawa Yasuhiko	4. 巻 116
2. 論文標題 In situ wavelength tuning of quantum-dot single-photon sources integrated on a CMOS-processed silicon waveguide	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 041103 ~ 041103
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5129325	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 H. Zhang, C. Zhao, S. Chen, J. Tian, J. Yan, G. Weng, X. Hu, J. Tao, Y. Pan, S. Chen, H. Akiyama and J. Chu	4. 巻 389
2. 論文標題 Lasing operation in the CsPbBr ₃ perovskite micron hemisphere cavity grown by chemical vapor deposition	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Chemical Engineering Journal	6. 最初と最後の頁 124395
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cej.2020.124395	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 Y. Murotani, C. Kim, H. Akiyama, L. Pfeiffer, K. West and R. Shimano	4. 巻 123
2. 論文標題 Light-Driven Electron-Hole Bardeen-Cooper-Schrieffer-Like State in Bulk GaAs	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Phys. Rev. Lett	6. 最初と最後の頁 197401
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.123.197401	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 R. Katsumi, Y. Ota, A. Osada, T. Yamaguchi, T. Tajiri, M. Kakuda, S. Iwamoto ¹ , H. Akiyama and Y. Arakawa	4. 巻 4
2. 論文標題 Quantum-dot single-photon source on a CMOS silicon photonic chip integrated using transfer printing	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 APL Photonics	6. 最初と最後の頁 36105
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5087263	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 G. Weng, S. Chen, Y. Mei, Y. Liu, H. Akiyama, X. Hu, J. Liu, B. Zhang and J. Chu	4. 巻 532
2. 論文標題 Multiwavelength GaN Based Surface Emitting Lasers and Their Design Principles	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ANNALEN DER PHYSIK	6. 最初と最後の頁 1900308
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/andp.201900308	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 Ryota Katsumi, Yasutomo Ota, Alto Osada, Takuto Yamaguchi, Takeyoshi Tajiri, Masahiro Kakuda, Satoshi Iwamoto ¹ , Hidefumi Akiyama, and Yasuhiko Arakawa	4. 巻 4
2. 論文標題 Quantum-dot single-photon source on a CMOS silicon photonic chip integrated using transfer printing	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 APL Photonics	6. 最初と最後の頁 36105
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5087263	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 Lin Zhu, Kan-Hua Lee, Masafumi Yamaguchi, Hidefumi Akiyama, Yoshihiko Kanemitsu, Kenji Araki, and Nobuaki Kojima	4. 巻 -
2. 論文標題 Analysis for Non-radiative Recombination in Quantum Dot Solar Cells and Materials	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Progress in Photovoltaics: Research and Applications	6. 最初と最後の頁 1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/pip.3110	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 Peiyu Xia, Changsu Kim, Faming Lu, Teruto Kanai, Hidefumi Akiyama, Jiro Itatani, and Nobuhisa Ishii	4. 巻 26
2. 論文標題 Nonlinear propagation effects in high harmonic generation in reflection and transmission from gallium arsenide	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 29393-29400
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.26.029393	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 Maki Kurata, Miyabi Hiyama, Takuma Narimatsu, Yuji Hazama, Takashi Ito, Yuhei Hayamizu, Xingping Qiu, Françoise M. Winnik and Hidehumi Akiyama	4. 巻 189
2. 論文標題 Synthesis and quantitative characterization of coumarin caged D-luciferin	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Photochemistry and Photobiology B	6. 最初と最後の頁 81-86
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jphotobiol.2018.10.002	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 Keita Miyagawa, Masaya Nagai, Genki Yamashita, Masaaki Ashida, Changsu Kim, Hidefumi Akiyama, and Yoshihiko Kanemitsu	4. 巻 113
2. 論文標題 Quantitative monitoring of the internal field in the depletion layer of a GaAs-based solar cell with terahertz radiation	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Appl. Phys. Lett	6. 最初と最後の頁 163501
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5037952	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 Kenji Kamide, Toshimitsu Mochizuki, Hidefumi Akiyama, and Hidetaka Takato	4. 巻 10
2. 論文標題 Nonequilibrium Theory on the Conversion Efficiency Limit of Solar Cells including Thermalization and Extraction of Carriers	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Phys. Rev. Applied	6. 最初と最後の頁 44069
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevApplied.10.044069 (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 Y. Hazama, Y. Ishida, L. Zhu, C. Kim, S. Shin, and H. Akiyama	4. 巻 10
2. 論文標題 Revealing Solar-Cell Photovoltage Dynamics at the Picosecond Time Scale with Time-Resolved Photoemission Spectroscopy	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Phys. Rev. Applied	6. 最初と最後の頁 34056
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevApplied.10.034056	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 L. Zhu, H. Akiyama and Y. Kanemitsu	4. 巻 8
2. 論文標題 Intrinsic and extrinsic drops in open-circuit voltage and conversion efficiency in solar cells with quantum dots embedded in host materials	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Scientific Report	6. 最初と最後の頁 11704
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-018-30208-z	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 Takashi Ito, Hidekazu Nakamae, Yuji Hazama, Takahiro Nakamura, Shaoqiang Chen, Masahiro Yoshita, Changsu Kim, Yohei Kobayashi, and Hidefumi Akiyama	4. 巻 4
2. 論文標題 Femtosecond pulse generation beyond photon lifetime limit in gain-switched semiconductor lasers	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Communications Physics	6. 最初と最後の頁 42
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s42005-018-0045-0	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 K. Uchida, T. Otake, T. Mochizuki, C. Kim, M. Yoshita, K. Tanaka, H. Akiyama, L. N. Pfeiffer, K. W. West, and H. Hirori	4. 巻 97
2. 論文標題 Coherent detection of THz-induced sideband emission from excitons in the nonperturbative regime	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Phys. Rev. B	6. 最初と最後の頁 165122
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.97.165122	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 Toshiteru Enomoto, Hidehiro Kubota, Kaneo Mori, Masahiro Shimogawara, Masahiro Yoshita, and Hidefumi Akiyama	4. 巻 64
2. 論文標題 Absolute bioluminescence imaging at the single-cell on an atto-Watt level	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 BioTechniques	6. 最初と最後の頁 270-274
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2144/btn-2018-0043	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 Zhen Wu, Takashi Ito, Hidefumi Akiyama, and Bin Zhang	4. 巻 35
2. 論文標題 Effect of interaction between the internal cavity and external cavity on beam properties in a spectrally beam combined system	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of the Optical Society of America A	6. 最初と最後の頁 772-778
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/JOSAA.35.000772	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 Nakamura Takahiro, Ito Takashi, Nakamae Hidekazu, Kim Changsu, Hazama Yuji, Kobayashi Yohei, Kuroda Ryunosuke, Akiyama Hidefumi	4. 巻 46
2. 論文標題 Direct generation of sub-picosecond pulse via multi-section gain switching	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Optics Letters	6. 最初と最後の頁 1277 ~ 1277
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OL.409822	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 Hu Xiaobo, Tao Jiahua, Wang Rui, Wang Youyang, Pan Yanlin, Weng Guoen, Luo Xianjia, Chen Shaoqiang, Zhu Ziqiang, Chu Junhao, Akiyama Hidefumi	4. 巻 493
2. 論文標題 Fabricating over 7%-efficient Sb ₂ (S,Se) ₃ thin-film solar cells by vapor transport deposition using Sb ₂ Se ₃ and Sb ₂ S ₃ mixed powders as the evaporation source	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Power Sources	6. 最初と最後の頁 229737 ~ 229737
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jpowsour.2021.229737	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 Weng Guoen, Yan Jiyu, Chen Shengjie, Zhao Chunhu, Zhang Hanbing, Tian Jiao, Liu Yuejun, Hu Xiaobo, Tao Jiahua, Chen Shaoqiang, Zhu Ziqiang, Akiyama Hidefumi, Chu Junhao	4. 巻 9
2. 論文標題 Superior single-mode lasing in a self-assembly CsPbX ₃ microcavity over an ultrawide pumping wavelength range	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Photonics Research	6. 最初と最後の頁 54 ~ 54
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/PRJ.409884	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 Weng Guoen, Tian Jiao, Chen Shengjie, Yan Jiyu, Zhang Hanbing, Liu Yuejun, Zhao Chunhu, Hu Xiaobo, Luo Xianjia, Tao Jiahua, Chen Shaoqiang, Zhu Ziqiang, Chu Junhao, Akiyama Hidefumi	4. 巻 8
2. 論文標題 Electron-Hole Plasma Lasing Dynamics in CsPbClmBr3-m Microplate Lasers	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ACS Photonics	6. 最初と最後の頁 787 ~ 797
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsp Photonics.0c01512	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 Wang Youyang, Li Liying, Sun Yifan, Xu Jinjia, Jia Yun, Hong Jianyu, Hu Xiaobo, Weng Guoen, Luo Xianjia, Chen Shaoqiang, Zhu Ziqiang, Chu Junhao, Akiyama Hidefumi	4. 巻 229
2. 論文標題 Adaptive automatic solar cell defect detection and classification based on absolute electroluminescence imaging	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Energy	6. 最初と最後の頁 120606 ~ 120606
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.energy.2021.120606	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 Miyagawa Keita, Nagai Masaya, Ashida Masaaki, Kim Changsu, Akiyama Hidefumi	4. 巻 42
2. 論文標題 Enhanced Magneto-Optical Kerr Effect of GaAs-Based P-N Junctions in the Terahertz Range	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves	6. 最初と最後の頁 325 ~ 337
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10762-021-00779-6	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 Katsumi Ryota, Ota Yasutomo, Osada Alto, Tajiri Takeyoshi, Yamaguchi Takuto, Kakuda Masahiro, Iwamoto Satoshi, Akiyama Hidefumi, Arakawa Yasuhiko	4. 巻 116
2. 論文標題 In situ wavelength tuning of quantum-dot single-photon sources integrated on a CMOS-processed silicon waveguide	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 041103 ~ 041103
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5129325	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 Katsumi Ryota, Ota Yasutomo, Osada Alto, Tajiri Takeyoshi, Yamaguchi Takuto, Kakuda Masahiro, Iwamoto Satoshi, Akiyama Hidefumi, Arakawa Yasuhiko	4. 巻 116
2. 論文標題 In situ wavelength tuning of quantum-dot single-photon sources integrated on a CMOS-processed silicon waveguide	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 041103 ~ 041103
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5129325	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 Shibata Keisei, Yan Jiyu, Hazama Yuji, Chen Shaoqiang, Akiyama Hidefumi	4. 巻 124
2. 論文標題 Exciton Localization and Enhancement of the Exciton-LO Phonon Interaction in a CsPbBr ₃ Single Crystal	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry C	6. 最初と最後の頁 18257 ~ 18263
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.0c06254	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 Usukura Junko, Hiyama Miyabi, Kurata Maki, Hazama Yuji, Qiu Xing Ping, Winnik Francoise M., Akiyama Hidefumi, Koga Nobuaki	4. 巻 96
2. 論文標題 Theoretical Study of the Wavelength Selection for the Photocleavage of Coumarin caged D luciferin	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Photochemistry and Photobiology	6. 最初と最後の頁 805 ~ 814
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/php.13212	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 Wang Ke-Yong, Wu Chun, Shimajiri Shohei, Enomoto Toshiteru, Kubota Hidehiro, Akiyama Hidefumi, Ohmiya Yoshihiro	4. 巻 69
2. 論文標題 Quantitative immunohistochemistry using an antibody-fused bioluminescent protein	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 BioTechniques	6. 最初と最後の頁 302 ~ 306
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2144/btn-2020-0006	査読の有無 無
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 Zhao Chunhu, Tao Jiahua, Tian Jiao, Weng Guoen, Liu Huimin, Liu Yuejun, Yan Jiyu, Chen Shengjie, Pan Yanlin, Hu Xiaobo, Chen Shaoqiang, Akiyama Hidefumi, Chu Junhao	4. 巻 0
2. 論文標題 High performance single-mode vertical cavity surface emitting lasers based on CsPbBr3 nanocrystals with simplified processing	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Chemical Engineering Journal	6. 最初と最後の頁 127660 ~ 127660
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cej.2020.127660	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 Zhang Hanbing, Zhao Chunhu, Chen Shengjie, Tian Jiao, Yan Jiyu, Weng Guoen, Hu Xiaobo, Tao Jiahua, Pan Yanlin, Chen Shaoqiang, Akiyama Hidefumi, Chu Junhao	4. 巻 389
2. 論文標題 Lasing operation in the CsPbBr3 perovskite micron hemisphere cavity grown by chemical vapor deposition	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Chemical Engineering Journal	6. 最初と最後の頁 124395 ~ 124395
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cej.2020.124395	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 J. Hong, Y. Wang, Y. Chen, X. Hu, G. Weng, S. Chen, H. Akiyama, Y. Zhang, B. Zhang and J. Chu	4. 巻 28
2. 論文標題 Absolute electroluminescence imaging with distributed circuit modeling: Excellent for solar cell defect diagnosis	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Prog Photovolt Res Appl	6. 最初と最後の頁 295
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/pip.v28.4	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 Zhu Lin, Hazama Yuji, Reddy Anurag, Watanabe Kentaroh, Nakano Yoshiaki, Sugiyama Masakazu, Akiyama Hidefumi	4. 巻 28
2. 論文標題 Modeling and design for low cost multijunction solar cell via light trapping rear texture technique: Applied in InGaP/GaAs/InGaAs triple junction	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Progress in Photovoltaics: Research and Applications	6. 最初と最後の頁 251 ~ 265
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/pip.3217	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 Nakamura Tetsuya, Imaizumi Mitsuru, Akiyama Hidefumi, Okada Yoshitaka	4. 巻 28
2. 論文標題 Practical target values of Shockley-Read-Hall recombination rates in state of the art triple junction solar cells for realizing conversion efficiencies within 1% of the internal radiative limit	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Progress in Photovoltaics: Research and Applications	6. 最初と最後の頁 417 ~ 424
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/pip.3251	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 Weng Guoen, Liu Yuejun, Chen Shaoqiang, Ito Takashi, Hu Xiaobo, Zhao Chunhu, Liu Jianping, Chu Junhao, Akiyama Hidefumi	4. 巻 59
2. 論文標題 Quantitative study of electron tunneling dynamics in asymmetric coupled InGaN/GaN quantum wells	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Optics	6. 最初と最後の頁 6231 ~ 6231
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/AO.396999	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 Chen Yuanjing, Wang Youyang, Wang Rui, Hu Xiaobo, Tao Jiahua, Weng Guo-En, Zhao Chunhu, Chen Shaoqiang, Zhu Ziqiang, Chu Junhao, Akiyama Hidefumi	4. 巻 3
2. 論文標題 Importance of Interfacial Passivation in the High Efficiency of Sb ₂ Se ₃ Thin-Film Solar Cells: Numerical Evidence	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ACS Applied Energy Materials	6. 最初と最後の頁 10415 ~ 10422
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsaem.0c01203	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29件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 勝見 亮太、太田 泰友、田尻 武義、岩本 敏、秋山 英文、Reithmaier J. P.、Benyoucef M.、荒川 泰彦
2. 発表標題 転写プリント法による通信波長帯量子ドット単一光子源のSi導波路上集積
3. 学会等名 第81回 応用物理学会 秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 宮川 敬太、永井 正也、芦田 昌明、金 昌秀、秋山 英文
2. 発表標題 円偏光THzパルスを用いたGaAsエピ膜の磁気光学Kerr分光
3. 学会等名 第81回 応用物理学会 秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 口良史, 樋山みやび, 志賀基之, 秋山英文, 杉野修
2. 発表標題 第一原理MD計算による水溶液中のオキシルシフェリン異性体の安定性機構の解明
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 玉谷知裕, 夏沛宇, Faming Lu, 金井輝人, 石井順久, 板谷治郎, 金昌秀, 秋山英文, 加藤岳生
2. 発表標題 GaAsを用いた非摂動論的な高次高調波発生の特性
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 秋山英文
2. 発表標題 超高速利得スイッチ半導体レーザー
3. 学会等名 Photonic Device Workshop 2020 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 秋山英文
2. 発表標題 量子細線から短パルス利得スイッチ半導体レーザーへ 内在する多体効果と光非線形性
3. 学会等名 レーザー学会第41回年次大会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 勝見 亮太、太田 泰友、田尻 武義、岩本 敏、秋山 英文、Reithmaier J. P.、Benyoucef M.、荒川 泰彦
2. 発表標題 ファイバーピグテール付きSi導波路上への量子ドット-ナノ共振器結合系の転写プリント集積
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中村 徹哉、今泉 充、ヤンワチラークン ワラーコン、杉山 正和、秋山 英文、岡田 至崇
2. 発表標題 ヘテロ接合太陽電池における狭ギャップベース層のEL強度と広ギャップエミッタ層不純物濃度の相関
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 秋山 英文
2. 発表標題 絶対EL計測に基づく太陽電池の内部損失評価と設計
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 秋山 英文
2. 発表標題 超高速利得スイッチ半導体レーザー
3. 学会等名 2020年電子情報通信学会 総合大会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 狭間優治, 石田行章, 黒田健太, 朱琳, 金昌秀, 辛埴, 秋山英文
2. 発表標題 時間分解分 光法を利用した太陽電池デバイス活性層での少数キャリア輸送および再結合特性 の評価
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山本拓, 西田寛太郎, 鈴浦秀勝, 秋山英文, 金光義彦
2. 発表標題 MAPbI3における温度効 果を取り入れた励起子光吸収スペクトルの理論計算
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次 大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高藤 誠、加藤 昇、船曳 晃弘、吉田 萌、宮川 勇人、狭間 優治、秋山 英文
2. 発表標題 希薄磁性半導体超格子GaGdAs:Si/GaAsの PL測定によるフェルミ面位置の推定 と磁気特性
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 勝見 亮太、太田 泰友、長田 有登、山口 拓人、田尻 武義、車 一宏、角田 雅 弘、岩本 敏、秋山 英文、荒川 泰彦
2. 発表標題 シリコン光回路上に集積された複数量 子ドット光源の局所発光波長制御
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 2019年

1. 発表者名 Y. Hazama, Y. Ishida, L. Zhu, C. Kim, S. Shin, and H. Akiyama
2. 発表標題 Monitoring minority-carrier transport and recombination in photovoltaic devices in real time
3. 学会等名 SPIE Photonics West
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kenji Kamide, Toshimitsu Mochizuki, Hidefumi Akiyama, and Hidetaka Takato
2. 発表標題 A concept of nonequilibrium solar cell "heat recovery solar cell
3. 学会等名 SPIE Photonics West
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 上出 健仁、望月 敏光、秋山 英文、高遠 秀尚
2. 発表標題 熱回収型太陽電池の温度特性 と熱起電力効果
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 夏 沛宇、金 昌秀、Faming Lu、石井 順久、金井 輝人、秋山 英文、板谷 治 郎
2. 発表標題 反射配置でのGaAsからの高次高調波発生と伝搬効果の評価
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 高橋 涉、高宮 健吾、八木 修平、狭間 優治、秋山 英文、矢口 裕之、鎌田 憲 彦、
2. 発表標題 二波長励起PL測定によるGaPN混晶のアップコンバージョン発光特性評価
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 勝見 亮太、太田 泰友、長田 有登、田尻 武義、車 一宏、山口 拓人、角田 雅 弘、岩本 敏、秋山 英文、荒川 泰彦
2. 発表標題 転写プリント法によるシリコン導波路 上への量子ドット単一光子源の集積
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 室谷悠太、金昌秀、秋山英文、島野亮
2. 発表標題 バルクGaAsにおける励起子の近赤外光 ドレスト状態の観測
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高山正行, 室谷悠太, 金昌秀, 秋山英文, 島野亮
2. 発表標題 バルクGaAsにおける重い正孔 - 軽い正孔混合励起子分子の誘導吸収の観測
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山本拓, 西田寛太郎, 鈴浦秀勝, 秋山英文, 金光義彦
2. 発表標題 ハロゲン化鉛ペロブスカイト半導体における励起子束縛状態の光吸収スペクトルについての理論的考察
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 薄倉淳子, 樋山みやび, 倉田麻貴, 挟間優治, Xingping Qiu, Francoise Winnik, 古賀伸明, 秋山英文
2. 発表標題 水溶液中のクマリン・ケージドルシフェリンの吸収スペクトルの理論的研究
3. 学会等名 第12回分子科学討論会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Lin Zhu, Yuji Hazama, Changsu Kim, Michael Slocum, Zachary Bittner, Seth Hubbard, Hidefumi Akiyama
2. 発表標題 Experimental analysis of open-circuit voltage drop in quantum-dot solar cells via absolute electroluminescence measurement
3. 学会等名 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion
4. 発表年 2018年

1 . 発表者名 Kenji Kamide, Toshimitsu Mochizuki, Hidefumi Akiyama2, and Hidetaka Takato
2 . 発表標題 A solar cell enabling heat recovery without fast carrier extraction
3 . 学会等名 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Y. Hazama, Y. Ishida, L. Zhu, C. Kim, S. Shin, and H. Akiyama
2 . 発表標題 Contactless measurement of pico-to-nanosecond dynamics of photovoltage: its utility and constraint
3 . 学会等名 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Shusaku Kanaya, Dayna Erdmann, Gyu Min Kim, Masashi Ikegami, Youhei Numata, Tsutomu Miyasaka, Yuji Hazama, Hidefumi Akiyama, Kohtaku Suzuki, Kanta Osonoe, Tomoyuki Yamamoto, Yu Miyazawa, Hiroyuki Toyota, and Kazuyuki Hirose
2 . 発表標題 Radiation Evaluation from the Carrier Life Time and Structure Studied of Perovskite Solar Cells for Space Application
3 . 学会等名 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Tetsuya Nakamura, Lin Zhu, Masahiro Yoshita, Mitsuru Imaizumi, Hidefumi Akiyama, Yoshitaka Okada
2 . 発表標題 Quantitative loss analysis of voltage output characteristics on multi-junction solar cells
3 . 学会等名 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion
4 . 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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	挟間 優治 (HAZAMA YUJI) (80759150)	東京大学・物性研究所・助教 (12601)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------