

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 16 日現在

機関番号：82636

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560434

研究課題名(和文)半導体テラヘルツ光源に関する研究

研究課題名(英文)Study on Semiconductor Terahertz Light Sources

研究代表者

関根 徳彦 (Sekine, Norihiko)

独立行政法人情報通信研究機構・未来ICT研究所超高周波ICT研究室・研究マネージャー

研究者番号：10361643

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、テラヘルツ帯におけるコンパクトな光源として期待されるテラヘルツ帯量子カスケードレーザに着目し、その性能向上を目的としている。量子カスケードレーザの活性層構造や導波路構造の最適構造の検討、更にレーザ素子としてのダイナミクスの実験的評価を行い、構造の工夫により更なる性能向上が期待できること、またレーザ駆動時の素子内部の挙動について新たな知見が得られた。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research project is to improve performance of terahertz quantum cascade lasers which are expected as compact coherent light sources in the terahertz region. We have numerically investigated both active-region structures to create higher gain and waveguide structures to improve thermal and optical properties. As a result, we have proposed an optimum active-region structure and a new waveguide design for improving the performance of the terahertz quantum cascade lasers. Furthermore, we have investigated lasing characteristics experimentally by optical injection method to gain insights into dynamics in the terahertz quantum cascade lasers.

研究分野：工学

キーワード：テラヘルツ 光デバイス カスケード レーザ

1. 研究開始当初の背景

近年、数百ギガヘルツ～数十テラヘルツの周波数帯である、いわゆるテラヘルツ (THz) 領域の電磁波を用いた研究が、様々な分野で行われている。これは、基礎物性分野においては分子の回転・振動準位や水素結合のような分子間の振動など、分子の構造や運動状態について多くの情報が得られるエネルギー領域になっているためである。また、このような事実に基づき、応用面では、郵便物の内容物検査や生体細胞、更には抗原抗体反応のラベルフリー化など、セキュリティ・バイオインフォマティクスへの展開が期待されており、様々な機関で研究開発が進められている。一方、情報通信分野では、光通信の大容量化に伴い、有線と速度差のない超高速無線化が求められつつある。従来は無線でも比較的長距離を伝搬させることが必要だったために、利用周波数帯はミリ波帯までに限られていたが、ラストアクセスのボトルネック解消のため、より高い周波数帯を利用した超高速無線の検討も始まっており、THz 帯の短距離大容量無線通信への期待が高まっている。

このような状況の中、気体・分子などの分光を考えると、できる限り線幅の狭い光源が必要であり、また無線通信応用では、やはり位相雑音の低い CW 動作 (かつ小型) の THz 帯光源が切望されている。

我々のグループでは、上記条件を満たし得るデバイスとして THz 帯量子カスケードレーザ (THz Quantum Cascade Laser) に着目し、国内ではいち早く発振に成功している [1]。また、THz 帯量子カスケードレーザの高性能化について言えば、発振特性を大いに向上させることが期待できる基本構造を早期に提案しており [2]、その実現に向けた研究を行う意義は大きい。基本構造にまで立ち戻った研究は、国内外を通じて報告例も少なく、端緒に着いたばかりである。そのため、理論面・実験面の双方から、非常に注目されている領域である。

THz 帯量子カスケードレーザは、THz 帯という超長波長帯ならではの困難に対する様々な工夫があるものの構造的にはこれまで成功してきた中赤外領域の量子カスケードレーザのものを踏襲したものになっており、根本的な解決になっていない。これに対して、本研究では、レーザ動作原理の根本に立ち返り、更に量子ナノ構造の設計自由度を最大限に利用して、本質的な特性の向上を目指すところに最大の特色があり、独創性の発揮されるところである。そのため、本研究により THz 帯量子カスケードレーザの格段の性能向上が期待される。更に、デバイスモジュールとしての検討も行うことにより、1 個のシステムとしての性能向上を同時に目指すため、本研究全体としてバランスのとれた非常に意義のあるものとなっている。

[1] I. Hosako *et al.*, Proc. of the IEEE **95**,

1611 (2007).

[2] 関根徳彦、平川一彦、“量子カスケードレーザ”、特願 2006-181502

2. 研究の目的

本研究では上記の状況を鑑み、コンパクトなテラヘルツ光源の実現に向け、高性能 THz 帯量子カスケードレーザの実現に寄与することを目指し、量子カスケードレーザの活性層構造や導波路構造の最適構造の検討、レーザ素子のダイナミクス解明を目的とする。

3. 研究の方法

従来、図 1 のような構造を活性層を持つ THz 帯量子カスケードレーザが提案・原理実証がなされた。これは、多重量子井戸構造中のサブバンド間遷移による発光を利用したレーザであり、我々も実際に構造作製・評価を行ってきた。しかしながら、現状では低温でしか発振は実現されておらず、世界的に見ても最高動作温度はパルス動作で 190K 程度に留まっている。THz 帯量子カスケードレーザでは、導波路損・反転分布という光学特性もさることながら、発光に参与する電子のキャリアダイナミクス (エネルギー緩和、位相緩和、共鳴トンネル現象) という電子物性的な側面も、レーザ特性に多大に影響を及ぼしている。そこで、より大きな利得を有し、温度に対してロバストな特性を実現するための量子カスケード構造をシミュレーションにより検討し、また実験的には光学的手法を用いて THz 帯量子カスケードレーザの物性解明に取り組んだ。

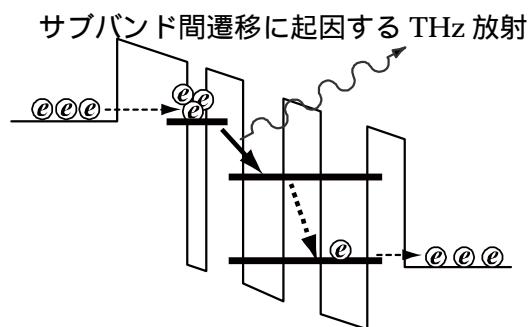


図 1 : 典型的な量子カスケードレーザの活性層部分における多重量子井戸のエネルギーバンド構造

(1) THz 帯量子カスケードレーザ導波路構造の検討 :

THz 帯量子カスケードレーザは、その発振波長が 100 μm 程度と非常に長い為、導波路構造のディメンジョンも従来のバンド間遷移型レーザと比して巨大となる (e.g. 活性層幅 $\sim 100 \mu\text{m}$ 、厚み $\sim 10 \mu\text{m}$)。そこで、従来とは異なるレーザ作製プロセスが採用されているが、同じ構造でも別のグループが行うと最高動作温度が更に高くなるといった報告があるように、確立されたものであると

は言い難い。特に高い動作温度の実現のためには、デバイスとしての熱マネジメントが非常に重要となる。そこで、高性能かつ安定動作が見込める THz 帯量子カスケードレーザ実現のための、最適なデバイス構造を THz 光の導波特性と導波路自身の放熱特性の観点から、電磁界解析と熱解析を組み合わせて検討し、性能を律速している物理機構を明らかにする。

(2) THz 帯量子カスケードレーザ活性層構造の検討：

THz 帯量子カスケードレーザは、その発振には、量子井戸内に形成される量子準位間でキャリアの大きな反転分布を得ることが必要であるが、良好な温度特性を有するレーザとするためには、電子のキャリアダイナミクス（キャリアのエネルギー緩和・位相緩和や準位間の共鳴トンネル現象など）の理解が不可欠である。しかも、量子準位は複数存在するため、その複雑な挙動を理解することは容易ではない。そこで本課題では、非平衡グリーン関数法を用いた第一原理計算を行うことにより、活性層構造を変えた際のキャリアダイナミクスと、それが利得に与える影響を明らかにする。

(3) THz 帯量子カスケードレーザの物性解明：

THz 帯量子カスケードレーザは、その発振原理の大まかな理解はなされているが、その詳細な物理は、解明途上にある。そこで、本課題では、光パルスを外側より入射することによりカスケードレーザ内部に擾乱を与え、結果として現れる発振特性の変化を観測することにより、動作機構について議論する。

4. 研究成果

(1) THz 帯量子カスケードレーザ導波路構造の検討：

THz 帯量子カスケードレーザによく用いられる導波路構造には、半絶縁プラズモン（SISP）導波路とメタル-メタル（MM）導波路の2つがあるが、ここでは熱特性が良いとされる MM 導波路構造を用いて、更なる特性向上の検討を行った。今回、我々はマルチストライプ活性層導波路を提案した（図2）。

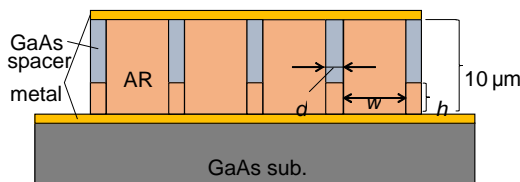


図2：提案したマルチストライプ型導波路

ここで AR は活性層を表し、w：分割活性層幅、d：GaAs スペース幅、h：残留活性層高

さである。全体の活性層の幅は 100 μm、高さは 10 μm としている。この d、w、h をパラメータとして、まずは熱解析を行った。熱解析に於いては、thermo-electrical coupling を考慮し、活性層部分は一般的な GaAs/AlGaAs 量子井戸構造を仮定した際の物性値と、電流-電圧特性については測定値を採用した。また、比較対象として従来の単一活性層構造についても解析しており、その結果の一例を図3に示す。

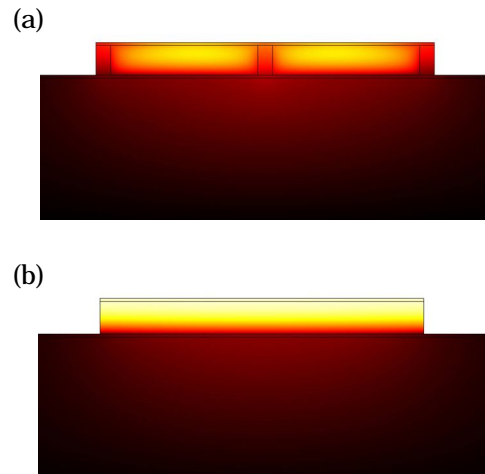


図3：各種導波路構造の動作電流値における温度分布。(a)2ストライプ活性層、(b)単一活性層

図3(a)では、2分割ストライプ構造における温度分布でヒートシンクとの温度差 (ΔT) は約 60K となった。一方の単一ストライプ構造では、 $\Delta T \sim 84K$ となり、分割した方が 20K もの温度上昇を抑えられている。これは、スペーサー層に AlGaAs よりも熱伝導率の高い GaAs を用いることによって、活性層中心部の熱を効率よく除去できているためである。しかし一方で、この分割構造により光学特性が劣化してしまうことが懸念されるため、電磁界解析も同時に行った（図4）。

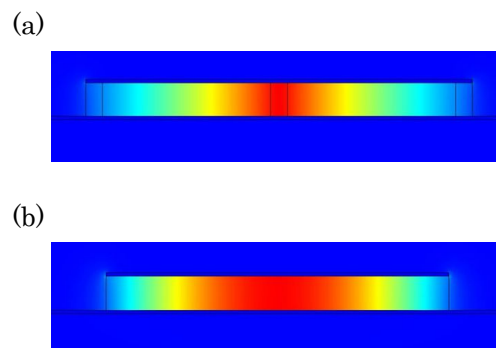


図4：各種導波路構造における導波モードの電界分布。(a)2ストライプ活性層、(b)単一活性層

図 4(a)を見ると、高屈折率の GaAs スペースが中心に位置しているため、界分布が若干中心に寄っているが、活性層への閉じ込め率 (Γ) で見ると 2 分割ストライプ構造でも $\Gamma \sim 0.88$ という、高い値が得られており、光学特性が劣化させることなく、熱特性が向上で来ていることが分かった。

上記のように、THz 帯量子カスケードでは、熱特性と光学特性の双方が、素子特性にとって重要であるため、以下の性能指数 (Figure of Merit: FOM) を定義した。

$$FOM = \frac{\Gamma}{\Delta T / P_{in}} = \frac{\Gamma \times P_{in}}{\Delta T} \quad (1)$$

式(1)は、利得が高いほど (Γ が大きいほど)、また単位入力電力 ($P_{in} = I \times V$) 当たりの温度上昇が小さいほど大きな値となり、導波路として高い性能を持つことを示す。この指標を用いて、残留活性層高さ h の影響をみたが、この場合、単純に $h=0$ に向かって FOM が上昇する傾向となった。これは、熱伝導率の低い材料がスペース部分になるべく無い方が良いという至極当たり前の理由による。

次に、 $h=0$ に固定し、分割数をパラメータとして、スペース幅を変えた際の、 Γ と ΔT の振る舞いを調べた結果を図 5 に示す。

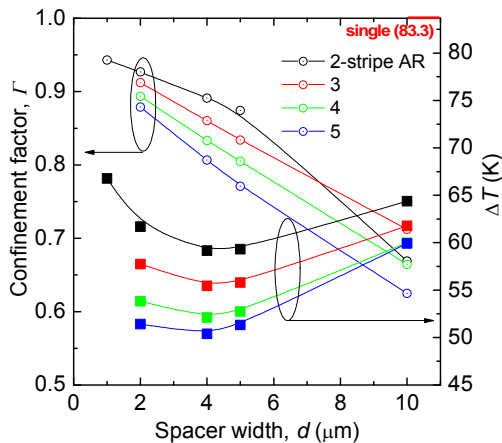


図 5 : 閉じ込め率 Γ と温度差 ΔT のスペース幅 d 依存性。

Γ については、 d に対して単調減少の依存性を示すが、これは d が増大すると、活性層より高い屈折率を持つスペース材料の GaAs 部分に電界がより閉じ込められるため、結果として Γ が減少していくのである。一方、 ΔT については、最少となるスペース幅 ($d_0 \sim 4 \mu\text{m}$) が存在することがわかる。これは、 $d < d_0$ の場合、幅の狭さのために活性層お中心付近で発生した熱の引き抜きが上手くいなくなるためである。一方、 $d > d_0$ では、熱分布の広がりよりも広い幅となるため、 d 依存性は若干緩やかになるが、そもそも全体の導

波路幅が広がっていくので、(電流密度一定の条件としているため)電流としての値が増え、 ΔT が増加してゆく。

上記の振る舞いを FOM でまとめたものが図 6 である。

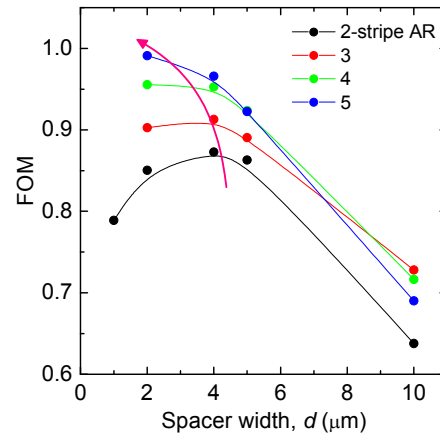


図 6 : FOM のスペース幅依存性

これを見ると一目瞭然で、分割数に寄らず最適なスペース幅が存在する。また、その由来は図 5 で述べた通りであり、 $d < d_0$ では ΔT が、 $d > d_0$ では Γ が支配的となる。また、 $d \sim d_0$ では分割数が多いほど FOM が増大するが、これは GaAs スペースを通した熱の引き抜きが効率的に起こるためと考えられる。

(2) THz 帯量子カスケードレーザ活性層構造の検討 :

前節では導波路構造の検討を行ったが、レーザ特性の向上のためには活性層構造が重要なことは言うまでもない。しかし、活性層構造は多重量子井戸から成っており、1 周期内の GaAs 井戸厚や AlGaAs 障壁厚がキャリアの緩和時間やサブバンドのエネルギー準位などに影響し、そのパラメータ空間は膨大なものになる。そこで、非平衡グリーン関数法による第一原理計算を用いて、構造パラメータのレーザ特性に与える影響を調べた。

THz 帯量子カスケードレーザの活性層構造は、共鳴フォノン引き抜き型では図 7 に示すようなものになっている。

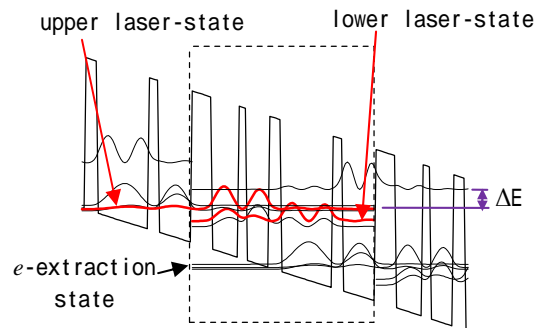


図 7 : THz QCL の活性層構造の一例 (resonant-phonon depopulation 型)

ここで、ゲイン特性に注目すると、(1)レーザ上上位準位と下位準位間における振動子強度 (f_{ij})、(2)レーザ上位準位から下位準位への散乱時間 (τ_{ul}) とレーザ下位準位からの光学フォノン散乱時間 (τ_{LO}) の比 (τ_{ul}/τ_{LO})、(3)レーザ上位準位とその直近のキャリアリーク準位間のエネルギー差 (ΔE) が重要である。そこで、井戸層厚・障壁層厚を変えることにより、この3つの指標の振る舞いを調べ、最適な活性層構造の探索を行った。

散乱時間等の計算をするにあたり、ここではパラメータ数の少ない二重量子井戸から成る活性層を仮定し、想定発振波長は3~4THz、障壁層のAl組成は0.3、動作電界を $E_{op} = 22 \text{ kV/cm}$ とした。この仮定を元に、簡単な計算を行うと、二重量子井戸の井戸幅は、それぞれ 10.8/9.4 nm と求められる。これに2つの障壁層 (l, m) の厚みをパラメータとしてふるることにより、 $[f_{ij}, (\tau_{ul}/\tau_{LO}), \Delta E]$ を求めた。

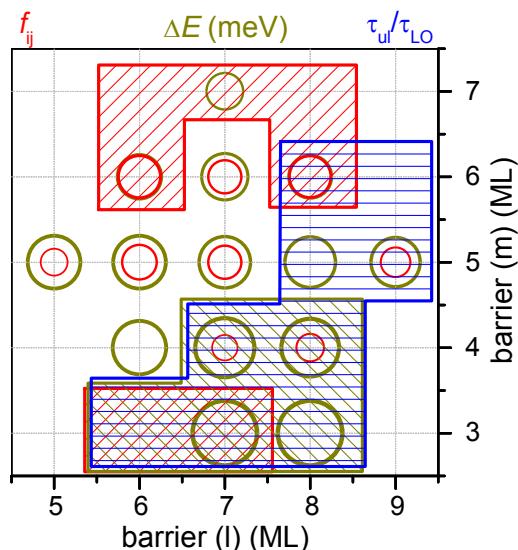


図8 : $[f_{ij}, (\tau_{ul}/\tau_{LO}), \Delta E]$ の障壁層厚依存性

計算結果から求められる指標をプロットしたものを図8に示す。これを見ると、各指標の障壁層厚依存性が異なることが分かる。この依存性の違いは、注目する準位の波動関数の重なり、レーザ上位・下位準位の diagonality 等を反映したものであり、この影響の仕方の違いが出ているものと言える。今回の場合、電子の注入準位とレーザ上位準位に挟まれた障壁層厚を6~7 monolayer (ML)、もう一方を3 ML とするのが最適という結果が得られたため、更にこの数値を用いて利得の計算を行った(図9)。これを見ると、 $>50 \text{ cm}^{-1}$ というピーク利得が得られており、通常の GaAs 系の利得 ($10 \sim 20 \text{ cm}^{-1}$) と比べても非常に大きくなることが分かった。温度依存性については、200K を超えると利得が消失してしまい、決して良いものではなかったが、更なる検討によって多少の温度上昇が見込める状況である。

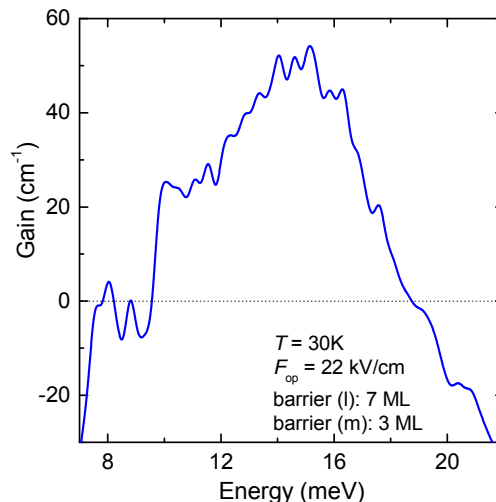


図9 : 図8 から得られた障壁層厚の組み合わせを用いて得られた利得スペクトル

(3) THz 帯量子カスケードレーザの物性説明:

THz 帯量子カスケードレーザ活性層内部の挙動を調べるために、外部からの光パルス入射による応答を観測した。ここで用いた素子は、標準的な共鳴フォノン引き抜き型活性層であり、SISP 導波路を組み合わせさせた Fabry-Pérot 共振器レーザである(発振周波数: $\sim 3.3 \text{ THz}$ 、共振器サイズ: 幅 $200 \mu\text{m}$ 、長さ 3 mm 、活性層厚み $\sim 20 \mu\text{m}$)。これに近赤外光パルス ($\lambda = 800 \text{ nm}$ 、 150 fs 幅) を、QCL 端面に照射し、その発振スペクトルを測定した。その結果、通常の発振スペクトルと比して、スペクトルシフトやピークマージなど、複雑な挙動を示していることが分かった。これらのピークは、水平横モード TM_{0m} に対応しており、パルスの有無によるモード変化は、各横モードの空間分布と注入パルス形状の空間的重なりによる実効的ミラー損失を考慮することで定性的に説明できることが明らかになった。

5. 主な発表論文等

[学会発表](計14件)

酒瀬川洋平、齋藤伸吾、関根徳彦、笠松章史、芦田昌明、竇迫巖、“テラヘルツ量子カスケードレーザの水平横モードに対する光制御”、第62回応用物理学会春季学術講演会、2015年3月11日、東海大学(神奈川県・平塚市)

酒瀬川洋平、齋藤伸吾、関根徳彦、笠松章史、芦田昌明、竇迫巖、“共振器端面プラズマによるテラヘルツ量子カスケードレーザの強度変調”、第75回応用物理学会秋季学術講演会、2015年9月18日、北海道大学(北海道・札幌市)

Y. Sakasegawa, S. Saito, N. Sekine, A.

Kasamatsu, M. Ashida, and I. Hosako, "A novel analytical model for optical injection in terahertz quantum cascade lasers", 24th IEEE International Semiconductor Laser Conference (ISLC2014), 9/9/2014, Palma de Mallorca (Italy).

N. Sekine and I. Hosako, "The effect of structural parameters on terahertz quantum cascade lasers", the 35th Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS2014), 26/8/2014, Guangzhou (China).

N. Sekine, A. Kasamatsu, and I. Hosako, "Waveguide structure in THz quantum cascade lasers for high-performance operation", International Symposium on Frontier of Terahertz Science, 5/8/2014, Okinawa Institute of Science and Technology (Okinawa, Onna-son).

酒瀬川洋平、齋藤伸吾、関根徳彦、芦田昌明、竇迫巖、"テラヘルツ量子カスケードレーザの光強度変調における熱の影響"、第61回応用物理学会春季学術講演会、2014年3月17日、青山学院大学(神奈川県・相模原市)

関根徳彦、安田浩朗、竇迫巖、"テラヘルツ帯量子カスケードレーザの高性能化へ向けて"、レーザー学会学術講演会第34回年次大会、2014年1月21日、北九州国際会議場(福岡県・北九州市)[招待講演]

Y. Sakasegawa, N. Sekine, S. Saito, M. Ashida, and I. Hosako, "Influence of ultra-short- infrared optical pulse injection into terahertz quantum cascade laser", 21th International Conference on Applied Electromagnetics and Communications (ICECom 2013), 16/10/2013, Dubrovnik (Croatia). [invited]

酒瀬川洋平、齋藤伸吾、関根徳彦、芦田昌明、竇迫巖、"近赤外光パルスによるテラヘルツ量子カスケードレーザの強度変調II"、第74回応用物理学会学術講演会、2013年9月16日、同志社大学(京都府・京田辺市)

N. Sekine and I. Hosako, "Design of waveguide structure in terahertz quantum cascade lasers for higher operation temperature", the 34th Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS2013), 14/8/2013, Stockholm (Sweden).

Y. Sakasegawa, S. Saito, N. Sekine, M. Ashida, and I. Hosako, "Near-infrared Pulse Induced Modulation of Quantum

Cascade Lasers", the 10th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim, and the 18th OptoElectronics and Communications Conference/ Photonics in Switching 2013 (CLEO-PR & OECC/PS 2013), 3/7/2013, Kyoto International Conference Center (Kyoto, Kyoto).

Y. Sakasegawa, S. Saito, N. Sekine, M. Ashida, and I. Hosako, "Near-Infrared Laser Pulse Induced Amplitude Modulation of Terahertz Quantum Cascade Lasers", Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO2013), 13/6/2013, San Jose (U.S.A.).

Y. Sakasegawa, S. Saito, N. Sekine, M. Ashida, and I. Hosako, "Near-infrared femtosecond-pulse injection in terahertz quantum cascade lasers", International Workshop on Optical Terahertz Science and Technology 2013 (OTST2013), 2/4/2013, Kyoto Terrsa (Kyoto, Kyoto).

Y. Sakasegawa, N. Sekine, S. Saito, M. Ashida, and I. Hosako "Intensity Modulation of THz-Quantum Cascade Lasers by NIR Optical Pulse Injection", 3rd International Symposium on Terahertz Nanoscience (TeraNano III), 10/12/2012, Hawaii (U.S.A.). [invited]

[産業財産権]
出願状況(計1件)

名称: テラヘルツ帯光素子導波路
発明者: 関根徳彦、竇迫巖
権利者: 情報通信研究機構
種類: 特許
番号: 特願 2013-085435
出願年月日: 2013年4月16日
国内外の別: 国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者
関根 徳彦 (Norihiko Sekine)
独立行政法人 情報通信研究機構・未来ICT研究所・超高周波ICT研究室・研究マネージャー
研究者番号: 10361643

(2) 研究分担者
()
研究者番号:

(3) 連携研究者
()
研究者番号: