

令和 3 年 5 月 31 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2019～2020

課題番号：19K21957

研究課題名（和文）半導体非対称二重障壁ヘテロ構造を用いた新規熱電子放出冷却素子に関する萌芽的研究

研究課題名（英文）Novel thermionic cooling effect in asymmetric double barrier semiconductor heterostructures

研究代表者

平川 一彦（Hirakawa, Kazuhiko）

東京大学・生産技術研究所・教授

研究者番号：10183097

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：現代のエレクトロニクスにおいては、素子の内部で発生する熱が、素子の動作や信頼性に大きな影響を与え始めている。従って、素子の高効率な冷却技術は、エレクトロニクスの発展の鍵を握る技術と言っても過言ではない。特に、個々のデバイスやLSIチップで高温になっている部分を効率よく冷却する固体デバイス技術が早急に求められている。

本研究では半導体ヘテロ構造のバンド構造を適切に設計し、熱電子放出と共鳴トンネル効果を同時に制御して実現できる熱電子放出冷却技術に注目して研究を行い、それに対する新しい理論（解析的理論および数値計算）を構築するとともに、素子構造の最適化や多層化による冷却パワーの増大の提案を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現代のエレクトロニクスは、素子の高密度集積化と高速動作を達成することにより大きな発展を遂げてきた。しかし、同時に素子の内部で発生する熱が、素子の動作や信頼性に大きな影響を与えはじめており、エレクトロニクスの発展を大きく阻んでいる。本研究では、半導体薄膜構造におけるトンネル効果と熱電子放出効果をうまく組み合わせ、標準的な半導体材料を用いながら、大きな冷却パワーと高い冷却効率をもつ半導体ヘテロ構造冷却素子を実現することを目標としている。

研究成果の概要（英文）：In modern electronics, the heat generated inside devices has begun to have a significant effect on the operation and reliability of the devices. Therefore, the highly efficient cooling technology for devices is the key technology for the progress of electronics. In particular, there is an urgent need for solid-state device technology that efficiently cools hot parts of individual devices and LSI chips.

In this research, we have focused ourselves on the thermionic cooling technology that can be realized by appropriately designing the band structure of the heterostructure and controlling the thermionic emission and resonance tunneling effect at the same time. We have developed a new analytical theory as well as a numerical computer code to optimize the device structure and compared the results with experiment.

研究分野：量子半導体エレクトロニクス

キーワード：冷却素子 半導体ヘテロ構造 トンネル効果 熱電子放出

### 1. 研究開始当初の背景

現代の LSI や光エレクトロニクスは、素子の高密度集積化と高速動作を達成することにより大きな発展を遂げてきた。しかし、同時に素子の内部で発生する熱が、素子の動作や信頼性に大きな影響を与えはじめており、エレクトロニクスの発展を大きく阻んでいる。ナノスケールのデバイス中では、電子が高い電界にさらされて走行するため、加速された電子の運動エネルギーが、半導体結晶に緩和し発熱する。現在、LSI チップの発熱密度は  $100 \text{ Wcm}^{-2}$  を超え、結晶の温度は  $400 \text{ K}$  を超えるレベルに達している。従って、素子の高効率な冷却技術は、将来のエレクトロニクスの発展の鍵を握る技術と言っても過言ではない。

効率的な冷却技術は、エネルギー資源の枯渇が問題となりつつある現在、技術的にも環境的にも極めて重要な課題の一つである。現在、サーバーなどシステムの冷却は、液体または空気 (ファン) による冷却を用いていることが多い。しかし、系全体を冷却するような方法は、非常に電力を消費することがわかっている。例えば、データセンターで消費されるエネルギーの約  $40\%$  が冷却に費やされている [1]。したがって、個々のデバイスや LSI チップで高温になっている部分を効率よく冷却する固体デバイス技術が早急に求められている。

従来、固体冷却素子は、ほとんど熱電効果 (ペルチェ効果) に基づいたものが使われている。ペルチェ素子は「グリーン」な技術として注目されており、古くから確立された技術でもある。しかし、熱電冷却はほぼ熱的に平衡な状態で動作し、電子は材料中を拡散的に伝搬する。その過程でジュール熱を発生させるため、冷却能力と効率が低下する。また、ペルチェ素子に適した材料は BiTe などの特異な物質であり、通常の半導体プロセス技術との整合性が悪いなどの問題があった。

### 2. 研究の目的

我々は半導体ヘテロ構造のバンド構造を適切に設計し、熱電子放出と共鳴トンネル効果を同時に制御して実現できる熱電子放出冷却技術に注目している [2]。我々が検討を行っているのは、図 1 (a) に示すような非対称二重障壁ヘテロ構造である。この素子においては、バイアスの印加によって、トンネル障壁を介して量子井戸に低エネルギーの電子が共鳴的に注入される。しかし、出口側のエネルギー障壁は厚いため、トンネル効果では脱出することができない。従って、電子が量子井戸を脱出するときには、厚い出口側の障壁を熱的に越えていく過程が必要となる。従って、電流が量子井戸を通して流れるに従い、電子が熱的に励起される分だけエネルギーを奪う過程が起こり、量子井戸層が冷却されていくと言うのが素子の動作原理である (図 1 (b) 参照)。電子系に関しては分布関数の高エネルギー部分が熱電子放出でカットされ、電子温度が下がる (蒸発電子冷却; evaporative cooling)。このとき、冷却された電子系に接している格子系も電子-格子相互作用により冷却される (熱電子放出冷却; thermionic cooling)。我々の予備的なフォトルミネセンスの実験では、電子が共鳴的に注入されるに従い、量子井戸中の電子温度が室温から約  $50 \text{ K}$  も冷却されることを見いだしている [3]。

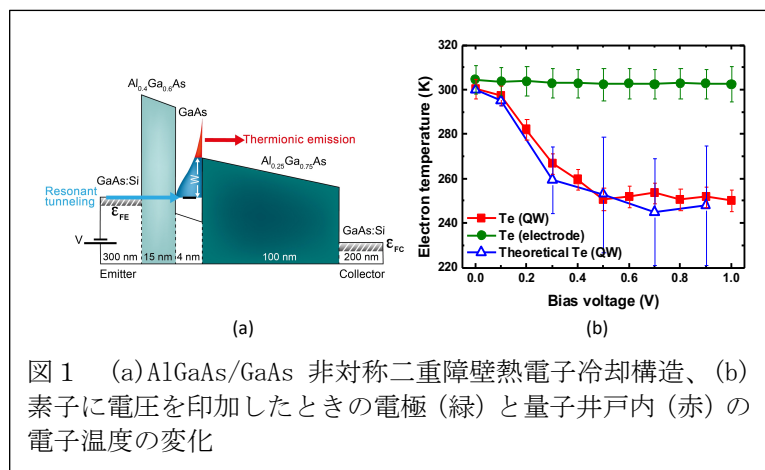


図 1 (a) AlGaAs/GaAs 非対称二重障壁熱電子冷却構造、(b) 素子に電圧を印加したときの電極 (緑) と量子井戸内 (赤) の電子温度の変化

このような背景の下、本研究では以下の 4 点を目的として研究を遂行する； 1) 非対称二重障壁構造のパラメータを系統的に変化させ、量子井戸内の電子系の冷却を支配するパラメータを明らかにする、 2) 素子構造を最適化し、電子温度の冷却を最大化する、 3) 大きな冷却効果を得るための多層構造化など新しい素子構造の探索を行う。

### 3. 研究の方法

本研究における研究内容は以下の通りである；

1) 分子線エピタキシー法により非対称二重障壁ヘテロ構造を成長し、電流-電圧測定から共鳴トンネル成分とバイアス電圧の関係、電流の温度依存性を測定することにより量子井戸内の量子準位の熱励起活性化エネルギーを求める。さらに、素子構造のパラメータを変化させ、フォトルミネセンスのスペクトルより量子井戸と電極内の電子温度を求め、電子温度を支配する構造パラメータを明らかにする。

2) 非対称二重障壁ヘテロ構造の動作の理解と素子の最適化のために、直感的に理解しやすい解析的理論を構築する。

3) 非平衡グリーン関数を用いて数値的な理論計算を行い、より精密かつ定量的な計算を行うとともに、より高い性能を得るための新しい構造の探索に取り組む。

#### 4. 研究成果

##### 1) 非対称二重障壁ヘテロ構造の作製と伝導評価

図2 (a)は、様々な温度で測定した典型的な AlGaAs/GaAs 非対称二重障壁冷却素子構造の電流-電圧特性を示す。本素子構造では、共鳴トンネル効果と熱電子放出を組み合わせることで電流が流れることを反映して、 $V < 0.8$  V 以下の非常に温度依存性が強い領域と  $V > 0.8$  V 以上の温度依存性が弱い領域があることがわかる。

また、図2 (b)は様々な電圧で測定した電流の温度依存性を示したものである。研究を開始した当初は、電流の活性化エネルギーは量子井戸中の量子準位と出口側障壁（コレクタ障壁と呼ぶ）高さの差が活性化エネルギーになると考えていたが、図2 (b)に示すように活性化エネルギーはバイアス電圧により大きく変化していることがわかる。このことは、本素子の動作の理解、素子構造の最適化には、素子の伝導を記述するための理論を構築する必要があることを示している。

またフォトルミネセンスにより電子温度を評価したところ、おおよそ共鳴トンネル注入が最大化する電圧付近（図2の素子では約1.2 V）において最も電子温度が下がることがわかった。

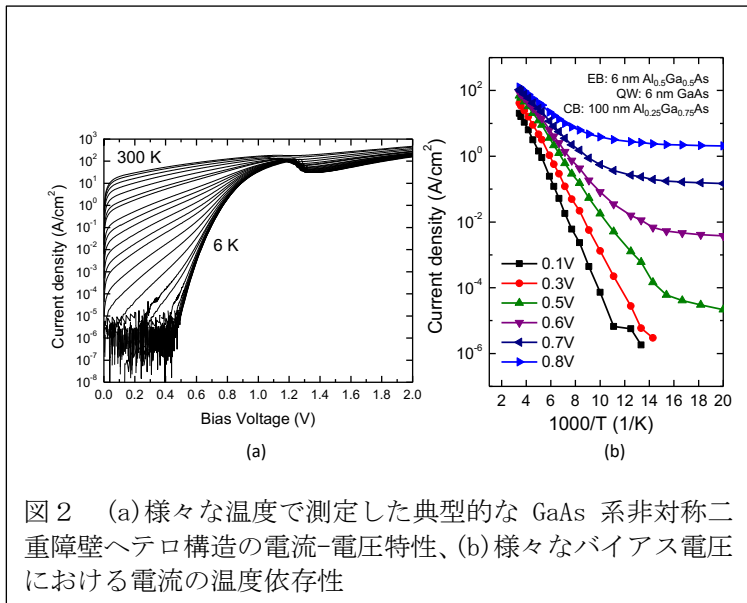


図2 (a)様々な温度で測定した典型的な GaAs 系非対称二重障壁ヘテロ構造の電流-電圧特性、(b)様々なバイアス電圧における電流の温度依存性

##### 2) 非対称二重障壁冷却素子構造の解析的な電気伝導理論の構築

非対称二重障壁冷却素子構造を経由して流れる電流の振る舞いを理解するために解析的な理論を構築した。量子井戸内の電子冷却に貢献する電流は、エミッタから量子井戸内に共鳴トンネルにより注入され、その後、熱電子放出によりコレクタに放出される電流成分である。この伝導は、電子が一旦量子井戸中で記憶を失うために取り扱いが難しい。

この問題を解決するために、量子井戸内に蓄積する電子の擬フェルミ準位  $\mu_{QW}$  をパラメータとして、エミッタから量子井戸への共鳴トンネル電流注入、量子井戸からコレクタ障壁上への熱電子放出を計算し、電流連続を満たすように  $\mu_{QW}$  を自己無撞着に決定するという方法を確立した。

さらに、量子井戸からコレクタ障壁上への放出は、これまで古典的な3次元電子系に対する Richardson 公式を用いて表されてきた。しかし、量子井戸では界面に沿う方向にしか電子は自由度を持たないため、量子井戸中の2次元電子が、界面に垂直な方向への速度成分を持って熱電子放出されるためには、電子が散乱を受ける必要がある。

この問題に関しては、フランスのエコールノルマルスーペリエア (ENS) の Bastard 名誉教授のグループと共同研究を行い、光学フォノン、音響フォノン、イオン化不純物、界面ラフネスなどの散乱を考慮した散乱支援熱電子放出の理論を構築して頂いた。その結果、電子が L0 フォノン散乱を介して熱電子放出される過程がもっとの大きな寄与をすること、室温付近の熱電子放出活性化エネルギーが、L0 フォノンのエネルギーだけ小さくなる可能性があることが明らかになった。この散乱支援熱電子放出理論と共鳴トンネル効果を取り入れた解析理論の計算をしたところ、実験とよい一致を見ることができた。特に、バイアス電圧により、活性化エネルギーが変化して見えること、室温近傍で  $J-1/T$  依存性が単純な熱活性化型から変化する振る舞いなども説明できることがわかった。(上記1, 2については論文準備中)

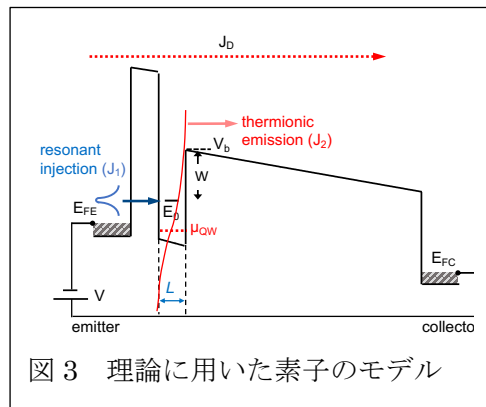


図3 理論に用いた素子のモデル

##### 3) 素子構造のパラメータと冷却性能の理論予測

本研究で扱っている熱電子冷却素子は、電圧が印加された非平衡な状態でのみ動作をする素子である。また、電子と結晶の間の熱のやりとりも考慮しなくてはならず、理論的には非常に難しい対象である。我々は、非平衡な系を最も精密に表すと考えられている非平衡グリーン関数法と熱の方程式を連立させて、素子中の電子状態、電流スペクトル、電子系の分布関数、冷却パワーなどを系統的に調べ、素子の性能予測を行う研究も行った[4]。我々が扱っている熱電子冷却素子の冷却性能は、いくつかのパラメータに依存する。主なものは量子井戸内の量子準位とコレクタ障壁の高さの差で表される活性化エネルギー $W$ であり、これはコレクタ障壁を越えて熱電子放出される電子がコレクタ層に持ち去る平均エネルギーを決定する量である。

簡単のために、量子井戸の厚さ $L_W$ を変化させることで、活性化エネルギー $W$ が冷却特性に与える影響を解析しよう。量子閉じ込め効果により、 $L_W$ を厚くすると量子井戸内の量子準位が下がり、その結果、活性化エネルギー $W$ が増加する。図4(a)に、3つの $L_W$ の値(4nm, 6nm, 12nm)に対する冷却パワー $P_c$ の計算結果を示す[4]。冷却パワーは、3つの構造で同様の電圧依存性を示す。低電圧領域では、冷却パワー $P_c$ は小さな値から始まり、 $V = 0.3$  Vで最大値に達し、再び減少する。今回検討した $L_W$ では、最大冷却パワーはおおよそ $8 \times 10^6$  W/m<sup>2</sup>から $1.7 \times 10^7$  W/m<sup>2</sup>の範囲にあった。この冷却パワーの値は、ペルチェ素子で報告されている値[5]と比べると約100倍ほど大きな値である。また、 $L_W = 4$  nmの場合に最も冷却能力が高くなる。この $L_W = 4$  nmの場合は、活性化エネルギー $W$ が $L_0$ フォノンのエネルギーとほぼ等しくなる場合に対応する。 $L_W$ を厚くしていくと、量子準位が下がり、量子井戸内の電子は複数の極性光学フォノンを吸収して脱出しなくてはならなくなるため、電流が減少し、冷却パワーが減少する。

図4(b)に、素子の冷却パワー $P_c$ と投入する電力( $P_e = JV$ ;  $J$ は素子を通る電流密度)の比( $P_c/P_e$ )として定義される性能係数(coefficient of performance; COP)を示す。すべての構造において、COPは電圧の増加とともに減少する。この特徴は、冷却電力が、おおよそ $WJ$ に比例すると考えれば、簡単に説明できる。COPは、 $P_c/P_e = WJ/VJ = W/V$ と書くことができ、おおよそCOPが $V$ に反比例することがわかる。図4(b)で、 $L_{QW} = 4$  nmと $L_{QW} = 12$  nmの構造で、それぞれ最小と最大のCOPが得られていることが、このような簡単な考察から理解することができる。

COPの電圧依存性を見てみると、 $V = 0.5$  Vで1%未満から、 $V = 0.05$  Vで250%まで上昇する。この傾向は、冷却素子に共通するジレンマを表している。つまり、低バイアスではCOPは高くても、冷却パワーが小さい状態にある。一方、高バイアスでは冷却パワーが増大してもCOPが低い状況になる。この傾向は、 $L_W$ を変化させた時にも成り立つ。例えば、図4(b)の例では、最高の冷却パワーは $L_W = 4$  nmの時に得られるが、このときCOPは最も小さくなる。

単純なモデルで予測した $COP = W/V$ の関係は、あくまでも非常に単純化したモデルであり、COPは印加電圧 $V$ に単純には反比例して減少しないことに注意が必要である。実際、 $V > 0.3$  Vの電圧領域では、COPの減少が大きくなる。これは、我々の素子構造におけるコレクタ障壁のポテンシャル形状が、電圧とともに次第に傾き、やがて三角形の形状となることに起因している。この三角形のポテンシャル障壁は、電圧の上昇とともに実効的な厚みが減少する形であり、このことがトンネル効果を誘発し、電子が厚いコレクタ障壁をトンネルで透過し始めるようになる。トンネル効果はエネルギーの変化を伴わない過程であるため、トンネル効果が起きるようになると、冷却能力が減少する。

このバイアス電圧の増大に伴うCOPの劣化を抑制するために、我々はコレクタ障壁

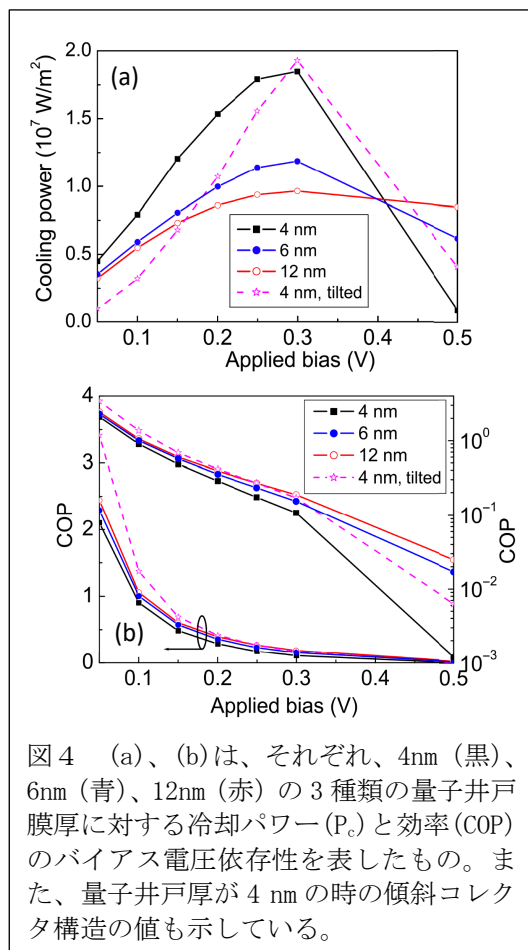


図4 (a)、(b)は、それぞれ、4nm (黒)、6nm (青)、12nm (赤)の3種類の量子井戸膜厚に対する冷却パワー( $P_c$ )と効率(COP)のバイアス電圧依存性を表したものの。また、量子井戸厚が4 nmの時の傾斜コレクタ構造の値も示している。

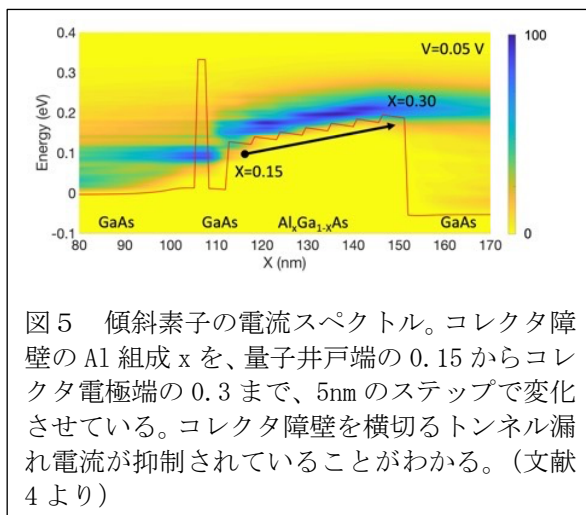


図5 傾斜素子の電流スペクトル。コレクタ障壁のAl組成 $x$ を、量子井戸端の0.15からコレクタ電極端の0.3まで、5nmのステップで変化させている。コレクタ障壁を横切るトンネル漏れ電流が抑制されていることがわかる。(文献4より)

を傾斜させた構造も提案している[4]。コレクタ障壁のエネルギーを量子井戸側からコレクタ電極側に向けて、次第に高くし、最適な動作電圧で、コレクタ障壁が平らに見えるような構造である。このようなポテンシャル形状は、コレクタ障壁内のアルミニウムの組成を徐々に上げていくことで実現することができる。図6で、 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  コレクタ障壁のアルミニウム組成を量子井戸側の端で  $x = 0.15$  からコレクタ電極端で  $x = 0.3$  となるように変化させた構造の計算結果を示す。得られた冷却電力と COP をそれぞれ図4(a)と図4(b)に示す。傾斜したコレクタ障壁を持つ素子は、同じ  $L_{\text{QW}}$  を持つ従来の矩形のコレクタ障壁を持つ構造と比較して、全バイアス範囲にわたって (少なくとも 60%) 優れた COP を持っていることがわかる。実際、傾斜したコレクタ障壁は、トンネル効果による熱電子の漏れを減少させ、各電子が取り出すエネルギー量を増加させ、より良い効率につながっている[4]。

#### 4) 多層化による冷却パワーの増大

本熱電子冷却素子において最も重要な部分は、電子がエネルギー障壁をジャンプして、飛び上がる過程である。これまでの研究では、量子井戸内の準位からコレクタ障壁に電子が脱出する過程が1段階しかない。そこで、熱電子放出冷却素子の冷却パワーや冷却効率 (COP) を改善する目的で、伝導する電子が多段のエネルギー障壁を登るような構造を設計し、大きな冷却効果が実現できると考えている。

非平衡グリーン関数法を用いて、多段熱電子放出構造を設計・解析した。半導体多層量子井戸構造を上手く設計し、図6(a)のような素子構造を設計すると、右側の電極に正の電圧を印加しても、電子が伝導するためには、多層量子井戸中の量子化準位を次々に登っていく必要がある (量子カスケードクーラー構造)。このとき、電子は次第に運動エネルギーを失っていくので、電子は冷却されていく。このように半導体ヘテロ構造を多層化し、より大きな冷却能力が得られることが、量子カスケードクーラー構造の特徴である。

量子カスケードクーラー構造では、大きな冷却パワーを得るためには、素子に適切な電圧を印加した状態における各層での量子準位のエネルギー差が重要であり、ちょうど各段におけるエネルギー差  $\Delta E$  (図6(a)中の赤い矢印の長さ) がおよそ結晶中の縦光学フォノンエネルギー (GaAs の場合にはおよそ  $\hbar\omega_{\text{LO}} \sim 36 \text{ meV}$ ) になるように設計したとき、大きな冷却パワーが得られることがわかった。(本研究内容は、日本、EU で特許提出予定)

#### 参考文献

- [1] M. Avgerinou, P. Bertoldi, and L. Castellazzi, "Trends in data centre energy consumption under the European code of conduct for data centre energy efficiency," *Energies* 10, 1470 (2017).
- [2] K. A. Chao, M. Larsson, and A. G. Mal'shukov, "Room-temperature semiconductor heterostructure refrigeration", *Appl. Phys. Lett.* 87, 022103 (2005).
- [3] A. Yangui, M. Bescond, T. Yan, N. Nagai, and K. Hirakawa, "Evaporative electron cooling in asymmetric double barrier semiconductor heterostructures," *Nature Commun.* 10, 4504 (2019).
- [4] M. Bescond, K. Hirakawa, "High performance thermionic cooling devices based on tilted-barrier semiconductor heterostructures," *Phys. Rev. Appl.*, 14, 064022 (2020).
- [5] D. Zhao and G. Tan, *Appl. Thermal Eng.* 66, 15 (2014).

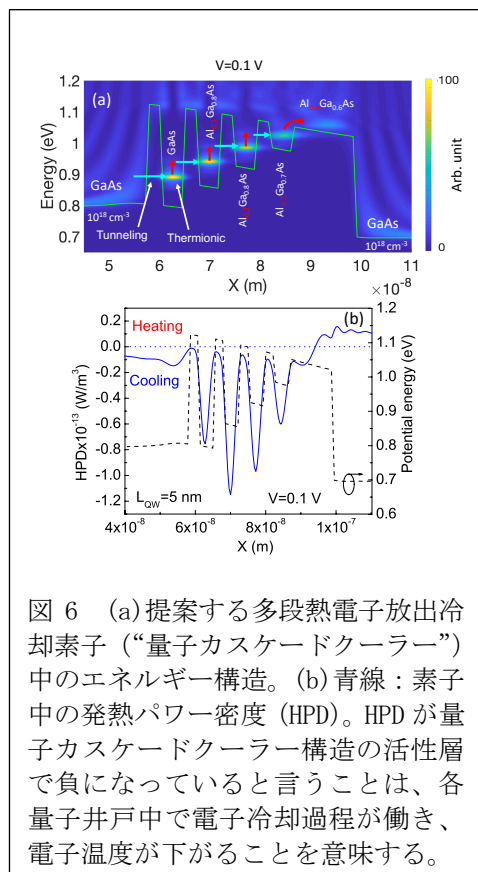


図6 (a)提案する多段熱電子放出冷却素子 (“量子カスケードクーラー”) 中のエネルギー構造。(b)青線: 素子中の発熱パワー密度 (HPD)。HPD が量子カスケードクーラー構造の活性層で負になっていると言うことは、各量子井戸中で電子冷却過程が働き、電子温度が下がることを意味する。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Bescond Marc, Hirakawa Kazuhiko	4. 巻 14
2. 論文標題 High-Performance Thermionic Cooling Devices Based on Tilted-Barrier Semiconductor Heterostructures	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Applied	6. 最初と最後の頁 064022-1-9
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevApplied.14.064022	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 Niu Tianye, Qiu Boqi, Zhang Ya, Hirakawa Kazuhiko	4. 巻 59
2. 論文標題 Control of absorption properties of ultra-thin metal?insulator?metal metamaterial terahertz absorbers	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 120904-1-5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1347-4065/abc925	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 Qiu Boqi, Zhang Ya, Akahane Kouichi, Nagai Naomi, Hirakawa Kazuhiko	4. 巻 117
2. 論文標題 Effect of beam deflection on the thermal responsivity of GaAs-based doubly clamped microelectromechanical beam resonators	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 203503-1-5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0029188	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 Ya, Kondo Ryoka, Qiu Boqi, Liu Xin, Hirakawa Kazuhiko	4. 巻 14
2. 論文標題 Giant Enhancement in the Thermal Responsivity of Microelectromechanical Resonators by Internal Mode Coupling	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Applied	6. 最初と最後の頁 014019-1-8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevApplied.14.014019	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 マーク・ベスコン、平川一彦	4. 巻 (掲載可)
2. 論文標題 半導体量子構造を用いた高効率熱電子放出冷却素子の可能性	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 自動車技術	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 該当する

1. 著者名 Yangui Aymen, Bescond Marc, Yan Tifei, Nagai Naomi, Hirakawa Kazuhiko	4. 巻 10
2. 論文標題 Evaporative electron cooling in asymmetric double barrier semiconductor heterostructures	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-019-12488-9	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計9件(うち招待講演 2件/うち国際学会 3件)

1. 発表者名 M. Bescond and K. Hirakawa
2. 発表標題 Highly efficient thermionic cooling semiconductor device: the Quantum Cascade Cooler
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 T. Niu, N. Morais, B. Qiu, N. Nagai, Y. Zhang, Y. Arakawa, K. Hirakawa
2. 発表標題 Effect of Reststrahlen band and phonon absorption on the response spectra of GaAs-based MEMS terahertz bolometers
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 T. Niu, N. Morais, B. Qiu, N. Nagai, Y. Zhang, Y. Arakawa, K. Hirakawa
2. 発表標題 GaAs-based MEMS terahertz bolometers fabricated on high-resistivity Si substrates using wafer bonding technique
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 X. Zhu, M. Bescond, G. Bastard, N. Nagai, K. Hirakawa
2. 発表標題 Activation behavior of I-V characteristics in semiconductor thermionic cooling heterostructures
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 平川 一彦、張 亜、邱 博奇、牛 天野、近藤諒佳、長井奈緒美
2. 発表標題 MEMS技術を用いた高感度・高速テラヘルツセンシング
3. 学会等名 MWE 2020 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 M. Bescond, A. Yangui, T. Yan, N. Nagai, K. Hirakawa
2. 発表標題 Evaporative electron cooling in asymmetric double barrier semiconductor heterostructures: experimental analysis and numerical optimization
3. 学会等名 International Symposium on Hybrid Quantum Systems (HQS) 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年



1. 発表者名	M. Bescond, A. Yangui, C. C. Tang, T. F. Yan, N. Nagai, and K. Hirakawa
2. 発表標題	Electron cooling in asymmetric double-barrier heterostructure: the evaporative approach
3. 学会等名	The 21st International Conference on Electron Dynamics in Semiconductors, Optoelectronics and Nanostructures (EDISON 21) (国際学会)
4. 発表年	2019年

1. 発表者名	M. Bescond, A. Yangui, T. Yan, N. Nagai, and K. Hirakawa
2. 発表標題	Evaporative electron cooling in asymmetric double barrier semiconductor heterostructures
3. 学会等名	International Workshop on Computational Nanotechnology (IWCN) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年	2019年

1. 発表者名	M. Bescond, A. Yangui, N. Nagai, and K. Hirakawa
2. 発表標題	熱電子放出ヘテロ構造を用いた電子と格子の冷却効果:量子カスケード冷却素子
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

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

半導体ヘテロ構造を用いた新しい原理の高効率冷却デバイスを開発  
<http://www.iis.u-tokyo.ac.jp/ja/news/3164/>

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
研究協力者	ベスコン マーク  (Bescond Marc)	東京大学・LIMMS-CNRS・研究員	非平衡グリーン関数を用いた理論数値計算
研究協力者	長井 奈緒美  (Nagai Naomi)	東京大学・生産技術研究所・特任研究員  (12601)	半導体ヘテロ構造試料の結晶成長
研究協力者	バスタード ジェラルド  (Bastard Gerald)	エコールノルマルスーペリア・物理学科・名誉教授	散乱を介した熱電子放出に関する解析理論の構築

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		
フランス	マルセイユ大学	エコールノルマルスーペリア (パリ)	エコールポリテクニック