

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 5 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2010～2012

課題番号：22241036

研究課題名（和文）半導体ヘテロ構造中の量子準位間遷移とテラヘルツ共振器輻射場の超強結合の物理と応用

研究課題名（英文）Physics and applications of strong coupling between intersublevel transitions in semiconductor heterostructures and electromagnetic waves in terahertz resonators

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

研究成果の概要（和文）：

我々は、半導体量子構造を強いテラヘルツ電磁場の中に置き、その量子伝導を制御することを目的として研究を行った。主な成果は以下の通りである；

- 1) 半導体超格子に強いテラヘルツ電磁波を照射することにより、高電界ドメインの発生を抑制することに成功した。
- 2) 量子ドットにナノギャップ電極を形成することにより、量子ドットとテラヘルツ電磁波の強い結合を実現し、テラヘルツ光子支援トンネル効果により単一電子の伝導を制御することに成功した。

研究成果の概要（英文）：

We have investigated control of electron transport in semiconductor quantum nanostructures by irradiating intense terahertz radiation. The main results are the following;

- 1) By irradiating semiconductor superlattices with intense terahertz radiation, we have succeeded in suppressing high-field domains that hinder terahertz Bloch oscillation.
- 2) We have succeeded in controlling single electron transport by focusing intense terahertz radiation on single quantum dots through nanogap electrodes and inducing photon-assisted tunneling.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	18,400,000	5,520,000	23,920,000
2011年度	9,100,000	2,730,000	11,830,000
2012年度	9,100,000	2,730,000	11,830,000
年度			
年度			
総計	36,600,000	10,980,000	47,580,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：ナノ・マイクロ科学／マイクロ・ナノデバイス

キーワード：半導体超格子、量子ドット、テラヘルツ

1. 研究開始当初の背景

テラヘルツ (THz) 領域の電磁波は、イメージング、セキュリティ、化学・薬学、バイオ研究などの分野で様々な応用が期待されている。しかし、今後のさらなる応用展開には、コンパクトで高機能な固体 THz 光源の開発が急務である。

これまで我々は、江崎玲於奈博士らが 1970 年に提案した半導体超格子を用いたブロッホ発振器に注目して研究を進めてきた。半導体超格子中のブロッホ振動は、ポテンシャルに周期性を持つ結晶ならではの特異な効果であり、ブロッホ発振器の実現は“固体物理学の夢”でもある。我々は、THz 分光法を駆使して、ブロッホ振動する電子が THz 領域に広いスペクトルを有する利得を持っていることを世界に先駆けて明らかにした。現在、ブロッホ発振器の実現には、半導体超格子中のブロッホ振動を阻害する高電界ドメインの発生を抑制することが大きな課題として残されている。

一方、半導体量子構造中の量子準位間隔など典型的なエネルギースケールは、THz の光子エネルギーの領域に有り、THz 電磁波を用いることにより、その物性の解明のみならず、その制御も可能になると考えられる。

最近、我々は単一の自己組織化 InAs 量子ドットにナノギャップ電極を形成した単一量子ドットトランジスタが自然に単一電子トランジスタとして動作することを見だし、様々な特異な伝導特性とその応用の研究を行ってきた。さらなる高機能の実現のためには、電子伝導をダイナミックに制御する技術の確立が不可欠である。

2. 研究の目的

上記の背景に鑑み、本研究では、以下の 2 点を目標に研究を行った。

(1) 半導体超格子を用いたブロッホ発振器実現において、最後に残された課題は超格子の微分負性抵抗に起因する高電界ドメインの発生をいかに抑制するかである。本研究では、半導体超格子に強いテラヘルツ電磁波を照射することにより、交流大振幅動作を誘起し、高電界ドメインの発生を抑制する方法を確立する。

(2) 単一量子ドットトランジスタに強い THz 電磁波を照射し、光子支援トンネル効果を誘起することにより、単一電子の伝導をダイナミックに制御する基礎を確立する。そのためには、長波長の THz 電磁波と数十 nm オーダーの量子ドットを強く結合させることが必要であり、その技術を確立する。

3. 研究の方法

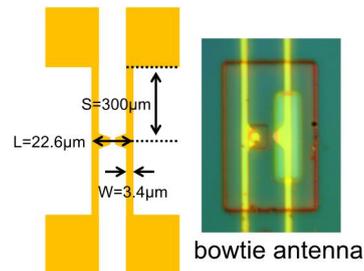
(1) 半導体超格子中の高電界ドメインの抑制

用いた試料は約 $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ の Si をドープした GaAs/AlAs 超格子であり、 $10 \times 10 \text{ } \mu\text{m}^2$ のメサ構造にダイポールアンテナを集積化したものである。また試料の裏面には Si の超半球レンズを装着し、THz 電磁波を強く集光できるように工夫した。

本実験には高強度の THz 光源が必要であり、2 種類の実験を行った。まず第一は、ジャイロトロンを用いた実験である。用いた福井大学のジャイロトロンは 400 GHz で発振し、最大 60 W の出力が得られるものである。試料の加熱を避けるために、試料にはパルス電圧を印加し、ボックスカー積分器を用いて超格子を流れる電流を計測した。このとき、ジャイロトロンからの電磁波を照射し、サブ THz 光の有無による電流の変化を計測するという実験を行った。

第二は、CO₂ レーザ励起の分子ガスレーザを用いた実験である。分子としてはメタノールを用い、119 μm で発振し、最大出力は 110 mW であった。

図 1 メタノールレーザからの 2.5 THz の電



磁波を集光するために、アンテナ構造と集積化した超格子試料

(2) 単一量子ドットトランジスタの THz 伝導制御

本研究の最も大きな課題は、波長 100 μm オーダーの THz 電磁波をいかに効率よく数十 nm オーダーの量子ドットと結合させるかである。我々は、量子ドットトランジスタにおいて量子ドットに接触している金属ナノギャップ電極をアンテナ形状に加工し、これを用いて THz 電磁波を量子ドット部に集光することとした。さらに、試料裏面に Si 半球レンズを装着し、THz 電磁波を数十 μm オーダーに集光することにより、アンテナにより THz 電磁波を効率よく集光できるようにした。

用いた光源は、CO₂ レーザ励起メタノールレーザであり、119 μm で発振させた。

図 2 (左) は試料の SEM 像を示したものであり、(右) は Si レンズを装着したときの試料の配置を示したものである。

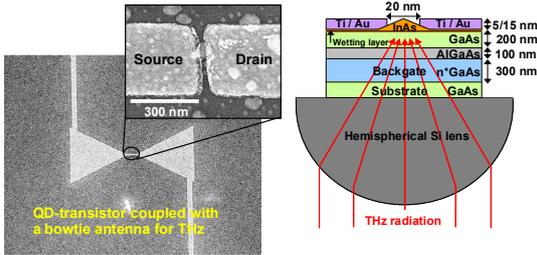


図2 (左) 単一の量子ドットにボウタイアンテナ形状の電極を形成した試料のSEM像、(右) Si レンズを装着した試料の模式図

4. 研究成果

(1) 半導体超格子中の高電界ドメインの抑制

半導体超格子は本来微分負性抵抗を有しているが、電流-電圧測定では高電界ドメインの形成のために、なめらかに増加する電流-電圧特性を示す。この状態でジャイロトロンからの 400 GHz の放射を照射したところ、図3に示すように、電流-電圧特性に大きな変化は見られなかった。

しかし、詳細に見てみると、出力が 28 W 以上で、照射電磁波パワーに依存しないバイアス不動点が観測された。この不動点以下のバイアス電圧では、電磁波の照射とともに電流が減少し、一方、不動点以上の電圧では電流が増加する傾向がかすかに見えた。しかし、その変化は非常に小さかった。

その理由は、ジャイロトロンからの THz 光子エネルギー 1.7 meV が、超格子内の電子の散乱による準位広がり比べて、同程度であることが問題であることに気づいた。

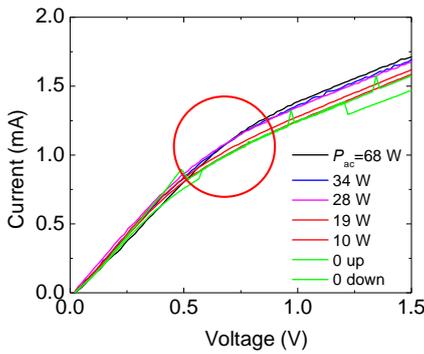


図3 ジャイロトロンからの 400 GHz の電磁波を照射したときの超格子の電流-電圧特性

そこで、我々はメタノールレーザからの 2.5 THz の電磁波を用いることにした。ただし、メタノールレーザの出力は 110 mW と小さいため、超格子の層数を 10 程度に減少させて、素子内部の THz 電界を高くする工夫を行った。

図4は 2.5 THz の THz 電磁波を照射したときの超格子の電流-電圧特性を示したもので

ある。出力が 20 mW 以上の領域で、照射電磁波パワーに依存しないバイアス不動点が観測された。この不動点以下のバイアス電圧では、電磁波の照射とともに電流が減少し、一方、不動点以上の電圧では電流が増加する傾向を明瞭に見ることができた。また、不動点のバイアス電圧はテラヘルツ電磁波の光子エネルギー $h\omega$ に超格子の層数 N をかけた値 $Nh\omega/e$ にほぼ等しかった。このことは、メタノール分子レーザからのテラヘルツ電磁波の照射により、高電界ドメインが消失し、超格子中に均一な電界分布が実現できたことを意味している。

本研究は、強い (サブ) テラヘルツの電磁波の照射により高電界ドメインが抑制できることを実験的に初めて示したものであり、電圧駆動型のブロッホ発振器の実現に向けた大きな一歩となった。

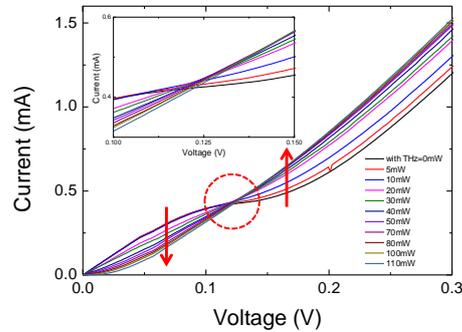


図4 メタノールレーザからの 2.5 THz の THz 電磁波を照射したときの電流-電圧特性

(2) 単一自己組織化 InAs 量子ドットを介した THz 光支援トンネル効果の観測

本研究では、図2に示すように、単一量子ドットトランジスタにメタノールレーザからの周波数 2.5 THz の THz 電磁波を照射し、試料の THz 光応答を調べた。図5(a)に作製した InAs 単一量子ドットトランジスタ試料に対して得られたクーロンダイヤモンド特性を示す。電子数 $N = 2$ までの明瞭なクーロンダイヤモンドが観測された。また $N = 1$ と 2 のクーロンダイヤモンドの大きさから、この素子では、 $\Delta E_{sp} \sim 30$ meV、 $E_C \sim 17$ meV となり、照射する THz 光のエネルギー ($hf_{THz} = 10.4$ meV) よりも十分に大きい。

図5(b)に 2.5 THz の THz 電磁波を照射した時のクーロンダイヤモンド特性を示す。THz 光照射下では、クーロンダイヤモンドの境界線に沿って、新たな伝導度の上昇が観測された。THz 照射により現れた伝導率ピークはクーロンダイヤモンドの境界線から、エネルギー的に ~ 10 meV だけシフトした位置に現れることがわかった。

図5(c)に THz 光照射の有無でのクーロン振動特性を示す。THz 光照射下において、新

たにサイドピークが観測され、サイドピークとクーロン振動ピークのエネルギー間隔は THz 光のエネルギーに一致する。以上より、このサイドピークは THz 光により誘起された光支援トンネルによるものであると結論できた。

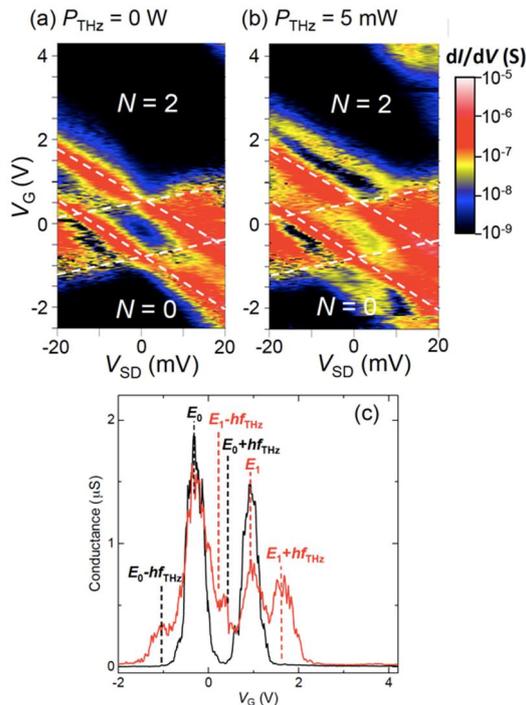


図5 (a)THz 照射がないときの試料のクーロン安定化ダイアグラム、(b)5mW の THz 電磁波を照射したときのクーロン安定化ダイアグラム、(c) THz 電磁波がないとき (黒) と照射時 (赤) の試料の線形コンダクタンススペクトル

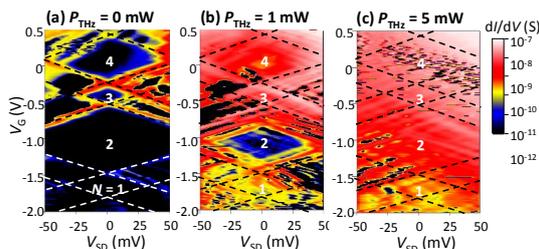


図6 照射する THz 光の強度を増加させたときの単一量子ドットトランジスタのクーロン安定化ダイアグラム

さらに別のサンプルで測定したクーロンダイヤモンドを図6に示す。このサンプルでは、量子ドットと THz 光の結合が強く、THz 光の強度を増すに従い、少なくとも4光子吸収・放射過程まで観測することができた。この強い光支援トンネル効果のために、約5mWのTHz電磁波照射でクーロンブロードがほぼ消失し、THz電磁波照射により単一量子ドットトランジスタの伝導を大きく制御できることが明らかになった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計12件)

- (1) T. Ihara, J. R. Cardenas, Y. Sakasegawa, R. Ferreira, G. Bastard, and K. Hirakawa: “Quenching of the transient miniband photoconductivity in semiconductor superlattices due to a cancellation of field acceleration by Bragg reflection”, Physical Review B, vol. 86, pp. 161305-1~5, 2012, DOI: 10.1103/PhysRevB.86.161305, 査読有
- (2) K. Shibata, A. Umeno, K. M. Cha, and K. Hirakawa: “Photon-Assisted Tunneling through Self-Assembled InAs Quantum Dots in the Terahertz Frequency Range”, Physical Review Letters, vol.109, no. 7, pp. 077401-1~4, 2012, DOI: 10.1103/PhysRevLett.109.077401, 査読有
- (3) Z. Wang, K. Ishibashi, S. Komiyama, N. Nagai, and K. Hirakawa: “Integrating a plasmonic coupler to photo detector of terahertz frequency”, Applied Physics Letters, vol. 101, pp. 091114-1~3, 2012, DOI: 10.1063/1.4748581, 査読有
- (4) 平川一彦、柴田憲治、梅野顕憲: “ナノギャップ電極を用いた量子トランジスタの作製と電子伝導”, Journal of the Vacuum Society of Japan vol. 55, no. 7, pp. 321-327, 2012 (招待解説論文), 査読有
- (5) K. Shibata, K. Seki, P. J. J. Luukko, E. Räsänen, K. M. Cha, I. Horiuchi, and K. Hirakawa: “Electronic structures in single self-assembled InAs quantum dashes detected by nanogap metal electrodes”, Applied Physics Letters, vol. 99, issue 18, pp. 182104-1-3, 2011, DOI: 10.1063/1.3659479, 査読有
- (6) Y. Kanai, R. S. Deacon, S. Takahashi, A. Oiwa, K. Yoshida, K. Shibata, K. Hirakawa, Y. Tokura and S. Tarucha: “Electrically tuned spin-orbit interaction in an InAs self-assembled quantum dot”, Nature Nanotechnology, vol. 6, pp.511-516, 2011 Aug, 査読有
- (7) T. Unuma, Y. Ino, K.-E. Peiponen, E. M. Vartiainen, M. Kuwata-Gonokami, and K. Hirakawa: “Causality-based method for determining the time origin

- in terahertz emission spectroscopy”, OPTICS EXPRESS, vol. 19, pp. 12759-12765, 2011, 査読有
- (8) T. Unuma, S. Takata, Y. Sakasegawa, K. Hirakawa, and A. Nakamura:
“Intersubband transition energy and linewidth modified by a submonolayer AlAs insertion into GaAs quantum wells”, Journal of Applied Physics, vol. 109, pp.043506-1~4, 2011, 査読有
- (9) K. Shibata, M. Jung, K. M. Cha, and K. Hirakawa: “Control of tunnel coupling strength between InAs quantum dots and nanogap metallic electrodes through In-Ga intermixing”, Physica E, vol. 42, pp.2595-2597, 2010, 査読有
- (10) Y. Sakasegawa, T. Ihara, and K. Hirakawa: “Terahertz photonic band gap for the transverse-magnetic modes formed by using a planar waveguide structure with a photonic crystal electrode”, Applied Physics Letters, vol. 97, pp.051110-1~3, 2010, 査読有
- (11) J. R. Cardenas, T. Ihara, R. Ferreira, K. Hirakawa, and G. Bastard:
“Excitation spectra of terahertz Bloch emission in semiconductor superlattices”, Physical Review B, vol. 82, pp. 041310-1~4, 2010, 査読有
- (12) T. Unuma, Y. Ino, M. Kuwata-Gonokami, E. M. Vartiainen, K. -E. Peiponen, and K. Hirakawa: “Determination of the time origin by the maximum entropy method in time-domain terahertz emission spectroscopy”, OPTICS EXPRESS, vol.18, No.15, pp. 15853-15858, 2010, 査読有
- [学会発表] (計18件)
- (1) K. Hirakawa: “Control of electron transport in semiconductor superlattices by intense THz radiation”, International Symposium on Development of Terahertz Gyrotrons and Applications, Fukui University, Fukui, Japan, Mar. 13-14 (2013) (invited).
- (2) K. Shibata and K. Hirakawa:
“Terahertz photon-assisted tunneling in single InAs quantum dot transistors”, International symposium on Frontiers in THz technology (FTT 2012), Nara, Japan, Nov. 26-30 (2012)
- (3) K. Shibata: “Terahertz photon-assisted tunneling in self-assembled InAs quantum dots”, BIT’s 2nd Annual World Congress of Nanoscience and Technology 2012, Qingdao, China, Oct. 26-28 (2012) (invited).
- (4) 柴田憲治, 張亜, K. M. Cha, 長井奈緒美, 平川一彦: “InAs 量子ドットトランジスタにおける THz 光アシストトンネル”、第73回応用物理学会学術講演会, 愛媛大学, 愛媛、9月11日~14日 (2012).
- (5) K. Shibata, A. Umeno, K. M. Cha, and K. Hirakawa: “Terahertz photon-assisted tunneling in self-assembled InAs quantum dots”, 31st International Conference on the Physics of Semiconductor, Zurich, Switzerland Jul.29-Aug. 3 (2012)
- (6) Y. Sakasegawa, H. Tanaka, N. Sekine, I. Hosako, T. Idehara, and K. Hirakawa: “Photon-assisted transport in semiconductor superlattices induced by intense sub-THz radiation from a gyrotron”, 31st International Conference on the Physics of Semiconductor, Zurich, Switzerland Jul. 29-Aug. 3 (2012)
- (7) K. Hirakawa, K. Shibata, Y. Zhang, and K. M. Cha: “THz photon-assisted tunneling in single quantum dot transistors”, The 2nd International Symposium on Terahertz Nanoscience (TeraNano 2012), Okinawa, Japan, Jul 4-5 (2012). (invited)
- (8) 平川一彦: “テラヘルツ電磁波技術の展開”、日本学術振興会 シリコン超集積化システム第165委員会、弘済会館、東京、4月13日 (2012). (招待講演)
- (9) H. Yasuda, T. Kubis, I. Hosako, and K. Hirakawa: “Design of terahertz quantum cascade lasers for high temperature operations using non-equilibrium Green’s function method”, The 31st Progress In Electromagnetics Research Symposium, Kuala Lumpur, Malaysia, Mar. 27-30 (2012) (invited).
- (10) 柴田憲治, 梅野顕憲, Kyu Man Cha, 平川一彦: “単一自己組織化 InAs 量子ドットにおける THz 光アシストトンネル”、2012年春季第59回応用物理学会関係連合講演会、早稲田大学、東京、3月15日~18日 (2012).
- (11) K. Hirakawa: “Physics of Bloch oscillation in semiconductor superlattices under intense

- sub-terahertz radiation from a gyrotron”, The 4th International Workshop on Far-Infrared Technologies 2012 (IW-FIRT2012), Fukui, Japan, Mar. 7-9 (2012) (invited)
- (12) T. Unuma, Y. Ino, E. M. Vartiainen, K.-E. Peiponen, M. K-Gonokami, and K. Hirakawa ” Determining the time origin in temporal waveforms of terahertz emission from semiconductors”, Joint Conference for International Symposium on Terahertz Nanoscience & Workshop of International Terahertz Research Network, Osaka, Japan, Nov. 24-29 (2011)
- (13) 酒瀬川洋平、平川一彦：“フォトリック結晶プレーナ電極を用いたテラヘルツ微小共振器の設計”、2010年秋季第71回応用物理学会学術講演会、長崎大学文教キャンパス、長崎、9月14日～17日(2010).
- (14) T. Unuma, Y. Ino, E. -M. Vartiainen, K. -E. Peiponen, M. -K. Gonokami, and K. Hirakawa: ” Determination of the time origin in terahertz emission spectroscopy: basic schemes and application to semiconductors”, The Ninth Japan-Finland Joint Symposium on Optics in Engineering (OIE’ 11), Turku / Åbo, Finland, Sept. 8-10 (2011).
- (15) 酒瀬川洋平、出原敏孝、山口裕資、光藤誠太郎、関根徳彦、竇迫巖、平川一彦：“サブテラヘルツ強電場駆動による超格子中の電流抑制と増大の観測”、2011年秋季第72回応用物理学会学術講演会、山形大学小白川キャンパス、山形、8月29日～9月2日(2011).
- (16) Y. Sakasegawa, T. Idehara, Y. Yamaguchi, S. Mitsudo, and K. Hirakawa: “Current suppression in semiconductor superlattices driven by intense sub-THz radiation from a gyrotron”, 17th International Conference on Electron Dynamics in Semiconductors, Optoelectronics and Nanostructures, Santa Barbara, U. S. A., Aug. 8-12 (2011).
- (17) 酒瀬川洋平、出原敏孝、山口裕資、光藤誠太郎、平川一彦：“ジャイロトロンからのサブテラヘルツ強電場を用いた半導体格子中の電流抑制”、第58回応用物理学関係連合講演会、神奈川工科大学、神奈川、3月24日～27日(2011).
- (18) 井原章之、平川一彦, J. R. Cardenas, R.

Ferreira, G. Bastard:”半導体超格子における THz 放射の複素電界スペクトルと励起子効果”、日本物理学会 2010 年秋季大会、大阪府立大学中百舌鳥キャンパス、大阪、9月23日～26日(2010).

〔図書〕(計2件)

- (1) 平川一彦：“テラヘルツ波半導体デバイス”、エレクトロニクスシリーズ「高周波半導体の基盤技術とデバイス応用」シーエムシー出版(分担執筆)、pp. 250-266 (2011).
- (2) 平川一彦、柴田憲治：“単一量子ドットトランジスタの量子伝導とその応用”(第2編第4章第1節)、「量子ドットエレクトロニクスの最前線」(分担執筆) NTS, pp. 389-402 (2011).

〔産業財産権〕

○取得状況(計1件)

名称：量子カスケードレーザ
発明者：関根徳彦、平川一彦
権利者：(独)情報通信研究機構
種類：特許
番号：5201544
取得年月日：2013年2月22日
国内外の別：国内

〔その他〕

ホームページ等
<http://thz.iis.u-tokyo.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 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

(2) 連携研究者

荒川 泰彦 (ARAKAWA YASUHIKO)
東京大学・生産技術研究所・教授
研究者番号：30134638

岩本 敏 (IWAMOTO SATOSHI)

東京大学・生産技術研究所・准教授
研究者番号：40359667