

令和 元年 8 月 30 日現在

機関番号：31303

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化）

研究期間：2016～2018

課題番号：15KK0215

研究課題名（和文）テラヘルツ電磁波による単一電子・スピン伝導ダイナミクスの制御と情報機能の創製（国際共同研究強化）

研究課題名（英文）Control of single charge/spin states using terahertz wave(Fostering Joint International Research)

研究代表者

柴田 憲治 (Shibata, Kenji)

東北工業大学・工学部・准教授

研究者番号：00436578

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 11,200,000円

渡航期間： 12ヶ月

研究成果の概要（和文）：単一の量子ドットを用いた量子情報処理デバイスにおいて、1つの電子やスピン、光子に情報機能を持たせる研究を行った。特に本研究では、スイス連邦工科大学の研究グループとの国際共同研究の遂行によるテラヘルツ光を用いた単一電荷やスピン状態の動的な制御による新規物性の開拓と情報機能の実現に関する研究を重点的に推進した。まず、テラヘルツスペクトロスコーピーの手法を用いることで、静的な測定からは得られない非平衡状態における単一電子の電子間相互作用に関する情報を評価することに成功した。更にInSb量子ドットを用いることでスピンの制御性を向上させる研究や、GaSbのホール系を用いるための研究を推進し、成果を上げた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

次世代の情報処理として期待される量子情報処理では、単一の光子や電荷、電子スピンなどに情報機能を持たせ、これを外部からの電界や光照射によって制御することで計算を行う。本研究では、電界による単一スピン状態の制御が期待されるInAsやInSb、GaSbなどの化合物半導体ナノ構造を用いたトランジスタを作製し、電子やスピン状態の電界や光による制御に取り組んだ。特に、従来よりも高速な制御が期待されるテラヘルツ光を用いた電子やスピンの制御を可能とするために非常に小さな自己組織化量子ドットを用いた研究を遂行した。

研究成果の概要（英文）：Electrical manipulation and read-out of quantum states in zero-dimensional quantum dots by nanogap metal electrodes is expected to bring about innovation in quantum information processing. In this study, we have investigated a way to control quantum states in nanostructures mainly by terahertz wave. We succeeded in characterizing electronic properties on off-equilibrium states in InAs QDs by terahertz photocurrent spectroscopy. Moreover, an electric-field control of quantized conductance in gold quantum point contacts was demonstrated by adopting a liquid-gated electric-double-layer transistor geometry. Furthermore, we extended our research to some new materials including InSb quantum dots and GaSb quantum wells. These works are opening a way for novel quantum information applications of quantum nanostructure systems.

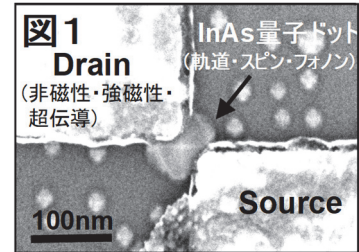
研究分野：ナノエレクトロニクス

キーワード：量子ドット テラヘルツ トランジスタ

様式 F-19-2

1. 研究開始当初の背景

単一の量子ドットを用いた量子情報処理デバイスは、1つの電子やスピン、光子に情報機能を持たせるため、超低消費電力エレクトロニクスの有望な技術とされている。特に10ナノメートル級の自己組織化量子ドットでは、系の電子準位間隔がテラヘルツ (THz) 帯の光子のエネルギーに相当することから、THz電磁波を用いた単一電子・スピンの動的制御による機能性素子の実現が期待される。研究代表者は、本研究に先立って行った科研費研究(若手研究 A、H26-29、題目:テラヘルツ電磁波による単一電子・スピン伝導ダイナミクスの制御と情報機能の創製)において、位置・形状制御された単一 InAs 量子ドットを活性層とするトランジスタに基礎を置き、これを THz 電磁波と相互作用させることで、単一の電子・スピン状態の動的制御に基づく情報機能を実現する研究を推進した。この先行研究により、THz 電磁波照射による単一キャリアの伝導制御の他、単一量子ドットの電子状態の新たな THz 帯の分光解析手法の提案と、これによる単一量子ドットの THz 分光などに成功していた。研究開始当初において、研究代表者は位置・形状制御された 10 nm 級の自己組織化 InAs 量子ドットを活性層とする単一電子トランジスタの形成とその伝導制御、THz 素子への応用において、世界をリードする状況にあった。



2. 研究の目的

本国際共同研究においては、先行研究以上に高度な研究が必要となる以下の3点を目標として新たな国際共同研究体制を構築し、「THz波による単一電荷・スピンの動的制御に基づく情報機能の創製」における確固たる優位性を確立するための研究を行った。

- (1) 二重結合量子ドット構造における THz 波を用いた単一電子のコヒーレント制御と量子ビット操作
- (2) 強磁性電極と結合した量子ドットを用いた単一 THz 光子/スピン変換素子の実現
- (3) 単一量子ドットターンスタイル素子によるテラヘルツ帯の電流標準の実現

以上の実現により、未開拓の周波数帯として知られる THz 電磁波をナノエレクトロニクス応用の舞台に上げ、次世代エレクトロニクスに新しい局面を拓くことを目的とした。

3. 研究の方法

本研究の遂行のため、応募者はスイス連邦工科大学チューリッヒ校 (ETH Zurich) に赴き、低次元半導体物性の分野で先駆的な研究を行っている Ensslin グループに約一年間滞在して現地で研究を遂行した。THz 電磁波を用いた研究は、THz エレクトロニクス分野における世界屈指の研究グループである Faist グループと共同して研究を行い、研究目的の遂行を目指した。具体的な研究計画を以下に記述する。

<1> Ensslin 教授のグループが有する先駆的な極低温・強磁場物性計測環境を用いて、二重結合量子ドット、強磁性量子ドット素子、THz ターンスタイル素子の基礎物性評価を行う。素子の電子状態の解明には、電子間相互作用やスピン-軌道相互作用、強磁性電極が伝導特性に与える影響など、深い物理的造詣が必要であることから、この分野の専門家である Ensslin 教授との議論を密に行いながら研究を推進し、物性評価・解析を効率的に進める。

<2> Ensslin グループで基礎物性評価をおこなった量子ドット素子を、隣接する Faist グループに持ち込み、Faist グループが有する豊富な THz 光源と THz ダイナミクスの評価システムを用いて、二重量子ドット素子や強磁性電極と結合した量子ドット素子などに THz 電磁波を照射し、量子ドット素子のキャリアダイナミクスの評価・制御と、それによる情報機能の創製を試みる。

4. 研究成果

本研究では、自己組織化 InAs 量子ドットにおける単一電子の THz 伝導ダイナミクスに関する知見を深める一方で、InAs 量子ドットを用いたトランジスタ素子を用いた情報処理に関する研究が思うように進まなかったため、従来の InAs 量子ドットよりもスピン状態を制御しやすいことが期待される新しい量子ドット材料 (InSb) を用いた単一電子トランジスタ素子の開発に従事し、素子の作製に成功した。更に、非常に強いスピン軌道相互作用を用いた高速スピン操作の実が期待される GaSb 量子井戸におけるホール伝導の観測と伝導特性解明に関する実験を行い、コヒーレンス長やスピン軌道相互作用長などを評価することに成功した。最後に、金属を用いた量子ポイントコンタクトの伝導度を電界変調することに成功し、室温動作する単一電荷検出器の実現可能性を示すことに成功した。以下に詳細を記載する。

- (1) 単一の自己組織化 InAs 量子ドットを活性層とする単一電子トランジスタ素子に対して、

フーリエ変換赤外分光光度計からの広帯域 THz 電磁波を照射した際の、素子のフォトカレントのスペクトル解析を行った。この THz スペクトロスコピーの手法を用いることで、静的な測定では得られない、非平衡状態における単一電子の電子間相互作用に関する情報を初めて得ることに成功した。(図 2 参照)

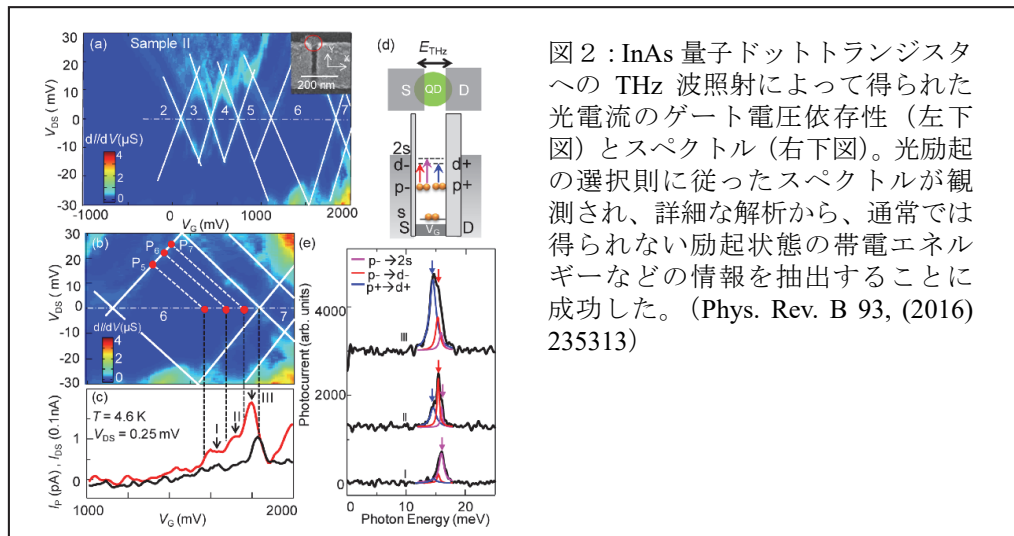


図 2 : InAs 量子ドットトランジスタへの THz 波照射によって得られた光電流のゲート電圧依存性 (左下図) とスペクトル (右下図)。光励起の選択則に従ったスペクトルが観測され、詳細な解析から、通常では得られない励起状態の帯電エネルギーなどの情報を抽出することに成功した。(Phys. Rev. B 93, (2016) 235313)

- (2) GaAs 基板上に形成した単一の自己組織化 InSb 量子ドットを活性層とする単一量子ドットトランジスタを作製した。この伝導特性から、素子が単一電子トランジスタとして動作することを示した。更に磁場中測定からこの系では電子の g 因子が $g \sim 25$ と非常に大きくなり、電子スピンの状態制御が容易となることを明らかにした。(図 3 参照)

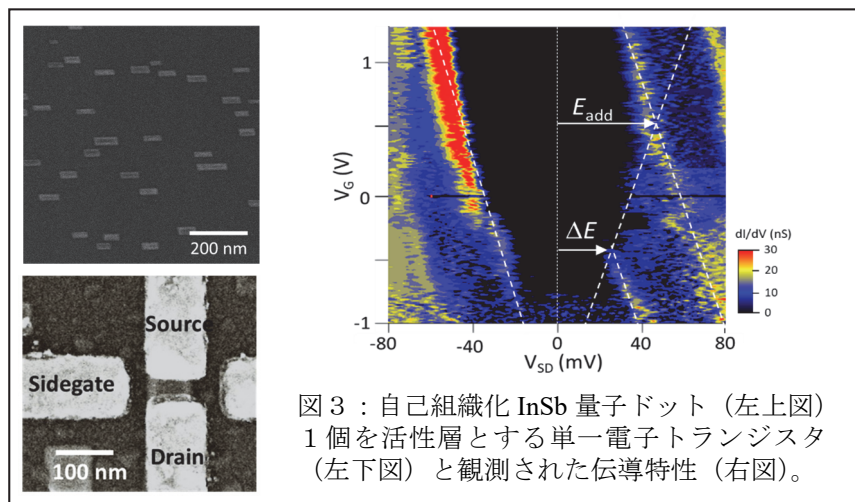


図 3 : 自己組織化 InSb 量子ドット (左上図) 1 個を活性層とする単一電子トランジスタ (左下図) と観測された伝導特性 (右図)。

- (3) InAs や InSb などの強いスピン軌道相互作用を有する電子系の電荷やスピン制御に関する研究をホール系にも拡張すべく、高いホール移動度を有する GaSb におけるホール伝導の制御に関する研究に従事した。具体的には、ノンドープ GaSb 量子井戸に対してゲート電界でホールを誘起することで、世界で初めて GaSb 量子井戸におけるホール伝導の評価を可能とした。この素子における磁場中ホール伝導特性の評価をおこなうことで、この材料系のホールの有効質量や散乱時間、コヒーレンス長やスピン軌道相互作用長などの基本的物性パラメータの評価を行った。(図 4 参照)
- (4) 金属量子ポイントコンタクト構造の作製とその伝導度の電界変調の実現に関する研究を行った。特に今回、ゲート絶縁膜としてイオン液体を用いることで、金属量子ポイントコンタクトの伝導度がゲート電圧とともにステップ状に変化する振る舞いが観測された。これは金属量子ポイントコンタクトの伝導度が電界変調されたことを示しており、本研究課題で目指す量子情報処理にも応用可能な室温動作する単一電荷検出器の実現のための第一歩と考えることができる。現在、より高速での再現性の良い電界変調を目指して、従来の固体ゲート手法でも同様の電界変調を観測するための実験を行っている。(図 5 参照)

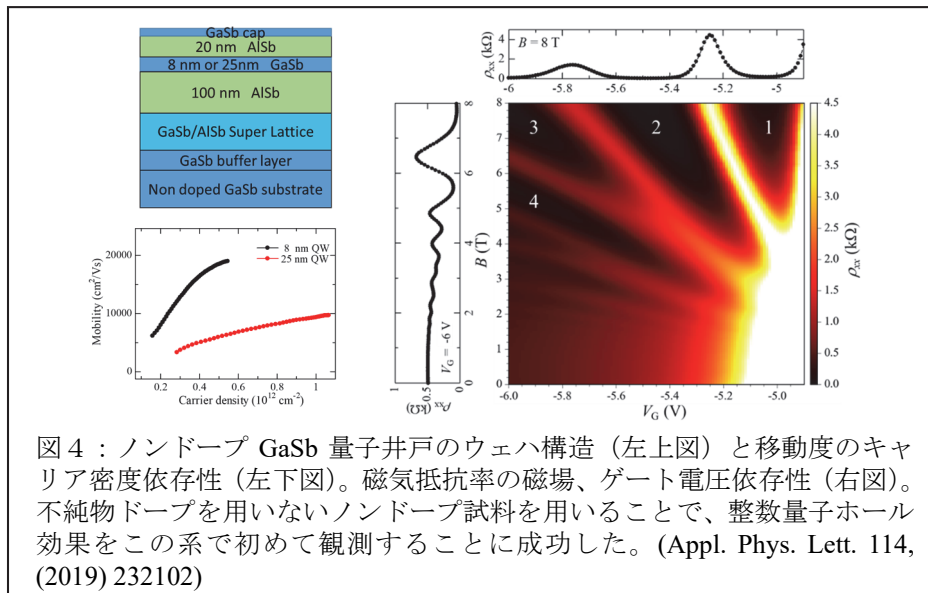


図4：ノンドープ GaSb 量子井戸のウェハ構造（左上図）と移動度のキャリア密度依存性（左下図）。磁気抵抗率の磁場、ゲート電圧依存性（右図）。不純物ドーピングを用いないノンドープ試料を用いることで、整数量子ホール効果をこの系で初めて観測することに成功した。（Appl. Phys. Lett. 114, (2019) 232102）

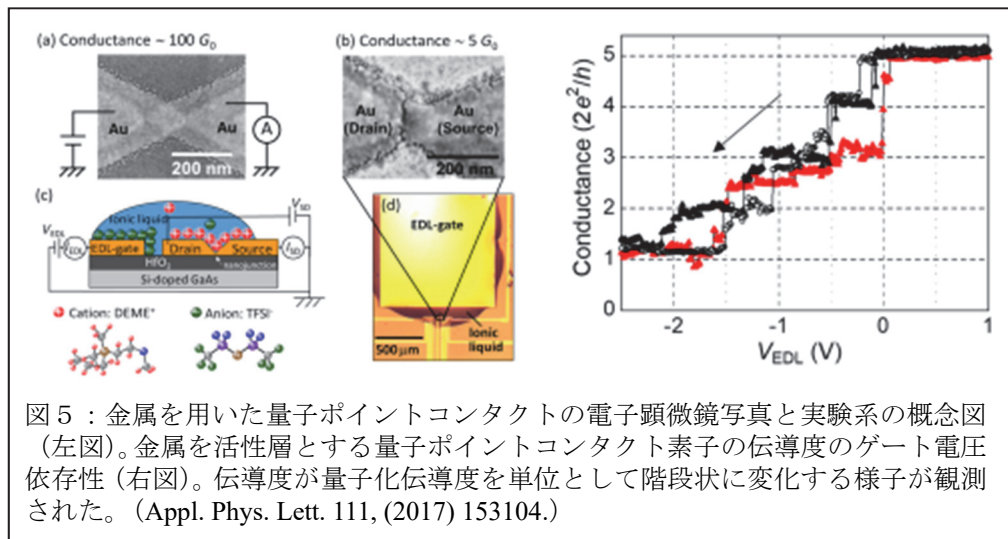


図5：金属を用いた量子ポイントコンタクトの電子顕微鏡写真と実験系の概念図（左図）。金属を活性層とする量子ポイントコンタクト素子の伝導度のゲート電圧依存性（右図）。伝導度が量子化伝導度を単位として階段状に変化する様子が観測された。（Appl. Phys. Lett. 111, (2017) 153104.）

5. 主な発表論文等 (研究代表者は下線)

[雑誌論文] (計 5 件)

- (1) ラッセル スチュワート ディーコン, 大岩 颯, ユルゲン ザイラー, 馬場翔二, 金井康, 柴田憲治, 平川一彦, 樽茶清悟
”並列二重量子ドットジョセフソン接合におけるクーパー対分離とスピンもつれ相関の検出”
固体物理 51, (2016) pp. 287-293 査読無
- (2) Y. Zhang, K. Shibata, N. Nagai, C. Ndebeka-Bandou, G. Bastard, and K. Hirakawa
“Excited-state charging energies in quantum dots investigated by terahertz photocurrent spectroscopy”
Phys. Rev. B 93, (2016) 235313 (5 pages) 査読有
DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.93.235313>
- (3) K. Shibata, K. Yoshida, K. Daiguji, H. Sato, T. Ii, and K. Hirakawa
"Electric-field control of conductance in metal quantum point contacts by electric-double-layer gating"
Appl. Phys. Lett. 111, (2017) 153104 (4 pages) 査読あり
DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4995318>

- (4) M. Karalic, C. Mittag, M. Hug, T. Tschirky, W. Wegscheider, K. Ensslin, T. Ihn, K. Shibata, and R. Winkler
 “Gate-tunable electronic transport in p-type GaSb quantum wells”
 Phys. Rev. B 99, (2019) 115435 (6 pages) 査読有
 DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.99.115435>
- (5) K. Shibata, M. Karalic, C. Mittag, T. Tschirky, C. Reichl, H. Ito, K. Hashimoto, T. Tomimatsu, Y. Hirayama, W. Wegscheider, T. Ihn, and K. Ensslin
 “Electric-field-induced two-dimensional hole gas in undoped GaSb quantum wells”
 Appl. Phys. Lett. 114, (2019) 232102 (4 pages) 査読有
 DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5093133>

[学会発表] (計 16 件)

- (1) 伊井貴彦、佐藤寛史、大宮司圭介、柴田憲治
 “イオン液体を用いた金属量子ポイントコンタクトの伝導度の電界変調”
 平成 28 年度電気関係学会東北支部連合大会 東北工業大学 2016 年 8 月 31 日 (口頭発表)
- (2) K. Shibata, K. Yoshida and K. Hirakawa
 “Electric-field tuning of conductance in metal quantum point contacts” International conference on superlattices, nanostructures and nanodevices (ICSNN2016), July 25-30, 2016, Hong Kong, China (Poster presentation)
- (3) 柴田憲治、大森雅登、榊裕之、平川一彦
 “ナノギャップ電極と結合した単一自己組織化 InSb 量子ドットにおける電気伝導特性”
 応用物理学会 朱鷺メッセ 2016 年 9 月 15 日 (口頭発表)
- (4) 阿部千夏、柴田憲治、吉田健治、平川一彦
 “電気化学エッチングにより作製した金属量子ポイントコンタクトの電界変調”
 応用物理学会 朱鷺メッセ 2016 年 9 月 15 日 (ポスター発表)
- (5) K. Shibata, M. Ohmori, H. Sakaki and K. Hirakawa “Transport through InSb self- assembled quantum dots coupled to nanogap metal electrodes” 2016 Workshop on Innovative Nanoscale Devices and Systems (WINDS16) December 4-9, 2016, Kohara Coast, Hawaii, USA (Oral presentation)
- (6) 飯野裕貴、荒井啓朗、柴田憲治
 “単一 InSb 量子ドットトランジスタの作製と伝導特性の評価” 平成 28 年東北地区若手研究者研究発表会 東北学院大学工学部 2017 年 3 月 4 日 (ポスター発表)
- (7) 佐藤悠宇、伊井貴彦、柴田憲治
 “イオン液体を用いた金属量子ポイントコンタクトの電界変調” 平成 28 年東北地区若手研究者研究発表会 東北学院大学工学部 2017 年 3 月 4 日 (ポスター発表)
- (8) 佐々木秀隆、阿部千夏、柴田憲治
 “イオン液体を用いた電気化学エッチングによる金属ナノ構造の微細化とその電界変調”
 平成 28 年東北地区若手研究者研究発表会 東北学院大学工学部 2017 年 3 月 4 日 (ポスター発表)
- (9) K. Shibata, M. Ohmori, K. Nagase, H. Sakaki, Y. Hirayama, and K. Hirakawa
 “Electron transport through single self-assembled InSb quantum dots coupled to nanogap metal electrodes”
 Compound Semiconductor Week (CSW) 2017 May 14–18, 2017 Berlin, Germany (ポスター発表)
- (10) K. Shibata, M. Karalic, C. Mittag, Z. Lei, T. Tschirky, C. Reichl, W. Wegscheider, T. Ihn, and K. Ensslin
 “Magnetotransport of two-dimensional hole gas in undoped GaSb quantum well”
 20th International Conference on Superlattices, Nanostructures and Nanodevices (ICSNN 2018) July 23, 2018 Madrid, Spain (口頭発表)
- (11) M. Karalic, M. Hug, C. Mittag, Z. Lei, K. Shibata, T. Tschirky, W. Wegscheider, T. Ihn, K. Ensslin
 “Hole transport in p-type GaSb quantum wells” 34th International conference on the physics of semiconductors (ICPS2018) July 31, 2018 Montpellier, France (ポスター発表)

- (12) 菊地竜太郎、斎藤康平、柴田憲治
“単一 InAs 量子ドットトランジスタの磁場中電気伝導”
平成 31 年東北地区若手研究者研究発表会 仙台高等専門学校 2019 年 3 月 2 日 (ポスター発表)
- (13) 箱崎涼、佐々木聡、柴田憲治
“電気化学反応を用いた金属ナノ接合の微細化と伝導度の電界変調”
平成 31 年東北地区若手研究者研究発表会 仙台高等専門学校 2019 年 3 月 2 日 (ポスター発表)
- (14) 加藤春樹、伊藤熙、柴田憲治
“ノンドープ GaSb 量子井戸における低温磁場中ホール伝導”
平成 31 年東北地区若手研究者研究発表会 仙台高等専門学校 2019 年 3 月 2 日 (ポスター発表)
- (15) 伊藤熙, 柴田憲治, M. Karalic, C. Mittag, T. Tschirky, C. Reichl, W. Wegscheider, T. Ihn, and K. Ensslin
“ノンドープ GaSb 量子井戸における 2 次元ホール系の輸送特性”
第 66 回応用物理学会 2019 年 3 月 11 日 (口頭発表)
- (16) 柴田憲治, M. Karalic, C. Mittag, 伊藤熙, Z. Lei, T. Tschirky, C. Reichl, 橋本克之, 富松透, 平山祥郎, W. Wegscheider, T. Ihn, K. Ensslin
“GaSb 量子井戸における二次元ホール系の磁場中輸送特性”
第 74 回日本物理学会 2019 年 3 月 14 日 (口頭発表)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://www.eis.tohtech.ac.jp/~kshibata/index.html>

6. 研究組織

研究協力者

[主たる渡航先の主たる海外共同研究者]

研究協力者氏名 : Klaus Ensslin

ローマ字氏名 : Klaus Ensslin

所属研究機関名 : ETH Zurich

部局名 : Department of Physics

職名 : Professor

[その他の研究協力者]

研究協力者氏名 : Thomas Ihn

ローマ字氏名 : Thomas Ihn

研究協力者氏名 : Werner Wegscheider

ローマ字氏名 : Werner Wegscheider