

令和 2 年 6 月 1 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H02795

研究課題名(和文) 高強度テラヘルツパルスによる極限スピン制御

研究課題名(英文) Spin manipulation using high power THz pulse

研究代表者

森田 健 (Morita, Ken)

千葉大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：30448344

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,500,000円

研究成果の概要(和文)：半導体中の電子スピンはシンプルな二準位系の量子状態を持つことから、量子コンピュータの量子ビットとの候補である。電子スピンを高速で制御することができれば、量子情報処理の計算速度の向上につながる。高強度テラヘルツパルスを利用し、これまでの半導体中の電子スピンの制御速度を大きく上回る数ピコ秒以内での制御を試みた。GaAs/AlGaAs量子井戸中の電子スピンの揃っている間に高強度テラヘルツパルスを照射すると、大きな信号変化(< 2 ps)を観測した。スピンの空間的な位置も変化していることから信号変化はスピン軌道相互作用によるスピン回転と考えられ、スピンの高速制御を示唆する結果が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題は、全く新しい原理に基づき超高速スピン制御・長距離スピン輸送を実現する研究であり、挑戦的な内容を含んだ極限スピン物性研究である。「半導体スピントロニクス」の分野に「テラヘルツ工学」を融合した「テラヘルツスピントロニクス」ともいべき新しい光科学の分野の創生につながる極めて重要な研究である。高強度テラヘルツパルスを利用しこれまでの電子スピンの制御速度を大きく上回る数ピコ秒以内での制御を示唆する結果は、学術的・社会的に大きな意義を持つ。

研究成果の概要(英文)：The electron spin in a semiconductor has a simple two-level quantum state thus it is a candidate for a quantum bit in a quantum computer. If this electron spin can be controlled at high speed, the calculation speed of quantum information processing will be drastically improved. In this study, we tried to control the electron spin in semiconductors within a few picoseconds, which is much higher than the conventional control speed of electron spin by using high-intensity terahertz pulse. When a high-intensity terahertz pulse was irradiated while electron spins were aligned in the GaAs/AlGaAs quantum well, a large signal change (< 2 ps) was observed. Since the spatial position of the spin also changed, the signal change was considered to be spin rotation due to spin-orbit interaction, and the results suggest that high-speed control of the spin is possible.

研究分野：半導体スピントロニクス

キーワード：電子スピン制御 スピン軌道相互作用 高強度テラヘルツパルス

1. 研究開始当初の背景

半導体中の電子スピンは、「電荷」と「スピン」の両方の性質を持っているが、従来の半導体デバイスでは、電荷の性質しか利用されてこなかった。しかし、「スピン」の量子力学的な性質を積極的に利用した量子計算機やスピンの流れを低消費電力でオンオフできるスピン電界効果トランジスタが提案され、これらの新規デバイスを実現するためにも、スピンの高速回転やスピンの長距離輸送といった要素技術を確認する必要がある。

(スピン軌道相互作用下でのスピン制御・輸送)

半導体中でスピン軌道相互作用が働くと、ドリフトする電子に対して内部有効磁場と呼ばれる実効的な磁場が作用する。有効磁場の方向は電子のドリフト方向に依存し、またその大きさは動く速さ(運動量)に比例する。従って、ドリフト運動を始めた電子スピンは、有効磁場の回りを歳差運動し、スピンの向きが回転する。つまり、スピンをドリフトさせることで、外部磁場を用いずにスピンの回転操作が行える。実際、電流誘導^[1]や表面弾性波^[2, 3]による半導体中のドリフトスピンの回転操作は行われている。しかし、これらの手法ではスピンのドリフト速度が遅く、弱い有効磁場によるゆっくりとしたスピン回転(一回転あたりナノ秒程度)とスピン輸送しか実現できていない。

(高強度 THz パルスによるスピン制御)

近年、THz パルス発生技術が進み、今ではパルス面傾斜法^[4]といった手法によりピーク強度が 1 MV/cm に達する高強度 THz パルス発生が行える^[5]。この高強度 THz パルスを半導体中の電子に照射すると、電子は瞬間的な強い電場を感じ、励起電場方向に向かって超高速ドリフト走行を開始する。ここで注目すべきことは、電子の波数 k は $3 \times 10^9 / \text{m}$ 以上に達し、飽和ドリフト速度よりも桁違いに速く移動する電子を実現できる。

申請者(代表、森田)は、この原理(THz パルス照射による電子の超高速ドリフト)を半導体中のスピんに適用すれば、前述のスピン軌道相互作用による巨大有効磁場が発現するはずで、超高速ドリフトスピンによるスピンの極限制御・極限輸送が可能であると考え本研究の取り組みを開始した。

2. 研究の目的

本研究では、これまでに構築した THz パルス発生系とスピン時空間ダイナミクス光学系を連結し、THz パルス照射下でのスピンの時空間ダイナミクス計測を行うことを目的とし、以下の三つの課題を実施する。

前半では、中強度 THz ($\sim 1 \text{ kV/cm}$) パルス照射下での THz パルスの時間波形・偏光・強さ、内部有効磁場の大きさ・向き、スピンの移動距離、回転角の関係を明らかにする。

得られたスピンの時空間ダイナミクスの測定結果をモンテカルロ計算で再現し、中強度 THz パルス照射下でのスピン制御・スピン輸送法を確認する。

後半では、高強度 THz パルス ($> 100 \text{ kV/cm}$) 照射下で上記と同様の測定を行い、ピコ秒時間内で半導体中のスピンの極限制御・極限輸送を目指す。

3. 研究の方法

本研究では、THz パルス発生系とスピン時空間分解光学系を組み合わせた独自の連結光学系(図1)を構築する。ピーク強度が 1 kV/cm 程度の中強度 THz パルス照射下でのスピンの時空間ダイナミクス測定を行う。THz パルスの形状・偏光・強度、半導体内部の有効磁場・移動度とスピンの移動距離・回転角の関係を調べ、スピンの回転制御・長距離輸送技術を確認する。次に連結光学系をブレッドボード上に新たに構築し、その光学系を大阪大学レーザーエネルギー学研究中心(阪大レーザー研)に移動する。阪大レーザー研では、ピーク強度が 100 kV/cm 以上である高強度 THz パルス照射下でのスピンの時空間ダイナミクスを計測し、ピコ秒以内でのスピンの極限制御・長距離輸送に挑む。

4. 研究成果

2019 年度以前は、本研究目的である THz パルス照射下でのスピンの時空間ダイナミクス計測を行うための光学系、つまり高強度 THz パルス発生系とスピンの時空間ダイナミクス光学系を組み合わせたテラヘルツパルス発生・スピン計測光学系の構築を完了した。(図 1 参照)左側が高強度テラヘルツパルス発生光学系、右側がスピン計測光学系となっている。

まず、THz パルス発生光学系を用いて、高強度 THz パルス発生を試みた。光源は、阪大レーザー研所有の繰り返し周波数 1 kHz、中心波長 800 nm の超短パルスレーザーを使用した。非線形結晶として LiNbO₃(LN) 結晶を用い、パルス面傾斜法で得られた高強度 THz パルスは EO サンプリング法によって検出した。

GaP を EO 結晶として用いた THz パルスの時間波形 (pump: 2.3 W, probe: 9.3 μW) の結果を図 3(a)に示す。ZnTe を EO 結晶として用いた結果と異なり、本来の THz パルス電場の時間波形が得られた。THz パルスの電場振幅を求めた式を適用することで、最大電場振幅は ~120 kV/cm であった。また、我々は

GaAs の E-k 分散を考慮したモンテカルロ(MC)シミュレーションを行った。GaAs 中では、25 V/cm 以上の THz パルス照射によって、スピンの THz パルスの反転が可能であることが分かっている。今回得られた THz パルスはそれを大きく上回ることを明らかにした。

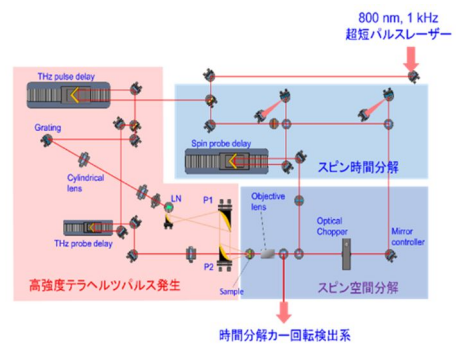


図1. テラヘルツパルス照射下でのスピンの時空間ダイナミクス計測を行うための光学系

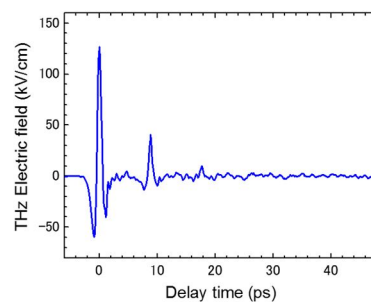


図2. GaPをEO結晶として用いたTHzパルスの時間波形.

研究は、まずテラヘルツパルスによるスピンの信号変化が観測できなかった原因を探ることを行った。調べた結果、図 1 の左側 (テラヘルツパルス発生光学系) の試料に到達するまでの光路長が、右側 (スピン計測光学系) のそれよりも短く、スピンの揃った時間内にテラヘルツパルスを照射できていないこと、またポンプ強度が強すぎてスピンの信号が明瞭に観測できていないことが判明した。光路を延長し、また、ポンプとプローブ光の強度を数 μW レベルまで下げ、前年度行ったものと同様の実験を行った。またポンプとプローブ光のビームラインに波長切り出し光学系を導入し、それぞれの波長を制御した。波長切り出し系の導入の目的は、波長制御だけでなく、100 フェムト秒パルスをピコ秒パルスに変換し、試料の損傷を防ぐことも兼ねている。図 3(a)に右円偏光励起と左円偏光励起によるカー回転信号を示す。正と負の信号は、それぞれ上向きと下向きのスピン信号を示す。黒の点線は、テラヘルツパルス照射しなかったスピン信号を表し、また赤と青はテラヘルツパルス照射を行ったときのスピン信号を示している。スピン信号はスピンが励起されてから 50 ps 程度で消失するが、13 ps 付近でテラヘルツパルス照射によるスピン信号の大きな変化が現れた。この時間の周辺で空間分解測定を行い、その結果を図 3(b) に示す。スピンの空間分布がわずかに動いていることから、スピン軌道作用を起源とした有効磁場の回りをスピンの回転し、スピンの信号変調が観測できたことが考えられた。

結論として、テラヘルツパルスによる 2 ps 程度という高速時間内でのスピン制御を示唆する結果を得ることに成功した。MC シミュレーションによると、スピンの動きやすさは試料の移動度向上によって大きく向上する[6]。そのため、今後は液体窒素温度での実験が必要となる。また、テラヘルツパルスの電界でスピンが空間的に移動している様子をより明確に捉える必要があり、集光スポットサイズを小さくすることが今後の課題となる。

参考文献

- [1] Y. Kunihashi *et al.*, Nature Comm. **7**, 10722 (2016).
- [2] H. Sanada *et al.*, [Phys. Rev. Lett.](#) **106**, 216602 (2011).
- [3] H. Sanada *et al.*, Nature Phys. **9**, 280 (2013).
- [4] H. Hirori *et al.*, Appl. Phys. Lett. **98**, 091106 (2011).
- [5] H. Hirori *et al.*, Nature Commun. **2**, 594 (2011).
- [6] I. Takazawa, Master's thesis, Chiba University, (2018).

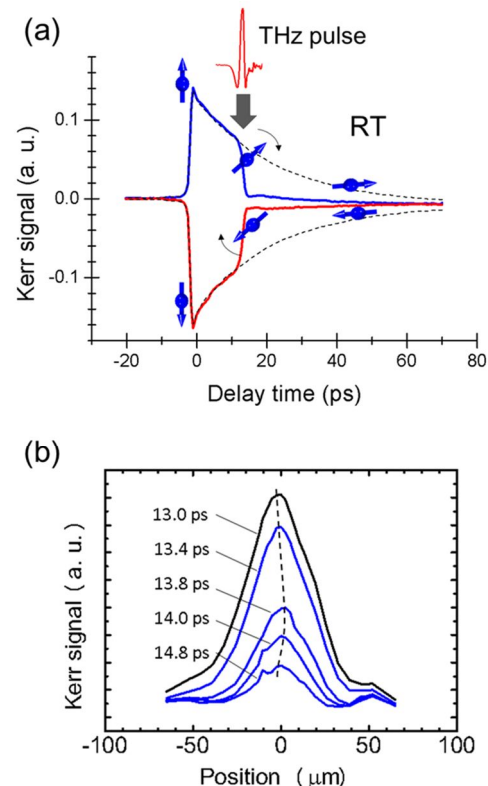


図3. (a) 右円偏光励起と左円偏光励起によるカー回転信号, (b) 13 ps付近の空間分解測定結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8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 Shida Hiroki, Kawaguchi Kohei, Saito Yasuhito, Takazawa Ichirota, Fukasawa Toshiki, Iizasa Daisuke, Saito Takahito, Kitada Takahiro, Ishitani Yoshihiro, Kohda Makoto, Morita Ken	4. 巻 127
2. 論文標題 Spin?orbit parameters derivation using single-frequency analysis of InGaAs multiple quantum wells in transient spin dynamics regime	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 153901 ~ 153901
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1063/5.0002821	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 Kawaguchi Kohei, Fukasawa Toshiki, Takazawa Ichirota, Shida Hiroki, Saito Yasuhito, Iizasa Daisuke, Saito Takahito, Kitada Takahiro, Ishitani Yoshihiro, Kohda Makoto, Morita Ken	4. 巻 115
2. 論文標題 Transient diffusive spin dynamics in intrinsic InGaAs/InAlAs multiple quantum wells	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 172406 ~ 172406
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1063/1.5124011	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 Morita K., Okumura A., Takaiwa H., Takazawa I., Oda T., Kitada T., Kohda M., Ishitani Y.	4. 巻 115
2. 論文標題 Temperature and laser energy dependence of the electron g-factor in intrinsic InGaAs/InAlAs multiple quantum wells	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 012404 ~ 012404
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1063/1.5100343	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 Iizasa D., Sato D., Morita K., Nitta J., Kohda M.	4. 巻 98
2. 論文標題 Robustness of a persistent spin helix against a cubic Dresselhaus field in (001) and (110) oriented two-dimensional electron gases	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 165112-1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1103/PhysRevB.98.165112	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 Morita Ken, Shiozawa Kento, Suizu Koji, Ishitani Yoshihiro	4. 巻 57
2. 論文標題 Terahertz pulse generation by the tilted pulse front technique using an M-shaped optical system	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 050304 ~ 050304
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/JJAP.57.050304	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 Morita Ken, Shiozawa Kento, Suizu Koji, Ishitani Yoshihiro	4. 巻 57
2. 論文標題 Terahertz pulse generation by the tilted pulse front technique using an M-shaped optical system	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 50304
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.7567/JJAP.57.050304	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28件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 7件)

1. 発表者名 Hiroki Shida, Kohei Kawaguchi, Yasuhito Saito, Ichirota Takazawa, Daisuke Iizasa, Takahito Saito, Takahiro Kitada, Yoshihiro Ishitani, Makoto Kohda, Ken Morita
2. 発表標題 Deriving spin-orbit parameters by single frequency analysis in diffusive transient spin dynamics
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

1. 発表者名 齋藤康人、志田博貴、有川歩暉、北田貴弘、石谷善博、森田健
2. 発表標題 InGaAs量子井戸中電子スピンの低温時間分解顕微計測
3. 学会等名 第30回光物性研究会, 京都大学 宇治キャンパス, 2019年12月13-14日
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 森田 健
2. 発表標題 高強度テラヘルツパルスを利用したスピン制御
3. 学会等名 光科学の最新トレンド2019 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Morita, H. Shida, Y. Saito, K. Kawaguchi, I. Takazawa, D. Iizasa, T. Saito, Y. Ishitani, T. Kitada, and M. Kohda
2. 発表標題 Diffusive spin dynamics in transient regime at room temperature
3. 学会等名 Tenth International School and Conference on Spintronics and Quantum Information Technology (SpintechX), Chicago, USA, June 24-27, 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroki Shida, Yasuhito Saito, Kohei Kawaguchi, Ichirota Takazawa, Takahiro Kitada, Makoto Kohda, Yoshihiro Ishitani, and Ken Morita
2. 発表標題 Diffusive spin dynamics in 10 nm wide InGaAs/InAlAs quantum wells
3. 学会等名 Compound Semiconductor Week 2019 (CSW2019), Kasugano International Forum, Nara, Japan, May 19-23, 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ken Morita, Yuta Osumi, and Yoshihiro Ishitani
2. 発表標題 Finite-difference Time-domain Simulation Of Terahertz Pulse Generation By Non-collinear Phase Matching Using Obliquely Crossed Optical Pulses
3. 学会等名 43rd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ken Morita, Toshiki Fukasawa, Kohei Kawaguchi, Takahiro Kitada, Yoshihiro Ishitani
2. 発表標題 Optical evaluation of spin diffusion and spin-orbit parameters in an InGaAs/InAlAs multiple quantum wells
3. 学会等名 10th International School and Conference on Physics and Applications of Spin Phenomena in Solids (PASPS 10) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 志田博貴, 川口晃平, 高澤一朗太, 齋藤康人, 北田貴弘, 石谷善博, 好田 誠, 森田 健
2. 発表標題 空間スキャン法によるInGaAs量子井戸スピン軌道相互作用係数の導出
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 中山政裕, 菅野裕吾, 石谷善博, 北田貴弘, 森田健
2. 発表標題 小型フーリエ変換赤外分光装置の製作と測定法の確立
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 南 康夫, 盧 翔孟, 熊谷 直人, 森田 健, 北田 貴弘
2. 発表標題 GaAs系の多層膜結合共振器を使ったテラヘルツLEDの作製を目指した基礎的研究
3. 学会等名 テラヘルツLEDフォーラムin徳島
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 川口晃平, 深澤俊樹, 志田博貴, 齋藤康人, 北田貴弘, 石谷善博, 森田 健
2. 発表標題 InGaAs量子井戸中拡散電子スピんに作用する内部有効磁場
3. 学会等名 第29回光物性研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高澤一朗太, 石谷善博, 森田 健
2. 発表標題 高強度THzパルス照射下におけるGaAs中光励起電子スピンの時空間ダイナミクスシミュレーション
3. 学会等名 第29回光物性研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 森田 健, 盧 翔孟, 南 康夫, 熊谷 直人, 北田貴弘, 井須俊郎
2. 発表標題 半導体結合共振器構造を利用したテラヘルツ波発生
3. 学会等名 テラヘルツ科学の最先端V (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 飯笹大輔, 佐藤 大, 森田 健, 新田淳作, 好田 誠
2. 発表標題 The lifetime of persistent spin helix state under cubic Dresselhaus spin-orbit field in(001) and (110) two-dimensional electron gases
3. 学会等名 PASPS-23
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 川口 晃平, 深澤 俊樹, 志田 博貴, 齋藤 康人, 北田 貴弘, 石谷 善博, 森田 健
2. 発表標題 InGaAs 量子井戸中の拡散電子スピンの作用する内部有効磁場
3. 学会等名 第79回応用物理学会秋季学術講演会名古屋国際会議場
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 盧翔孟, 小楠 洸太郎, 高橋美沙, 合田剛史, 熊谷直人, 森田健, 南康夫, 北田貴弘
2. 発表標題 (113)B GaAsウエハ接合で作製したGaAs/AlGaAs多層膜結合共振器への電流注入によるレーザ発振
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 北田 貴弘, 盧 翔孟, 南 康夫, 熊谷 直人, 森田 健
2. 発表標題 半導体多層膜結合共振器による赤外二波長レーザー発振
3. 学会等名 2018年電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小楠 洸太郎, 南 康夫, 盧 翔孟, 熊谷 直人, 森田 健, 北田 貴弘
2. 発表標題 GaAs/AlGaAs結合共振器による二波長面発光レーザーの時間分解スペクトル測定
3. 学会等名 2018年度 応用物理・物理系学会 中国四国支部 合同学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 森田 健
2. 発表標題 InGaAs量子井戸における時間空間分解スピンダイナミクス
3. 学会等名 東北大学電気通信研究所 共同プロジェクト
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 川口 晃平、深澤 俊樹、北田 貴弘、石谷 善博、森田 健
2. 発表標題 波長切り出し系を利用した通信波長帯スピン時空間ダイナミクス計測
3. 学会等名 第65回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Monte-Carlo simulation of time- and spatial-dynamics for electron spins in GaAs under the high-power THz pulse
2. 発表標題 Ichirota Takazawa, Yoshihiro Ishitani, Ken Morita
3. 学会等名 第65回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Morita, H. Takaiwa, T. Kitada, and Y. Ishitani
2. 発表標題 Influence of above-barrier illumination on spin relaxation time of InGaAs/InAlAs multiple quantum wells
3. 学会等名 SpinTech 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 大隅 勇汰、森田 健、石谷 善博
2. 発表標題 FDTD法を用いたテラヘルツパルス発生シミュレーション
3. 学会等名 第78回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

千葉大学 研究グループHP http://photonics.te.chiba-u.jp/spin/spin-home.html 千葉大学 研究グループHP 研究業績 http://photonics.te.chiba-u.jp/spin/publications.html

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	中嶋 誠 (Nakajima Makoto) (40361662)	大阪大学・レーザー科学研究所・准教授 (14401)	
研究分担者	揖場 聡 (Iba Satishi) (90647059)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・エレクトロニクス・製造領域・研究チーム付 (82626)	