

平成 21 年 6 月 22 日現在

研究種目：特定領域研究
 研究期間：2005～2008
 課題番号：17068013
 研究課題名（和文） 超高速全光スイッチの低エネルギー動作化と全光信号処理デバイスへの展開
 研究課題名（英文） Low-energy operation of ultrafast all-optical gate switch for all-optical signal processing
 研究代表者 石川 浩（ISHIKAWA HIROSHI）
 独立行政法人産業技術総合研究所・ネットワークフォトンクス研究センター・研究センター長
 研究者番号：50392585

研究成果の概要: InGaAs/AlAsSb 系の超薄膜量子井戸のサブバンド間遷移を用いた超高速光ゲートスイッチの低エネルギー動作化を目指して、デバイス設計に必要な基礎物性パラメータの評価、高品質結晶の作成技術の研究開発を行い、160Gb/s 領域で、2pJ の低エネルギーで動作する全光変調位相変調効果を用いたサブバンド間遷移素子の基盤技術を確立した。また、周期構造を集積化することで位相変調効率を上げる構造を提案設計して、その製作技術を確立した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2005 年度	13,100,000	0	13,100,000
2006 年度	16,400,000	0	16,400,000
2007 年度	19,600,000	0	19,600,000
2008 年度	16,400,000	0	16,400,000
年度			
総計	65,500,000	0	65,500,000

研究分野：半導体光デバイス

科研費の分科・細目：

キーワード：量子井戸、サブバンド間遷移、全光位相変調効果、MBE、超高速ゲートスイッチ

1. 研究開始当初の背景

量子井戸のサブバンド間遷移は応答速度が早く、これを利用した吸収飽和型の超高速全光スイッチの研究開発が行われていた。特に InGaAs/AlAsSb 系の超薄膜量子井戸を用いたスイッチは、1ps 程度の応答速度であるため、160Gb/s 用の光スイッチとして研究が行われていた。しかし、実際の光通信システムに適用するには、スイッチングに大きな光エネルギーを必要とし、これを低減させるのが大きな研究課題であった。

2. 研究の目的

InGaAs/AlAsSb 系の量子井戸を用いた超高速全光スイッチについて、物性パラメータの評価、高品質結晶成長技術の開発、デバイスの基本構造設計等の基盤的事項について研究開発を行う。これにより、160Gb/s クラスの超高速光信号処理を低エネルギーの制御パルスで行うことの出来るデバイス実現のための基盤技術の確立を図る。

3. 研究の方法

図 1 にサブバンド間遷移素子の量子井戸構造を示す。InGaAs を井戸層、AlAsSb 層を

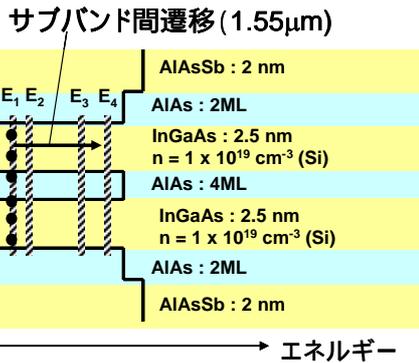


図1 結合量子井戸のエネルギーラインナップ

バリア層とする結合量子井戸構造を採用している。中央のバリアはAlAsを採用、また、井戸層とバリア層の間には、数原子層のAlAs層において、井戸層へのドーピングにともなう構成原子の相互拡散による量子井戸の変形を防いでいる。基底準位と4番目の準位間の遷移(1.55 μm)を使う。この結合量子井戸を数10ペア多層に積層して、導波路構造としている。横方向は、幅1 μm 程度のメサ構造としている。この基本構造で、光スイッチに最適なデバイスを目指すには、多くの課題がある。まず、InGaAs/AlAs系量子井戸ならびにこれを用いた光導波路を設計するための基本的な物性パラメータの正確な把握が必要である。また、歪系の結合量子井戸を多層に積層するため、歪補償も重要であり、歪補償技術を確立する必要がある。そこで、量子井戸を設計するための基本的な物性パラメータである、バンドオフセット、有効質量の評価をフォトリフレクタンス法を用いて行った。また、導波路を設計するために必要な材料系の屈折率について、プリズムカップラー法で評価を行った。これらの評価により、超薄膜結合量子井戸及び、光導波路構造の設計の基本パラメータを得た。また、歪系の超薄膜結合量子井戸の多層積層を可能にするための、歪補償構造の開発を行った。新規の歪補償構造を開発し結晶品質の評価を行った。さらに、この研究の半ばころに発見された、サブバンド間遷移素子におけるTM励起光がサブバンド間遷移で吸収を受けないTE光に高速の位相変調を与える全光位相変調効果に着目して、この効果を増大させる量子井戸構造を開発した。加えて、さらに周期構造による光の閉じ込めを用いた高位相変調効率化などの新規デバイス構造を検討した。

4. 研究成果

(1)物性パラメータの評価

フォトリフレクタンス法を用いて、InGaAs/AlAsSb 超薄膜量子井戸のバンド間

の遷移エネルギーの評価を行い、バンドオフセット、有効質量、バンド非放物性などを用いた解析とフィティングさせることでこれらの値を確定した。格子整合した量子井戸で、バンドオフセット1.6eV、有効質量0.042 m_0 、非放物性パラメータ1.263eVなどを得た。実際の素子に使う歪系についても評価を進めたが、必ずしも正確な評価にまでは至らなかった。しかし、これらの検討から格子整合系のデータをベースにかなり正確な歪系量子井戸の設計が可能となった。

屈折率の評価では、量子井戸と導波路を形成する材料系とこれらを組み合わせた導波路について、プリズムカップリング法で伝播定数の評価から屈折率を評価した。量子井戸及び導波路構造を形成する材料系の屈折率の組成依存性を得ることができた。また、これらの評価値から計算される導波路構造の実効屈折率と導波路構造での評価値の良一致を得た。これにより、光スイッチの低動作エネルギー化に必要な光閉じ込めの大きな導波路構造の設計が可能になった。

(2)結晶成長技術の開発

結晶成長においては、二通りの歪補償構造を検討した。格子定数の小さいAlAs層に対して、井戸層のIn組成を大きくしてバランスをとる方法と井戸層は基板に格子整合させて、バリア層であるAlAsSb層の格子定数を大きくする構造を検討した。いずれの構造においても、結合量子井戸を多層に成長しても、良好なX線回折パターンを実現することができた。また、In組成を増やした構造では、逆格子マッピングにより良好な多層の結晶ができていることを確認した。これら二通りの歪補償構造を使うことで、量子井戸設計の自由度を大きく向上させることができた。

(3)高位相変調効率量子井戸の開発

当初、吸収飽和型の全光スイッチを目指して研究開発を進めてきたが、新たにTMの光でサブバンド間の励起を行うと、サブバンド間遷移では吸収されない、TEモードの光に位相変調が掛かることが発見された。この現象を用いると低損失の超高速光ゲートスイッチを実現することができる。低いゲートパルスエネルギーで大きな位相変化を起こすことができれば低エネルギー動作化ができる。このための新しい量子井戸構造として、図2に示すような、中央バリアをInPに格子整合させたInAlAsとした量子井戸を開発した。解析から位相変調のメカニズムとして、サブバンド間を励起することによる伝導体のフェルミレベルの変化に伴い、バンド間の吸収端のエネルギーが変化し、これに伴う屈折率分散の変化がそのメカニズムであることを明らかにしている。図2の量子井戸では、InAlAsを中央バリアとすることで、二つの量子井戸の結合が強くなり、基底のサブバンド

のエネルギーが下がる。これにより、バンド間の遷移エネルギーがサブバンド間のエネルギーに近づく。このため、バンド間の屈折率分散の影響が大きくなり、位相変調効率が增大する。図3にこの量子井戸を用いた素子

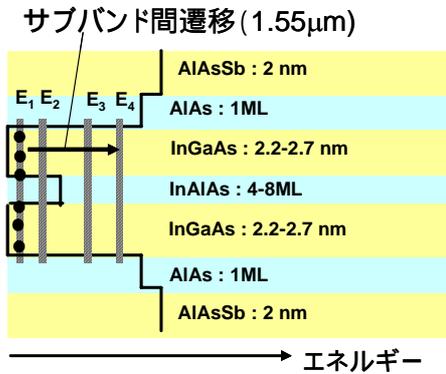


図2 中央バリアを InAlAs とした結合量子井戸

の位相変調効率と導波路のメサ幅との関係を従来量子井戸デバイスと比較して示す。メサ幅を狭くすると位相変調効率が上がっているが、これは光閉じ込めが強くなったためである。また、InAlAs を中央バリアとした新しい量子井戸を用いた素子では、位相変調効率が約2倍となっている。この素子を用いた光干渉計構造のスイッチで、2pJ の制御パルスエネルギーで 160Gb/s の光信号を 40Gb/s に無エラーで多重分離することに成功している。低損失で、超高速の全光スイッチを実現することが可能となった。

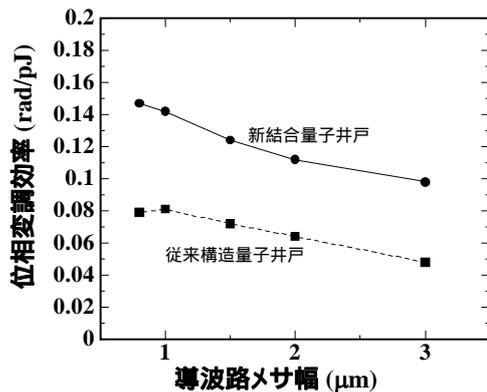


図3 従来量子井戸構造と InAlAs を中央バリアとした量子井戸構造の位相変調効率の比較

(4) 周期構造デバイスの開発

位相変調効率をさらに増大させるデバイス構造として、周期構造による導波路長方向で光閉じ込めを増大させる構造を検討した。

図4に試作した周期の写真を示す。TE 偏光に対するストップバンドを確認することができた。周期構造を用いた位相変調効率の増大には、幾つかのデバイス構造が考えられるため、これまでの成果をベースに最適な構造に向けて今後研究を進めて行く。

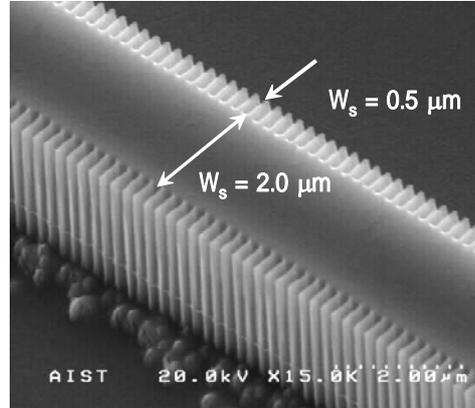


図4 周期構造を作り込んだ持つサブバンド遷移素子の導波路

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計11件)

- 1) S. Gozu, T. Mozume, R. Akimoto, K. Akita, G. Cong, and H. Ishikawa, "Cross Phase modulation efficiency enhancement in $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}/\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}/\text{AlAs}_{0.56}\text{Sb}_{0.44}$ coupled double quantum wells by tailoring interband transition wavelength," *Applied Physics Express*, vol.2, 042201 (1-3), 2009, 査読あり
- 2) S. Gozu, T. Mozume, and H. Ishikawa, "Molecular beam epitaxy of AlAsSb/AlAs/InGaAs coupled double quantum wells with extremely thin AlAs-center-barrier," *J. Crystal Growth*, vol.311, pp.1700-1702, 2009, 査読あり
- 3) M. Nagase, R. Akimoto, T. Simoyama, C. Guangwei, T. Mozume, T. Hasama, and H. Ishikawa, "Enhancement of all-optical cross phase modulation in InAlAs/AlAsSb coupled quantum wells using InAlAs coupling barrier," *IEEE J. Photonics Technol. Lett.*, vol.20, no.24, pp.2183-2185, 2009, 査読あり
- 4) T. Mozume, "Indices of refraction of InGAs/AlAs/AlAsSb multiple-quantum wells measured by an optical waveguide technique," *Physica E*, vol. 40, no. 6, pp.2031-2033, 2008, 査読あり
- 5) T. Mozume, M. Tanaka, A. Yoshimi, and W. Susaki, "Optical functions of AlAsSb characterized by spectroscopic ellipsometry,"

- Phys. Status. Solidi* (a) vol. 205, no. 4, pp. 72-875, 2008, 査読あり
- 6) G. W. Cong, R. Akimoto, M. Nagase, T. Mozume, T. Hasama, and H. Ishikawa, "Mechanism of ultrafast modulation of refractive index in photoexcited $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}/\text{AlAs}_y\text{Sb}_{1-y}$ quantum well waveguides," *Physical Rev. B*, vol. 78, no.7, 075308, 2008, 査読あり
 - 7) H. Ishikawa, H. Tsuchida, K. S. Abedin, T. Simoyama, T. Mozume, M. Nagase, R. Akimoto and T. Hasama, "Ultrafast all-optical refractive index modulation in intersubband transition switch using $\text{InGaAs}/\text{AlAs}/\text{AlAsSb}$ quantum well," *Japan J. Appl. Phys.*, vol.46, pp.L157-L160, 2007, 査読あり
 - 8) T. Mozume, T. Simoyama, and H. Ishikawa, "Indices of refraction of AlGaAsSb by an optical waveguide technique," *J. Appl. Phys.*, vol.102, no.11, p.113111, 2007, 査読あり
 - 9) T. Simoyama, S. Sekiguchi, H. Yoshida, J. Kasai, T. Mozume, and H. Ishikawa, "Absorption dynamics in all-optical switch based on intersubband transition in $\text{InGaAs}-\text{AlAs}-\text{AlAsSb}$ coupled quantum wells," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 19, no. 8, pp. 604-606, 2007, 査読あり
 - 10) M. Nagase, T. Mozume, T. Simoyama, T. Hasama, and H. Ishikawa, "Strain compensation for $\text{InGaAs}-\text{AlAs}-\text{AlAsSb}$ coupled double quantum wells by controlling the barrier-layer composition," *J. Crystal Growth*, vol.301-302, pp.240-243, 2007, 査読あり
 - 11) T. Mozume, J. Kasai, M. Nagase, T. Simoyama, T. Hasama, H. Ishikawa, "Photoreflectance study of $\text{InGaAs}/\text{AlAsSb}$ quantum wells grown by molecular beam epitaxy," *J. Crystal Growth*, vol. 301-302, pp.177-180, 2007, 査読あり
- In_{0.8}Ga_{0.2}As/AlAs/AlAs_{0.56}Sb_{0.44} 結合量子井戸の MBE 成長」, 第 69 回応用物理学学会秋季学術講演会、2009 年 9 月、査読無し
- 4) S. Gozu, T. Mozume, and H. Ishikawa, "Plasma reflection from highly Si-doped $\text{InGaAs}/\text{AlAsSb}$ quantum wells," The Int. Conf. on the Physics of Semiconductors 29, Rio de Janeiro, July 2008, 査読あり
 - 5) T. Mozume and S. Gozu, "Interband transitions in strained $\text{InGaAs}/\text{AlAsSb}$ multiple-quantum-well structures," International Conference on Physics of Semiconductors, Rio de Janeiro, Brazil, July 2008, 査読あり 3
 - 6) S. Gozu et al., "Molecular beam epitaxy of $\text{AlAsSb}/\text{AlAs}/\text{InGaAs}$ coupled quantum wells with extremely thin AlAs -center-barrier," Int. Conf. on Molecular Beam Epitaxy, Vancouver, Canada, Aug. 2008, 査読あり
 - 7) 永瀬成範他、「 $\text{InGaAs}/\text{AlAs}/\text{AlAsSb}$ 結合量子井戸サブバンド間遷移を用いた超高速全光スイッチの開発」レーザ・量子エレクトロニクス研究会、2008 年 6 月、査読なし
 - 8) M. Nagase, R. Akimoto, K. Akita, H. Kawashima, T. Mozume, T. Hasama, and H. Ishikawa, "Fabrication of all-optical switch based on intersubband transition in $\text{InGaAs}/\text{AlAsSb}$ quantum wells with DFB structure," Indium Phosphide and Related Materials, Versailles France, May 2008, 査読あり
 - 9) T. Mozume and S. Gozu, "Room temperature photoreflectance study of $\text{InGaAs}/\text{AlAsSb}$ quantum wells," International Conference on Indium Phosphide and Related Materials, Versailles France, May 2008, 査読あり
 - 10) S. Gozu, T. Mozume and H. Ishikawa, "Refractive index study of n-type InGaAs grown on InP substrate," International Conference on Indium Phosphide and Related Materials, Versailles France, May 2008, 査読あり

[学会発表](計 23 件)

- 1) 牛頭信一郎他、「サブバンド・バンド間遷移波長を制御した $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}/\text{AlGaAs}/\text{AlAs}_{0.56}\text{Sb}_{0.44}$ 結合量子井戸」, 第 56 回応用物理学関係連合講演会、2009 年 3 月 30 日、査読なし
- 2) H. Ishikawa, "Ultrafast all-optical switching using intersubband transitions in $\text{InGaAs}/\text{AlAs}/\text{AlAsSb}$ quantum wells," Asia-Pacific Optical Communications, Oct. 2008, Hangzhou, China. (invited), 査読無し
- 3) 牛頭信一郎他、「薄い AlAs 層を有する $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}/\text{AlAs}/\text{AlAs}_{0.56}\text{Sb}_{0.44}$ 結合量子井戸の MBE 成長」, 第 69 回応用物理学学会秋季学術講演会、2009 年 9 月、査読無し
- 4) S. Gozu, T. Mozume, and H. Ishikawa, "Plasma reflection from highly Si-doped $\text{InGaAs}/\text{AlAsSb}$ quantum wells," The Int. Conf. on the Physics of Semiconductors 29, Rio de Janeiro, July 2008, 査読あり
- 5) T. Mozume and S. Gozu, "Interband transitions in strained $\text{InGaAs}/\text{AlAsSb}$ multiple-quantum-well structures," International Conference on Physics of Semiconductors, Rio de Janeiro, Brazil, July 2008, 査読あり 3
- 6) S. Gozu et al., "Molecular beam epitaxy of $\text{AlAsSb}/\text{AlAs}/\text{InGaAs}$ coupled quantum wells with extremely thin AlAs -center-barrier," Int. Conf. on Molecular Beam Epitaxy, Vancouver, Canada, Aug. 2008, 査読あり
- 7) 永瀬成範他、「 $\text{InGaAs}/\text{AlAs}/\text{AlAsSb}$ 結合量子井戸サブバンド間遷移を用いた超高速全光スイッチの開発」レーザ・量子エレクトロニクス研究会、2008 年 6 月、査読なし
- 8) M. Nagase, R. Akimoto, K. Akita, H. Kawashima, T. Mozume, T. Hasama, and H. Ishikawa, "Fabrication of all-optical switch based on intersubband transition in $\text{InGaAs}/\text{AlAsSb}$ quantum wells with DFB structure," Indium Phosphide and Related Materials, Versailles France, May 2008, 査読あり
- 9) T. Mozume and S. Gozu, "Room temperature photoreflectance study of $\text{InGaAs}/\text{AlAsSb}$ quantum wells," International Conference on Indium Phosphide and Related Materials, Versailles France, May 2008, 査読あり
- 10) S. Gozu, T. Mozume and H. Ishikawa, "Refractive index study of n-type InGaAs grown on InP substrate," International Conference on Indium Phosphide and Related Materials, Versailles France, May 2008, 査読あり
- 11) 牛頭信一郎他、「n 型キャリヤ密度依存 InGaAs 屈折率変化の解析」, 第 55 回応用物理学関係連合講演会、2008 年 3 月、査読なし
- 12) 永瀬成範他「 InAlAs 結合障壁を用いた $\text{InGaAs}/\text{AlAsSb}$ 結合量子井戸における XPM 効率改善」, 第 55 回応用物理学関係連合講演会、2008 年 3 月、査読なし
- 13) 永瀬成範他、「DFB 構造を有する $\text{InGaAs}/\text{AlAsSb}$ 量子井戸サブバンド間遷移スイッチの製作」第 68 回応用物理学学会

- 秋季学術講演会、2007年9月、査読なし
- 14) 牛頭信一郎他、「InGaAs 屈折率の n 型キャリア濃度依存性」第 68 回応用物理学会秋季学術講演会、2007年9月、査読なし
- 15) Lim Chen Guan 他、「Characteristics of the ultrafast phase modulation in InGaAs/AlAsSb CDQW ISBT switch」第 68 回応用物理学会秋季学術講演会、2007年9月8日、査読無し
- 16) M. Nagase et al., "Improvement of XPM efficiency in InGaAs/AlAsSb coupling barrier for intersubband transition optical switch," Conf. on Optical Communications, San Diego, USA, Feb. 2007, 査読あり.
- 17) H. Ishikawa, "Ultrafast all optical switches using intersubband transitions in quantum well," 3rd Int. Symposium on Ultrafast Photonic Technologies, Cambridge USA, Aug. 2007, 査読なし
- 18) T. Mozume, "Indices of refraction of InGaAs/AlAs/AlAsSb multiple-quantum-wells measured by an optical waveguide technique," 13th International Conference on Modulated Semiconductor Structures, PM10, Genova Italy, July 2007, 査読あり
- 19) H. Ishikawa, "InGaAs/AlAs/AlAsSb intersubband transition all-optical switches for ultrafast all-optical signal processing," OECC/IOOC2007, Yokohama, Japan, July 2007 (Invited), 査読なし
- 20) T. Mozume, M. Tanaka, A. Yoshimi, and W. Susaki, "Optical functions of AlAsSb characterized by spectroscopic ellipsometry," 4th International Conference on Spectroscopic Ellipsometry, Stockholm, Sweden, June 2007, 査読あり
- 21) M. Nagase, T. Mozume, T. Simoyama, T. Hasama, and H. Ishikawa, "Intersubband transitions in novel strained coupled quantum wells based on In_{0.53}Ga_{0.47}As grown by molecular beam epitaxy," International Conference on Indium Phosphide and Related Materials, Princeton, NJ, USA, May 2006, 査読あり
- 22) H. Ishikawa, T. Simoyama, M. Nagase, R. Akimoto, B. Li, K. Akita, and T. Hasama, "Ultrafast all-optical switches using intersubband transition in quantum wells," International Conference on Indium Phosphide and Related Materials, Princeton, NJ, USA, May 2006 (invited), 査読なし
- 23) T. Mozume, M. Nagase, T. Simoyama, and H. Ishikawa, "InGaAs-based quantum wells for ultrafast all-optical switches using intersubband transitions," JSPS-UNT Joint Symposium on Nanoscale Materials for

Optoelectronics and Biotechnology, Denton, Texas. Feb. 2006 (invited), 査読なし

〔図書〕(計 1 件)

1) "Ultrafast All-optical Signal Processing Devices", Edited by H. Ishikawa, John Wiley and Sons, 2008, (Chapter 5 に関連記述)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 1 件)

永瀬成範 他、「結合量子井戸構造」特願 2008-529885

6 . 研究組織

(1) 研究代表者

石川 浩 (ISHIKAWA HIROSHI)
産業技術総合研究所・ネットワークフォトン
クス研究センター・研究センター長
研究者番号 : 50392585

(2) 研究分担者

物集 照夫 (MOZUME TERUO)
産業技術総合研究所・ネットワークフォトン
クス研究センター・主任研究員
研究者番号 : 20399497
永瀬 成範 (NAGASE MASANORI)
産業技術総合研究所・ネットワークフォトン
クス研究センター・研究員
研究者番号 : 80399500
河島 整 (KAWASHIMA HITOSHI)
産業技術総合研究所・超高速光信号処理デバ
イス研究ラボ・主任研究員
研究者番号 : 60415784
杉本 喜正 (SUGIMOTO YOSHIMASA)
産業技術総合研究所・超高速光信号処理デバ
イス研究ラボ・招聘研究員
研究者番号 : 10415771
池田 直樹 (IKEDA NOKI)
産業技術総合研究所・超高速光信号処理デバ
イス研究ラボ・特別研究員
研究者番号 : 10415771
秋本 良一 (AKIMOTO RYOICHI)
産業技術総合研究所・ネットワークフォトン
クス研究センター・主任研究員
研究者番号 : 30256349
牛頭 信一郎 (GOZU SHIN-ICHIRO)
産業技術総合研究所・ネットワークフォトン
クス研究センター・特別研究員
研究者番号 : 90392729
挟間 壽文 (HAZAMA TOSHIFUMI)
産業技術総合研究所・ネットワークフォトン
クス研究センター・副センター長

研究者番号：90357765

鍬塚 治彦(KUWATSUKA HARUHIKO)

産業技術総合研究所・ネットワークフォトニクス研究センター・研究チーム長

研究者番号：40417150

秋田 一路(AKITA KAZUMICHI)

産業技術総合研究所・ネットワークフォトニクス研究センター・特別研究員

研究者番号：50470050

Lim Cheng Guan

産業技術総合研究所・ネットワークフォトニクス研究センター・特別研究員

研究者番号：10470048

小笠原 剛(OGASAWAR TAKESHI)

産業技術総合研究所・ネットワークフォトニクス研究センター・特別研究員

研究者番号：00392598