

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 23 日現在

機関番号：82636

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26390043

研究課題名(和文) 表面プラズモンと半導体量子ドットの相互作用制御と電流駆動型発光デバイス応用

研究課題名(英文) Low loss coupling and compensation technology of a nano-size optical waveguide with quantum dot optical gain device

研究代表者

山本 直克 (Yamamoto, Naokatsu)

国立研究開発法人情報通信研究機構・ネットワークシステム研究所ネットワーク基盤研究室・研究マネージャー

研究者番号：60328523

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：サブナノ層間分離構造を用いた高品質量子ドットにより、波長1300nm帯などの広帯域光増幅デバイス動作を達成した。量子ドット光増幅デバイスとプラズモニックデバイス等のナノ構造デバイスとの効率的結合をめざし、研究を実施した。フォトニックナノチューブ構造により、数100nm以下に光波が収束できることを発見した。量子ドット光ゲインと数100nmのシリコン細線リング導波路のバットジョイント結合に成功し、ヘテロジニアス量子ドットレーザの開発に世界に先駆け成功した。これはナノサイズ光導波デバイスによるロス量子ドット光ゲインで増幅・補償するための重要な基盤技術であり、招待論文等の顕著な研究成果となった。

研究成果の概要(英文)：We proposed a novel crystal growth technique as “Sandwiched sub-nano separation (SSNS)” to obtain a high-quality and high-density quantum dots, and then a broad band semiconductor optical amplifier device for a wavelength between 1250 and 1310 nm was successfully developed. We conducted research aiming at efficient coupling of quantum dot optical amplifier and nano-structured device such as a plasmonic device. We found that the photonic nanotube structure can converge the light waves to several 100 nm or less. A quantum dot optical gain device and silicon nano-wire waveguide ring resonator of several 100 nm size were effectively coupled with a butt-joint technique, and we succeeded in first developing the broadband heterogeneous quantum dot laser. These are important fundamental technologies for amplifying and compensating for the optical loss due to the nano-structured device with quantum dot optical gain device, and it has become a remarkable research result of invited papers etc.

研究分野：光集積デバイス技術

キーワード：量子ドット 光増幅器 ヘテロジニアス シリコンフォトニクス プラズモニクス 半導体レーザ ホーリーファイバ スポットサイズ変換

1. 研究開始当初の背景

超小型な光集積デバイスを実現するためには、光伝搬を担う構造として半導体ナノ細線による高屈折率光閉じ込め構造や、プラズモン導波路構造の利用が有効である。これらの微細構造により構成される光デバイスでは、その挿入損失の大きさが技術的課題となっている。例えばプラズモン導波路を用いた光変調器構造では、その挿入損失が 30~40dB と非常に高い数字を示すことが知られている。将来、情報通信分野において、半導体ナノ細線やプラズモン導波路のような高ロスの微細構造を用いた超小型光集積デバイスを実現するには、損失の低減はもちろんではあるが、その損失補償と信号増幅に寄与する光増幅技術が重要となる。

2. 研究の目的

半導体ナノ細線やプラズモン導波路等のナノサイズの微細な光導波路構造(ナノ光導波路)において、その導波損失等を補償することを目的として、量子ドットを用いた広帯域光ゲインデバイス技術の開発と、その光ゲインデバイスとナノ光導波路を効率的にカップリングする技術を確立する。さらにナノ光導波路を伝搬する光を量子ドット光ゲインにより増幅し、機能デバイスとして動作させることを目的とする。

3. 研究の方法

高効率な光ゲインデバイスを実現するには、高品質・高密度な量子ドット発光材料の開発が重要となる。量子ドットは半導体結晶成長により形成されるが、その作成条件最適化と新成長技術の導入が必要である。また、本研究ではナノ細線やプラズモン等の微細光導波構造のロス量子ドット光ゲインデバイスで増幅・補償する効果的な機構についての研究開発であり、これらナノサイズの光モードを有する微細光導波構造と量子ドット光ゲインデバイスの効率的なカップリング技術について研究を実施する。

4. 研究成果

(1) 高密度・高品質量子ドット形成技術

量子ドットは分子線エピタキシ装置による結晶成長で作製された。半導体 GaAs(001) 基板に、InAs 量子ドットを形成する。InAs 膜厚は約 2~3 分子層とし、格子不整合にともなう SK 結晶成長モードの自己組織化を用いることで高さ 3 nm 程度、直径 20 nm 程度の 3 次元の粒状構造を形成した。通常の量子ドット構造の形成では、InAs 分子の結晶表面での運動により巨大な凝集構造(大きさ 10~100nm 程度)が確率的に形成されることがある。このような凝集構造は、量子ドットを電流注入デバイスへ応用する時の大きな妨げとなる。本研究では、この凝集構造形成を抑圧する新手法として「サブナノ層間分離技術(Sandwiched sub-nano separation: SSNS)」

の提案を行い、それによる高品質・高密度量子ドットの形成を実施した。図1に SSNS 技術を用いた量子ドットの原子間力顕微鏡による表面観察像を示す。SSNS は、量子ドット形成直前にサブナノ厚の非常に薄い半導体層を挿入する技術である。具体的には InGaAs 結晶表面に GaAs を 3 分子層積層した後に、InAs 量子ドットを形成することで、図1に示すような高密度($8 \times 10^{10} / \text{cm}^2$ 程度)で、かつ巨大な凝集構造のない高品質な量子ドット構造を得ることができる。

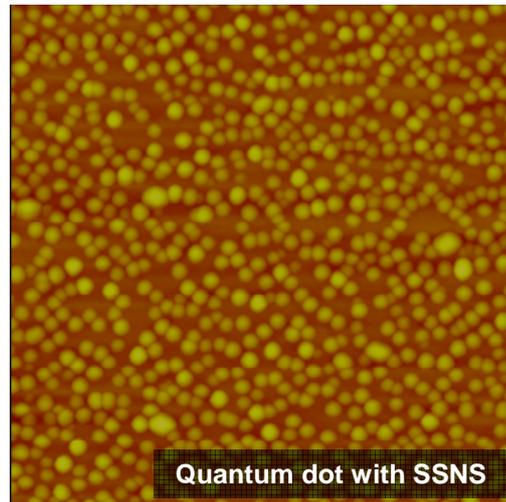


図1 サブナノ層間分離技術による高品質・高密度量子ドット構造の表面観察像

(2) 量子ドット光ゲインデバイス技術

高密度・高品質量子ドットを用いることで、量子ドット光ゲインデバイスの製作を実施した。図2に量子ドット光ゲインデバイスの断面構造と、作製されたデバイスの表面観察写真を示す。作製された量子ドット光ゲインデバイスは、将来の集積光デバイス応用を見込んで二電極構造としており、半導体光増幅領域(Semiconductor Optical Amplifier: SOA)と光ゲイン変調領域(Optical Gain Modulator: OGM)に分離されている。量子ドット構造は InGaAs に埋め込まれた InAs 量子ドットを採用し、これにより T-band(Thousand band: 1000~1260 nm)と O-band(Original band: 1260~1340 nm)の中の広い波長領域対応した量子ドット光ゲインを得ることが可能となる。量子ドット構造の形成では、先の SSNS 技術を用いることで高品質化、高密度化を図っている。また、高い光ゲインを得るために、7もしくは8層の量子ドット層積層を行った。活性層領域の厚みは 400nm とした。試作された量子ドット光ゲインデバイスは、SOA 領域が 3680 ミクロン、OGM 領域が 300 ミクロン程度の長さとし、p 型クラッド層の電極分離により 2 電極光導波路構造が作成されている。n および p 型半導体電極には Au-Ge と Ti/Pt/Au の金属電極がそれぞれ用いられ、デバイスは駆動電

流による発熱の影響を低減するために、Cu-W で構成されるサブマウントに実装された。

図3に量子ドット光ゲインデバイスへの電流注入時のゲイン特性を示す。デバイスの両端は誘電体薄膜により無反射コートされ、通常石英系レンズによる空間光学結合で光ファイバと接続された。今回、カップリング損失の補償という観点から、定電流駆動での特性結果を図3として示す。電流量の増加とともに外部入力光が増幅され、動作波長 1300 nm の時に、およそ 45mA でゲインが 0 dB となりカップリング等で発生するデバイスの挿入損失が補償された。なお、45mA 以上の電流注入でさらにゲインが得られ、試作された量子ドット光ゲインデバイスは半導体光アンプとして機能することが確認された。また、図3では、光ゲインデバイスの自然放出光強度の電流量依存性も示されている。自然放出光は 50mA 程度で約 -20 dBm と低い値で推移していることが確認された。

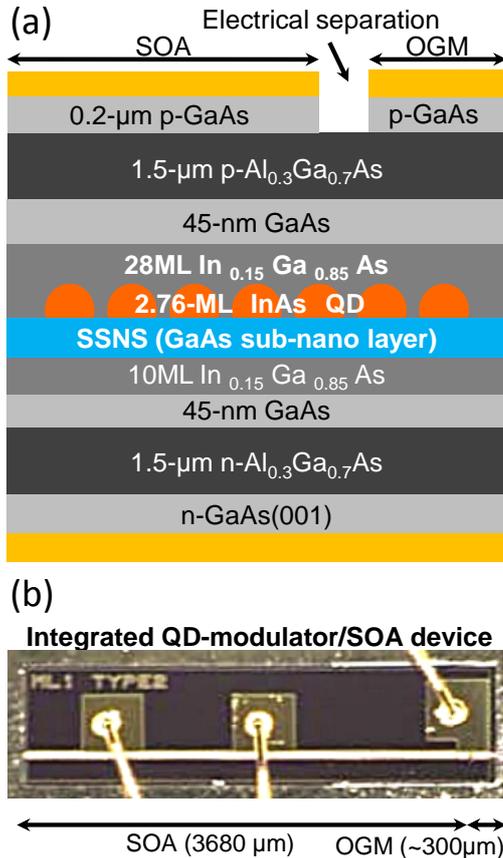


図2 (a)量子ドット光ゲインデバイスの断面構造と(b)二電極に分離された光集積デバイス構造の上部観察写真

OGM 領域の電流変化により、入力される光信号に係るゲイン量を高速に変調できることが実験的に確認された。変調幅は約 6 dB であり、Gbps 級の高速光変調と光ファイバ伝送によるエラーフリー特性が確認されている。このため、図2に示す量子ドット

ト光集積デバイスは、SOA を内蔵した光通信トランシーバのコアデバイスとして機能することが期待される。ただし、現在の駆動速度はおよそ 7 Gbps 程度であるため、高速化のための OGM 領域の電極構造などの最適化が必要と考えている。以上より、高密度・高品質量子ドットの積層構造を用いた光ゲインデバイスの作成に成功した。

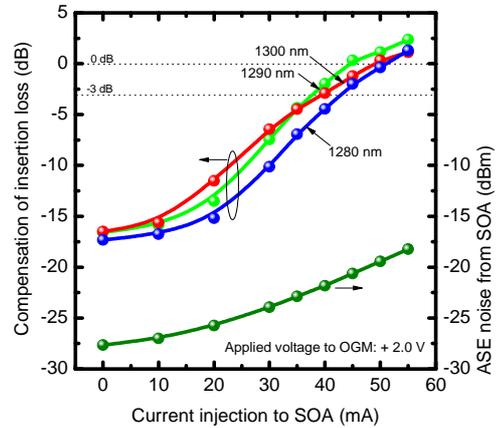


図3 量子ドット光ゲインデバイスの電流注入量に対する光増幅特性および自然放出光の出力特性

(3) ナノサイズ集光のためのフォトニックナノチューブ技術の提案

半導体光デバイスの通常のリッジ型光導波路構造では、高さ方向の光閉じ込めは数 100nm 程度と小さいが、一般に横方向の閉じ込めが幅数ミクロン程度と大きな構造である。また、光ファイバはコア/クラッド構造により、直径 10 ミクロン程度の光モードが形成されている。将来、ナノ細線導波路やプラズモニック導波路を活用し、量子ドット光ゲインデバイスとナノ光導波路の微小な光モードとを如何に効率的にカップリングさせるかが重要な技術となる。

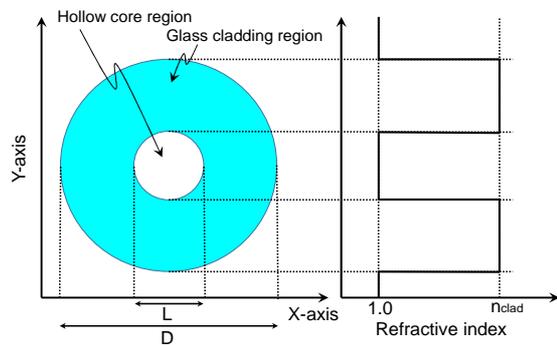


図4 ナノサイズに光を集光するためのフォトニックナノチューブの断面構造とその屈折率分布

本研究では、石英系の光ファイバ構造でありながら、数 100nm に光を集光するための技術としてフォトニックナノチューブを開発した。図4にフォトニックナノチュ

ープの断面模式図と、その屈折率分布を示す。フォトニックナノチューブは、石英ガラスをクラッドとする構造で、光を集光する領域が直径数 100nm の中空構造で構成されている。今回、光閉じ込めおよび光伝搬をそれぞれ計算するために電界シミュレータにより解析した。図5にフォトニックナノチューブを伝搬する光モードの解析結果の一例を示す。ファイバの直径 D を1ミクロンとし、中空領域を 200nm とした。シミュレーションの結果、200nm の中空コア領域に光のエネルギーが集中していることが分かる。

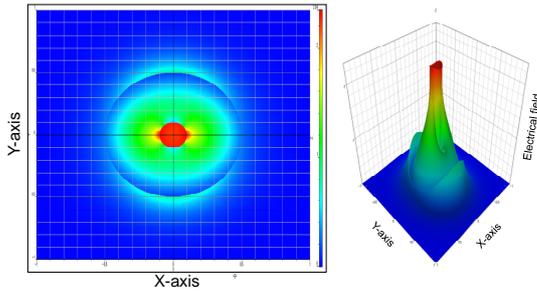


図5 200nm の中空コアを有するフォトニックナノチューブ構造の光電界分布

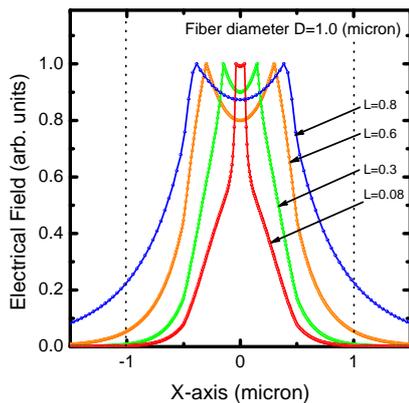


図6 中空コア径 L の異なるフォトニックナノチューブの光電界分布

さらに、図6に示す中空コアの直径に対するフォトニックナノチューブ内の電界強度分布から、わずか 80nm の中空コアに対しても同様の集光特性が得られることが明らかとなった。この結果は、中空コアを有するフォトニックナノチューブが光を効率的にナノレベルのサイズに集光する構造として有効であることを示唆し、ナノ細線やプラズモニックデバイス等のナノサイズ光導波路構造への光接続デバイスとして機能することが期待される。

中空コアへの光閉じ込め効率はファイバ直径に依存するが、ファイバ直径 D が1ミクロンの時、中空コア径 L が 600nm のときに 50%近い光の閉じ込め効率が得られることが計算より得られた。図7にその時のフォトニックナノチューブ内の電界分布を示す。図7(a)から、先の図5と同様に光

電界が中空コアに収束していることが確認され、効率的に光が中空コアに集光されていることが確認された。図7(b)に中空コアに光の電界分布が集中し 50%近い光エネルギーがコア内に存在していることが分かる。しかしドーナツ状に形成された石英クラッドの外部にも、電界分布が広がっている事が図7(b)より分かる。このことから、フォトニックナノチューブの外部構造が光分布に大きく影響を与えることとなり、固定や配線方法などのフォトニックナノチューブの実装技術を別途検討する必要がある。一方で、この漏れ光電界を使うことで光によるセンシング等への応用展開も期待される。

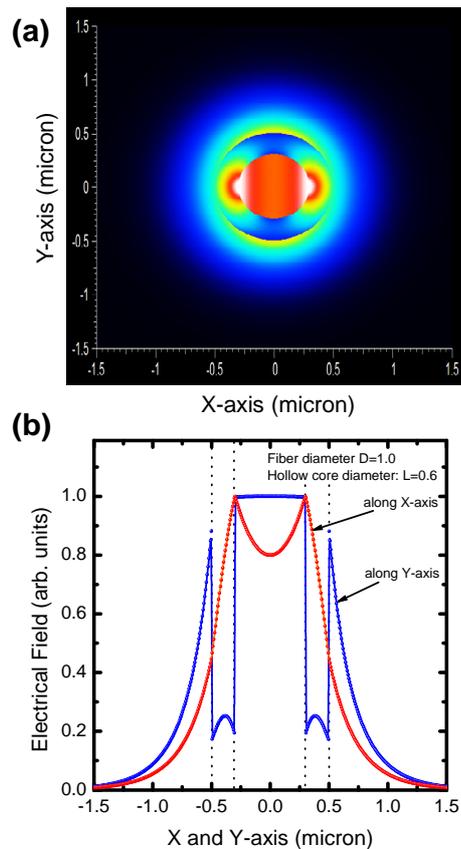


図7 (a)フォトニックナノチューブ内の光モードと(b)中心部分の X、Y 軸に沿った電界強度分布

(4) 量子ドット光ゲインデバイスとナノ細線シリコン光導波路構造を結合するヘテロジョイント技術

シリコンは高屈折率材料であることから、その光導波路構造は石英系光導波路構造よりも格段に小型ができ、一般にシリコン細線光導波路構造は断面が数 100nm の非常に小さな構造となる。このナノ細線光導波路への効率的な光ゲインデバイスの接続技術を確認することは、本研究の目的である。本研究では、(1)で作成した量子ドット光ゲインデバイスと、シリコン細線光導波路構造をバットジョイントにより光結合し、

量子ドットの光ゲインとシリコン細線光回路による波長選択を高度に組み合わせた波長可変光源の試作を行った。バットジョイントによる効率的な光結合を達成するために、量子ドット光ゲインデバイスの出射角度の調整が行われた。図8に、量子ドット光ゲインチップとスポットサイズ変換が装荷されたシリコンナノ細線光導波路構造のバットジョイント結合の様子を示す。シリコンナノ細線デバイスは2つのリング構造で構成されており、リング導波路にはマイクロヒータが組み込まれており、そのヒータ温度に対応した任意の波長選択が可能機能を有する。リング光共振器により反射された光は量子ドット光ゲインデバイスで増幅され、波長可変レーザとして駆動する。図9に1242nm近傍でレーザ発振させたときの光スペクトルを示す。サイドモードが40dB以上の高い抑圧比で動作していることが確認された。本研究の世界に先駆けたヘテロジニアス量子ドットレーザ発振の結果は、量子ドット光ゲインデバイスとシリコンナノ細線光回路の高効率な結合によって実現された成果である。

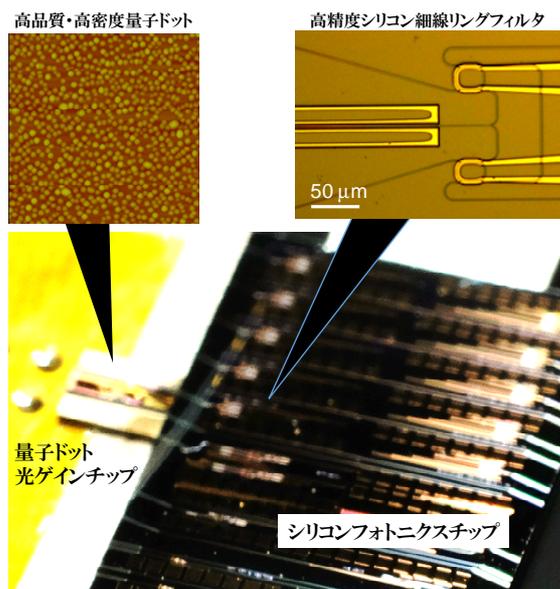


図8 量子ドット光ゲインチップとシリコンナノ細線光導波路のバットジョイント結

半導体で構成されるナノ細線光導波路構造と量子ドット光ゲインデバイスの光損失を抑えた高効率カップリングとして、接続界面での光モード制御による直接的な接合が効果的であり、これにより機能集積デバイスが作成可能であることが確認された。このことからナノ細線導波路デバイスやプラズモニクデバイスで発生する光ロス、量子ドット光ゲインデバイスで増幅・補償できることを示唆する成果が得られた。さらに、光ファイバとこれらナノサイズの光導波路構造のカップリングにはフォトニックナノチューブの利用が効果的と期待される

成果が得られた。

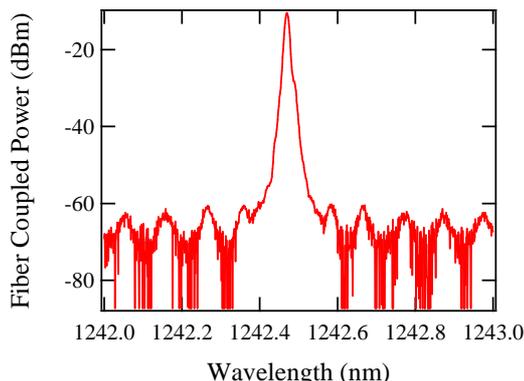


図9 ヘテロジニアス量子ドットレーザの発振スペクトル

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計4件)

- ① Tomohiro Kita, Hiroyuki Yamazaki, Naokatsu Yamamoto, Hirohito Yamada, "Silicon photonic wavelength tunable lasers for high-capacity optical communication system," Proc. of Optical fiber communications conference, 査読有, 2017.
- ② Tomohiro Kita, Naokatsu Yamamoto, Atsushi Matsumoto, "Heterogeneous quantum dot / silicon photonics-based wavelength-tunable laser diode with a 44 nm wavelength-tuning range," Jpn. J. Appl. Physic, 査読有, Vol. 55, 2016, 04EH11.
- ③ Naokatsu Yamamoto, Kouichi Akahane, Toshimasa Umezawa, Atsushi Matsumoto, Atsushi Kanno, Tetsuya Kawanishi, Tomohiro Kita, and Hirohito Yamada, "Advanced photonic ICT devices and their system applications using quantum-dot technology," Proc. of Asia communications and photonics conference, 査読有, 2015, AM2A.
- ④ Fakruddin Mazlan, Naokatsu Yamamoto, Hiroshi Takai, and Tetsuya Kawanishi, "Optical confinement characterization of photonic nanotube as a nano-structured hollow-core optical fiber," 電子情報通信学会 信学技報、査読無、Vol. 114, No 453, 2015, pp. 11-14.

〔学会発表〕(計7件)

- ① Tomohiro Kita, Hiroyuki Yamazaki, Naokatsu Yamamoto, Hirohito Yamada, "Silicon photonic wavelength tunable lasers for high-capacity optical communication system," Optical fiber communications conference, Los Angeles convention center (Los Angeles, USA), 2017年3月22日(招待講演)

- ② 山本直克、「超広帯域量子ドット光デバイス技術－光・高周波融合中短距離ネットワークへの展開」、光産業技術振興協会、AP 品川アネックス(東京都、港区)、2017年1月11日(招待講演)
- ③ Naokatsu Yamamoto, Kouichi Akahane, Toshimasa Umezawa, Atsushi Matsumoto, Atsushi Kanno, Tetsuya Kawanishi, Tomohiro Kita, and Hirohito Yamada, “Advanced photonic ICT devices and their system applications using quantum-dot technology,” Asia communications and photonics conference, Hong Kong Convention & Exhibition Centre (Hong Kong, China), 2015年11月19日
- ④ Naokatsu Yamamoto, Kouichi Akahane, Toshimasa Umezawa, Atsushi Matsumoto, and Tetsuya Kawanishi, “Monolithically integrated quantum dot optical modulator with semiconductor optical amplifier for T-band optical communications,” Solid state device and materials conference, Sapporo convention center (Sapporo, Hokkaido), 2015年9月29日
- ⑤ 江森俊文、山本直克、赤羽浩一、梅沢俊匡、松本 敦、川西哲也、渡辺克樹、高井裕司、「T バンドにおける半導体光アンプ集積・量子ドット光変調デバイス」、第76回応用物理学会秋季学術講演会、名古屋国際会議場(愛知県、名古屋市)、2015年9月16日
- ⑥ Fakuiddin Mazlan, Naokatsu Yamamoto, Hiroshi Takai, and Tetsuya Kawanishi, “Optical confinement characterization of photonic nanotube as a nano-structured hollow-core optical fiber,” 電子情報通信学会 光エレクトロニクス研究会、鹿児島県宝山ホール(鹿児島県、鹿児島市)、2015年2月19日
- ⑦ Naokatsu Yamamoto, “Quantum dot photonic device for communications,” 4th Annual world congress of nano science and technology, Qingdao International Convention Center (Qingdao, China), 2014年10月29日(招待講演)

〔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

【日本語】

http://www.nict.go.jp/data/nict-news/NICT_NEWS_1610_J.pdf

【英語】

http://www.nict.go.jp/en/data/nict-news/NICT_NEWS_1610_E.pdf

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山本 直克 (YAMAMOTO, Naokatsu)
国立研究開発法人 情報通信研究機構・ネットワークシステム研究所ネットワーク基盤研究室・研究マネージャ
研究者番号：60328523