

平成 28 年 6 月 15 日現在

機関番号：26402

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2012～2014

課題番号：24246063

研究課題名(和文) 高速ポリマ光変調器の超低消費電力化

研究課題名(英文) Ultra-low voltage drive of high speed optical polymer modulators

研究代表者

榎波 康文 (Enami, Yasufumi)

高知工科大学・工学部・教授

研究者番号：90377474

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 36,000,000円

研究成果の概要(和文)：代表者が考案した新規電気光学(E0)ポリマ/TiO₂垂直閉込型スロット光導波路を実証し超薄膜のE0ポリマへの光導波と電極間隔減少するとともに光変調に世界で初めて成功した。低屈折率多孔性メソポーラスゾルゲルシリカクラッド材料をスロット導波路に使用しE0ポリマへの光閉じ込め効率及びポーリング効率向上、ゾルゲルシリカクラッド導電率増加によりポーリング効率増加による半波長電圧低減を行った。印加変調電界強度増大とE0ポリマポーリング効率向上によりE0係数の低いE0ポリマ(78pm/V)を用いた場合でも代表者の高性能ポリマ光変調器に匹敵する半波長電圧と電極長積(VpiL) 2.0 Vcmを実現した。

研究成果の概要(英文)：I demonstrated my own proposed novel electro-optic (E0) polymer/TiO₂ vertical slot waveguide modulators. I reduced the thickness of the E0 polymer down to 0.3 micron and obtained the waveguiding and simultaneously reduced the electrode distance. I successfully obtained optical modulation from the vertical slot waveguide at the first time. I increased mode confinement in the thin E0 polymer and poling efficiency using low-index and mesoporous sol-gel silica layer as an interfacial layer in the slot waveguide modulators. I also increased the electrical conductivity of the sol-gel silica cladding to increase the poling efficiency. As a result, I obtained comparably low half wave voltage and electrode length produce (VpiL) of 2.0 Vcm even though E0 coefficient is lower (78 pm/V) than that of previously demonstrated high performance E0 polymers. These demonstrated polymer modulates enables low power consumption in future optical interconnection

研究分野：工学

キーワード：光変調器、電気光学ポリマ 低電圧駆動

1. 研究開始当初の背景

実証してきた電気光学(EO)ポリマは EO 係数が高いため、微弱な電圧信号で光変調や光スイッチングが可能である。110GHz 帯域幅ポリマ光変調器が実証された後、光通信だけではなく図 1 に示すスマートフォン等の電波信号を光信号に変換した後中継局間を光ファイバで高速伝送する RF リンク、航空機に光変調器を搭載したミリ波リモートセンシング、衛星に搭載して衛星間を光通信するポリマ光変調器の研究が米国において盛んである。特に衛星に搭載する際には消費電力と放射線の影響が重要である。EO ポリマは放射線に対し強い耐久性を有することが確認されており、衛星内部の限られた電池容量の有効活用のため低消費電力のポリマ光変調器が必要である。また、音速小型航空機に使用されている RF ケーブル類を光ケーブルに置き換えることで航空機の燃費向上を行うことが検討されており、そのためにも高速光変調器が求められている。近年では、PC 内部のチップ間を光ファイバで接続し高速で信号伝送をすることで、現在の電子回路の限界を光変調器による電気光学変換により打破しようとする先進的研究がインテル等や米国の大学で活発[1]である。これらの理由から超低消費電力化可能な高速ポリマ光変調器の研究が注目されている。

2. 研究の目的

代表者は進行波型光変調器に適した金属電極を有する垂直閉込型多層薄膜スロット導波路を考案し、ポーリング効率向上、光損失低減及び 60GHz 帯域幅を可能とするため半導体材料を使用せず、全絶縁体によるデバイス構造を研究する。EO ポリマへの光閉込効率向上のために低屈折率多孔性(メソポーラス)ゾルゲルシリカを下部クラッドに使用して光閉込効率向上を行うと共にポーリ

ング効率向上を行う。ゾルゲルシリカの導電率を増加することによるポーリング効率向上や低屈折率 EO ポリマを使用しスロット導波路において EO ポリマへの光閉込効率向上を行う。最終的にこれらの研究成果を組み合わせるにより、ポリマ光変調器の更なる低電圧駆動と低光損失化を行う。

3. 研究の方法

本研究においては、光の波長以下の領域に光を閉じ込めることを可能とする垂直閉込型スロット光導波路型光変調器を用い電極間隔減少と光閉込効率増加を行い光変調器の半波長電圧減少を行う。図 1 に示す高い光出力を実証した垂直閉込型 TiO₂ スロット内部に配置した EO ポリマへ高密度の光閉込めを行う。光導波路内部で高い EO 係数を得るため、低屈折率 EO ポリマ材料及び膜厚の選定を行い、デバイス環境下における EO ポリマのポーリング効率改善を行う。その後クラッド層に低屈折率多孔性ゾルゲルシリカを使用して光閉込効率を増加する。スロット内部 EO ポリマに対するポーリング効率最適化後、高い光閉込効果が光変調器の半波長電圧に反映されることを実証する。その後下部クラッド層に屈折率材料を併用し電極間隔を減少した低電圧駆動の光変調器を作製する。更に光変調器の高速化のために進行波型電極設計及び試作を行う。

4. 研究成果

(1) EO ポリマ/TiO₂ 垂直スロット導波路型光変調器の低電圧駆動

a. 光変調実証

従来の誘電体光導波路を用いた場合、光の波長より遙かに小さいナノメートルサイズの領域に十分な光を閉じこめることは困難である。高屈折率材料を用いたスロット光導波

路は、スロット間の波長以下の領域に光を閉じ込めることが可能であることをFDTD(Finite Differential Time Domain)法による理論的計算後、実験的に実証した。本研究課題においては電極間隔を極限まで減少し半波長電圧を低減するため図1に示す垂直閉込型スロット薄膜導波路をポリマ光変調器に導入した。TiO₂スロット薄膜間にE0ポリマを閉じこめた光変調器やパッシブ導波路として光変調器に応用することで、電極間隔を5μm以下(従来ハイブリッド型の1/3以下)とした。海外共同研究者作製の低屈折率(1.621)E0ポリマを使用しE0ポリマ膜厚やクラッド層材料及び膜厚の最適化を行った。本デバイスにおける半波長電圧下減少のため、E0ポリマ薄膜より2桁以上導電率の高いゾルゲルまたはスパッタリングTiO₂薄膜を使用する。本E0ポリマ・TiO₂垂直閉込型光導波路を用いて世界で初めて光変調に成功し、マツハツェンダ(MZ)型光変調器をデュアル駆動し半波長電圧測定($V_{\pi}L$ 積 3.25 Vcm)を行った。

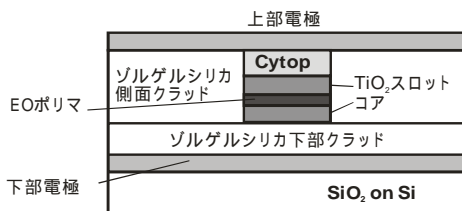


図1 高い光出力を実証したポリマ光変調器用多層薄膜垂直閉込型スロット導波路断面図(特許権利化済)

b. 低屈折率メソポーラスゾルゲルシリカを使用した光変調器

ゾルゲルTiO₂屈折率は、低温処理した場合熱処理を行ったTiO₂(屈折率2.9)やシリコン(屈折率3.4)に比べて低い(屈折率2.567)。したがって、シリコンスロット内部に閉じ込めたE0ポリマに比べてゾルゲルTiO₂スロット層に挟まれたE0ポリマ(屈折率1.6-1.7)

内部への光の閉じ込め効果が低く、上部及び下部電極による導波光の光吸収の影響を受けやすく光導波損失が高い。これを避けるために低屈折率E0ポリマ(1.621)を用いると共にゾルゲルシリカ屈折率(1.5)より低い多孔性(メソポーラス)ゾルゲルシリカ(屈折率1.3 - 1.4)を下部ゾルゲルシリカクラッドと電極間に配置して使用した。ポーリングの際の条件を従来のハイブリッド型E0ポリマ・ゾルゲルシリカ光導波路と同一とするために下部TiO₂スロット層を使用せず、上部TiO₂層のみを使用した。メソポーラスゾルゲルシリカは低屈折(1.32)で導電率も通常のゾルゲルシリカに類似している。0.55 μm膜厚の多孔性メソポーラスゾルゲルシリカの導電率増加によるポーリング効率増加のためにUV照射(12mW/cm²)を30s行った。UV照射しない場合に比べてポーリングの際の電流を10倍に増加することに成功した。MZ型光変調器を用い導波光のE0ポリマへの閉じ込め効率を増加し光導波損失を低減しつつ電極間隔減少による印加変調電界増加とモード重畳積分増加の双方による超低電圧駆動($V_{\pi}L$ 積 3.0 Vcm)及びE0係数増加($r_{33} = 75$ pm/V)を行った。

c. ゾルゲルシリカ下部クラッドの導電率増加によるポーリング効率増加

スロット導波路光変調器におけるゾルゲルシリカ下部クラッドの導電率増加のためゾルゲルシリカ下部クラッドの加熱処理時間を短縮した後、作製した光変調器の半波長電圧を測定した。膜厚0.6μmのE0ポリマを用いてポーリング処理を行った際には、ゾルゲルシリカに対する加熱時間を1.5hから0.75hへ減少した場合半波長電圧は加熱短縮時間と線形減少を示した。これにより半波長電圧減少のためにはゾルゲルシリカの導電率減少が最も有効であることをデバイス実

験により実証した。本実験においては E0 係数の高い高性能 E0 ポリマ (SEO100) を使用することなく E0 係数 78pm/V の E0 ポリマを使用した場合においても他の半導体光変調器に比べて低い半波長電圧を示すことができた ($V_{\pi}L$ 積 2.0 Vcm)。(図 2 参照)

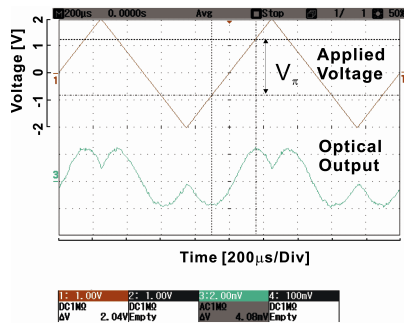


図 2 E0 ポリマ/TiO₂ 垂直スロット導波路光変調器に対する印加電圧信号 (上部) 及び光出力信号 (下部) により求めた半波長電圧。横軸：時間、縦軸：出力。V_π = 2.0 V

(2) E0 ポリマのポーリング効率最適化

TiO₂ 及びゾルゲルシリカ上に積層した E0 ポリマのポーリング効率を確かめるため、0.3 μm 膜厚の高性能 E0 ポリマ SEO100 及び 0.1 μm 膜厚の TiO₂ 層を ITO ガラス基板上に作製し E0 ポリマ/垂直閉じ込め型スロット導波路光変調器と同じデバイス環境でポーリングを試した。ポーリング実績のある Teng and Man によるエリプソメトリック法を用い E0 係数を測定した。

E0 ポリマを単独でポーリングした場合及び TiO₂ と共にポーリングした場合双方において空間電荷制限電流 (trap-free space charge limited current) の特性を示し、10V/μm 以上の電界印加は困難であった。0.38 μm 膜厚は従来のポリマ光変調器で使用してきた膜厚 1 μm に比べて膜厚が薄いためポーリングの際に絶縁破壊が頻繁に生じ高電界印加が極めて困難であった。

一方で E0 ポリマを 4μm 膜厚ゾルゲルシリカクラッド層と共にポーリングした場合、絶縁破壊が乗ずる電圧は 100V 以上であり、最

大 200V 印加(電界 530V/μm)が可能であった。したがって、ゾルゲルシリカを使用した場合のポーリング電界を 50 倍以上とすることができた。E0 係数はポーリング電界に比例するため本ゾルゲルシリカを用いたポーリング法により高い E0 係数を得ることができる。E0 ポリマをゾルゲルシリカクラッドと共にポーリングした場合に比べて絶縁破壊を生起する電圧は高いことが分かった。このことから E0 ポリマを TiO₂ 及びゾルゲルシリカクラッドと共にポーリングすることにより E0 係数を高くできることを示した。したがって、TiO₂ 層はスロット導波路として機能するだけでなくポーリング効率向上にも寄与することを示した。

ゾルゲルシリカクラッドとともにポーリングした場合、ショットキー障壁からのチャージ注入特性を示した。E0 ポリマを単独でポーリングした場合と TiO₂ と共にポーリングした際には E0 係数は 6 pm/V 以下(サンプル#1,2)であった。一方で E0 ポリマを TiO₂ 及びゾルゲルシリカ層とともにポーリングした場合、E0 は最も高い 198 pm/V を示し(サンプル#4)、E0 ポリマをゾルゲルシリカクラッドと共にポーリングした場合の E0 係数 166 pm/V(サンプル#3)より高いことが分かった。これらのサンプルとポーリング後の E0 係数測定結果を表 1 にまとめる。

表 1 E0 係数測定のためのデバイス構成及び E0 係数

Device	r ₃₃ (pm/V) @1550nm
#1 ITO/SEO100/Au	5.9
#2 ITO/TiO ₂ /SEO100/Au	3.7
#3 ITO/sol-gel silica /SEO100	166
#4 ITO/sol-gel silica /TiO ₂ /SEO100/Au	198

参考文献

[1] T. Baehr-Jones et al. *Applied Physics Letters*, 92, 163303(2008).

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8件)

- (1) Y. Enami, H. Nakamura, J. Luo, and A. K-Y. Jen, "Analysis of efficiently poled electro-optic polymer/TiO₂ vertical slot waveguide modulators", *Optics Communications*, vol. 362, pp. 77-80, (2016). (査読有り)
DOI:10.1016/j.optcom.2015.08.048
- (2) Roland Himmelhuber, Robert Norwood, Yasufumi Enami and Nasser Peyghambarian*, "Sol gel materials enabled electro optic polymer modulators", *MDPI, Sensors*, vol.15, pp. 18239-18255, (2015). (査読有り)
DOI:10.3390/s150818239
- (3) Y. Enami, Y. Jouane, J. Luo, and A. K-Y. Jen, "Enhanced conductivity of sol-gel silica cladding for efficient poling in electro-optics polymer/TiO₂ vertical slot waveguide modulators," *Optics Express*, vol. 22, pp. 30191-30199 (2014). (査読有り)
DOI:10.1364/OE.22.030191
- (4) Y. Jouane, Y-C. Chang, D. Zhnag, J. Luo, A. K-Y. Jen, and Y. Enami, "Unprecedented highest electro-optic coefficient of 226 pm/V for electro-optic polymer/TiO₂ multilayer slot waveguide modulators", *Optics Express*, vol. 22, pp. 27725-27732 (2014). (査読有り)
DOI:10.1364/OE.22.027725
- (5) Y. Enami, Y. Kayaba, J. Luo, and A. K-Y. Jen, "Mesoporous sol-gel silica cladding for hybrid TiO₂/electro-optic polymer waveguide modulators," *Optics Express*, vol. 22, pp. 16418-16423 (2014). (査読有り)
DOI:10.1364/OE.22.016418
- (6) Y. Enami, B. Yuan, M. Tanaka, J. Luo, and A. K-Y. Jen, "Electro-optic polymer/TiO₂ multilayer slot waveguide modulators", *Applied Physics Letters*, vol. 101, pp. 123509 (2012). (査読有り)
DOI: 10.1063/1.4754597

[学会発表](計28件)

国際学会招聘講演

- (1) Y. Enami, "Highly poled electro-optic polymer modulator based on TiO₂ slot layer and sol-gel silica cladding", *EMN meeting on titanium oxides*, Hawaii, USA 27th-31st of March (2016) (Invited).
- (2) Y. Enami, J. Luo, and A. K-Y. Jen, "Electro-optic polymer/TiO₂ vertical slot waveguide modulators, *2015 Collaborative Conference on 3D and Materials Research (CC3DMR)*, Busan, Korea, 15th-19th of Jun (2015) (Invited).
- (3) Y. Enami, "Electro-optic polymer/TiO₂ multilayer slot waveguide modulators for low voltage operations," *4th Annual World Congress of Advanced Materials-2015 (WCAM-2015)*, Chongqing, China 27th-29th of May (2015) (Invited).
- (4) Y. Enami, J. Luo, and A. Jen, "Electro-optic polymer/TiO₂ vertical slot waveguide modulators for optical interconnections." *World Congress of Emerging Information Technology (InfoTech-2015)*, Shenzhen, China, 18th-20th of April (2015). (Invited)

- (5) Y. Enami, J. Luo, and A. Jen, "Electro-optic polymer/TiO₂ multilayer slot waveguide modulators", *The 2014 International Conference for top and emerging material scientists*, ID:31, Zhuhai, China, 20th - 24th of July, (2014).
 - (6) Y. Enami, J. Luo, and A. Jen, "High Confinement and Efficient Poling in TiO₂/Electro-Optic Polymer/TiO₂ Multilayer Slot Waveguide Modulators", *Collaborative conference on 3D & Materials Research (3DMR)*, Jeju Korea, pp. 303 (2013) (24th to 28th of Jun, 2013). (Invited)
 - (7) Y. Enami and A. Jen, "Electro-Optic Polymer Modulators Based on Hybrid and Multilayer Slot Waveguides", *Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) Pacific Rim, ThL2-1[Invited]* Kyoto, (7.4. 2013).
 - (8) Y. Enami, "Hybrid electro-optic waveguide modulators for ultra-low power communications and interconnections", *EMN Fall meeting 2012*, Las Vegas USA, (29th Nov to 2nd Dec, 2012).
 - (9) Y. Enami, "Hybrid electro-optic polymer modulators and biosensors", *2nd International Conference on Nanotek and Expo (Nanotek-2012)*, Philadelphia PA USA (December 3-5, 2012).
 - (10) Y. Enami, A. K-Y. Jen, Hybrid electro-optic polymer/silica waveguide modulators and biophotonic sensor network based on sol-gel silica waveguides" (Invited), *BIT's 1st annual world congress of emerging InfoTech (WCEIT-2012)*, Dalian, China.
 - (11) Y. Enami, C. Zhang, J. Luo, and A. K-Y. Jen, "Electro-optic polymer/TiO₂ multilayer slot waveguides for ultra-low voltage operation" (Invited), *Collaborative conference on 3D & Materials Research (3DMR)*, Seoul Korea, pp. 80 (2012) 25th to 29th of Jun, 2012.
- 国内招聘講演
- (11) 榎波康文 「ハイブリッド導波路や新規スロット導波路構造によるポリマ光変調器の開発」 春期電子情報通信学会総合大会シンポジウム 岐阜(3.19.2013) (招聘講演)
 - (12) 榎波康文 「ハイブリッド型ゾルゲルシリカ・電気光学ポリマ変調器」 (招聘講演) 電子情報通信学会ソサイエティ大会シンポジウム 富山(9.11.2012) (招聘講演)
 - (13) 榎波康文 「ハイブリッド型ポリマ光変調器」 "第3回 デジタル信号処理による新しい光伝送技術" 電子情報通信学会光通信システム研究専門委員会講演予稿集 pp.14-17, 2012. 通信ソサイエティ, 光通信システム研究 静岡(7.27.2012) (招聘講演)
- 国際学会講演
- (14) Y. Enami, Y. Jouane, J. Luo, and A. K-Y. Jen "Electro-optic polymer/TiO₂ slot waveguide modulators and enhanced electro-optic coefficient of 260 pm/V", *Solid State Devices and Materials (SSDM) 2016*, A-2-4, (2015), Sapporo, Japan, 27-30 Sep, 2015.
 - (15) Y. Enami, Y. Jouane, J. Luo, and Alex K-Y. Jen "Electro-optic polymer/TiO₂ vertical slot waveguide modulators, *Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) Pacific Rim 2015*, T12_1035, Busa, Korea, 24-28 Aug, 2015

- (16) Y. Enami, Y. Jouane, J. Luo, and Alex K-Y. Jen “Electro-optic polymer/TiO₂ slot waveguide modulators”, *Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)2015*, Optoelectronics Technical Group, OAS Technical Group Poster Session, San Jose, CA, 10-15 May, 2015.
- (17) Y. Enami, Y. Jouane, D. Zhang, Y-C Chang, J. Luo, and Alex K-Y. Jen, “Hybrid electro-optic polymer/TiO₂ multilayer slot waveguide modulators for lower half wave voltage and electrode length product”, *Optical Society of America Annual Meeting, Frontier in Optics*, FW5B.5 (2014), Tucson, AZ, 19-23 Oct, 2014.
- (18) Y. Enami, Y. Jouane, D. Zhang, Y-C Chang, J. Luo, and Alex K-Y. Jen, “Electro-optic polymer/TiO₂ multilayer slot waveguide modulators”, *The IEEE Photonics Conference (IPC)*, ThG1.4 (2014), San Diego, CA, 12-16, Oct, 2014.
- (19) Y. Enami, Y. Jouane, D. Zhang, Y-C Chang, J. Luo, and Alex K-Y. Jen “Electro-optic polymer/TiO₂ slot waveguide modulators driven with low half-wave voltage”, *Solid State Devices and Materials (SSDM)*, PS-7-12, Tsukuba, Japan (2014), Tsukuba, Japan, 8-11 Sep, 2014.
- (20) Y. Jouane, Y-C Chang, D. Zhang, J. Luo, and Alex K-Y. Jen, and Y. Enami, “High Pockels coefficient for poled polymer in multilayer electro-optic devices”, *Solid State Devices and Materials (SSDM)*, PS-7-11, (2014), Tsukuba, Japan, 8-11 Sep, 2014.
- (21) Y. Enami, J. Luo, and Alex K-Y. Jen , “Electro-optic polymer/TiO₂ multilayer slot waveguide modulators”, Optical Society of America (OSA) Optics & Photonics Congress, *Advanced Photonics for Communications*, JT3A.23, (2014), San Diego, CA, 13-16 Jul, 2014.
- (22) Y. Enami, J. Luo, and A. Jen, “Efficient poling in TiO₂/electro-optic polymer/TiO₂ multilayer slot waveguide modulators”, *SPIE(The International Society for Optical Engineering) Photonics West, San Francisco, CA, USA, 8986-43 (2014)*, 1-6th of Feb, 2014.
- (23) Y. Enami, J. Luo, and A. Jen, “Electro-Optic Polymer/TiO₂ Multilayer Slot Waveguide Modulators for Optical Interconnections”, *Optical Society of America Annual Meeting, Frontier in Optics 2013, FTu4E.5. (2013)*, Orlando, Florida, USA, 6-10, Oct, 2013.
- (24) Y. Enami and S. Suye, “Sol-gel silica planar waveguide doped with a green fluorescent protein for biophotonic sensor network”, *Optics in Life Sciences*, Bio-optics: Design and Application, JT2A.9, Kona, Hawaii, USA, 17th of April, 2013.
- (25) Y. Enami, J. Luo, A. K-Y. Jen, “Hybrid electro-optic polymer modulators and biophotonic sensors based on sol-gel silica waveguides”. *European Optical Society Annual Meeting. Aberdeen, Scotland, UK, TOM5-5813 (2012)*.

[産業財産権]

出願状況 (計 2 件)

- (1)名称 : 「光変調器」
 発明者 : **榎波康文**
 権利者 : 高知工科大学
 種類 : 特許
 番号 : 特願 2015-004259
 出願年月日 : 2015 年 1 月 13 日
 国内外の別 : 国内
- (2)名称 : 「光変調器」
 発明者 : **榎波康文**
 権利者 : 高知工科大学
 種類 : 特許
 番号 : 特願 2012-209631
 出願年月日 : 2012 年 9 月 24 日
 国内外の別 : 国内

取得状況 (計 3 件)

- (1)名称 : 「光変調器」
 発明者 : **榎波康文**
 権利者 : 高知工科大学
 種類 : 特許
 番号 : 特願 2009 - 240219
 出願年月日 : 2009 年 10 月 19 日
 取得年月日 : 2014 年 3 月 20 日
 国内外の別 : 国内

(2)名称 : 「光導波路スイッチ」

- 発明者 : **榎波康文**
 権利者 : 高知工科大学
 種類 : 特許
 番号 : 特願 2009-013051
 出願年月日 : 2011 年 7 月 25 日
 取得年月日 : 2012 年 11 月 16 日
 国内外の別 : 国内

[その他]

<http://www.sceng.kochi-tech.ac.jp/yenami/>

6 . 研究組織

(1)研究代表者

榎波 康文 (Enami Yasufumi)

高知工科大学・大学院工学研究科システム

工学群電子・光システム工学・教授

研究者番号 : 90377474

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし