

平成22年 4月30日現在

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2007～2009

課題番号：19201025

研究課題名（和文） 高密度光集積回路実現に向けた研究

研究課題名（英文） A study for realizing high-density integrated optical circuits

研究代表者

山田 博仁（YAMADA HIROHITO）

東北大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：60443991

研究成果の概要（和文）：

僅か数 μm の曲率半径で曲げられるシリコンをコアとして用いる高屈折率差光閉じ込め導波路における光導波機構を解明し、その伝搬特性を解析し、従来のシリカ系光導波路との比較を行った。さらに、その光導波路を用いた各種光機能デバイスについて研究し、外部光学系との間の光入出力インターフェースや、光導波路基板上に LD などの発光素子を搭載する方法についても検討し、高密度光集積回路実現のための礎を築いた。

研究成果の概要（英文）：

Optical guiding mechanism in high refractive index difference (High- Δ) optical waveguides that have silicon core and that can be bent with the curvature of only several μm were studied. The propagation properties were analyzed and compared with conventional silica based waveguides. Furthermore, various functional optical devices that use the waveguides, the method of mounting light sources such as LD on the waveguide substrates and an optical input/output interface between external optical systems were studied. These achievements will be a milestone for realizing high density optical integrated circuits.

交付決定額

（金額単位：円）

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|------------|------------|------------|
| 2007年度 | 8,100,000 | 2,430,000 | 10,530,000 |
| 2008年度 | 26,800,000 | 8,040,000 | 34,840,000 |
| 2009年度 | 1,800,000 | 540,000 | 2,340,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 36,700,000 | 11,010,000 | 47,710,000 |

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：ナノ・マイクロ科学、マイクロ・ナノデバイス

キーワード：光導波路、光デバイス、光集積回路

1. 研究開始当初の背景

今国内では、ADSLやFTTHなどブロードバンドインターネットの急速な普及により、ネットワークを行き交うデータ量が急激に

増加している。データ量の増加に対応して、単にネットワーク機器を増設していただくだけでは、交換局の局舎内でネットワーク機器が多くのフロアーを占有し、消費電力も増大す

る。ネットワーク機器を小型・低消費電力化するためには、ネットワーク機器の中でも多くの電力を消費している光部品を小型化し、集積化を進めていかなければならない。

また一方では、これまで 40 年間の長きに渡ってムーアの法則に従い、1 年半で 2 倍のペースで集積度が向上してきた LSI にも、性能向上のペースに陰りが見えてきている。LSI の性能向上を持続させ、IT 社会の更なる発展を支えるためには、LSI チップ内光データ通信のような革新的技術の開発が望まれる。そのためには、LSI チップの上での光配線技術や集積化が可能な極微小光デバイスの実現が鍵となる。

2. 研究の目的

本研究では上記のような背景の下、本格的な高密度光集積回路を実現するための極微小光デバイスとその集積化技術、またそれらデバイスを自由自在に配置して柔軟に配線できるような高密度光配線技術を開発することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 超 High- Δ 光導波路における光導波機構の解明

高屈折率差光閉じ込め(超 High- Δ)光導波路における光導波機構について、理論と実験の両面から解明する。具体的には、低屈折率差近似を使わない厳密な表記での導波モードの式を導出したり、導波路の規格化周波数や群速度、実効屈折率の式についても、低屈折率差近似に基づいて構築されていた従来の教科書における光導波理論を見直すことにより、大幅な修正を行う。また、FDTD 法などの電磁界解析の手法により、超 High- Δ 光導波路の光導波の様子をシミュレーションする。

(2) Si 細線光導波路における各種パラメータの抽出

Si 細線光導波路を用いて高密度光集積回路や LSI チップ内光配線を設計する場合、様々な導波路パラメータが必要となる。それら光回路設計上の重要なパラメータを、理論計算や計算機による数値解析、さらには実際に光導波路を試作して、その効果を調べるなどして検証しながら、一つ一つ抽出していく。さらに、導波路コアのサイズと伝搬損失との関係や、導波路の曲げ半径と曲げ損失との関係などについても、理論と実験の両面から明らかにし、光配線や光回路の設計に使える形での体系的なデータという形でデータベース化する。

(3) Si 細線光導波路による各種光デバイスの設計と試作

Si 細線光導波路を用いれば、極微小の光デバイスが実現できる。例えば、光スイッチや AWG などを Si 細線光導波路で作れば、従来の石英光導波路に比べて 1/1,000 以下のサイズの素子が実現できる。本研究においては、光集積回路を構成するための各種光デバイス(具体的には、波長フィルタや光合分波器、光スイッチなど)を設計し、試作を行う。さらにその動作特性を解析する。

(4) 本格的な光集積回路実現に向けた検討

Si 細線光導波路による極微小光デバイスと、Si 細線光導波路による高密度光配線技術による本格的な光集積回路を実現するために、外部光学系との光入出力インターフェースや、LD などの発光素子を光回路上に搭載する方法についても検討する。

4. 研究成果

(1) 超 High- Δ 光導波路における光導波機構の解明

Si 細線光導波路のように、コアへの光閉じ込め効果が非常に大きな高屈折率差(超 High- Δ)光導波路における光導波機構について解明した。

Si 細線光導波路のような超 High- Δ 光導波路においては、構造分散の効果が非常に大きく、光導波路の教科書にあるような光ファイバや従来のシリカ系光導波路のような Low- Δ 光導波路には無い特異な光伝搬現象が観測された。その一例として、ブラッグ回折格子を有する光導波路が挙げられる。図 1 に示すように Si 細線光導波路コアの側壁に周期的な凹凸を設けたブラッグ反射型波長フィルタを試作し、透過スペクトルを測定した。凹凸の深さによって反射波長帯域は変化するが、その変化の仕方が、通常的光導波路とは異なり、超 High- Δ の Si 細線導波路ならではの特異な現象が観測され、電磁界計算による結果とも比較した。これは、Si 細線光導波路の大きな構造分散によるものであり、この例のように、Si 細線光導波路のような超 High- Δ の光導波路には、従来の(Low- Δ)の光導波路には無い物理が潜んでいることが分かった。

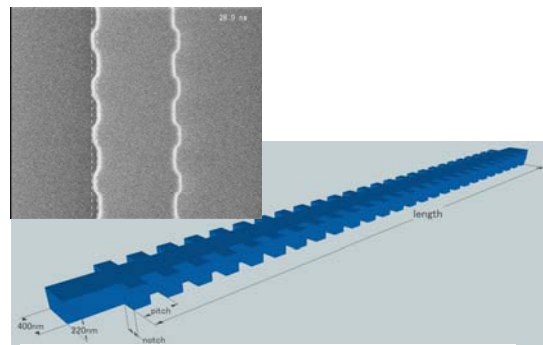


図 1 ブラッグ反射型 Si 細線導波路波長フィルタ

(2) Si 細線光導波路における各種パラメータの抽出

Si 細線光導波路を用いて高密度光集積回路や LSI チップ内光配線の設計を行うため、各種導波路パラメータの抽出を行った。

① 曲げ損失

Si 細線光導波路の曲げに伴う損失要因について、電磁界解析 (FDTD 法) に基づいた解析を行った。曲げに伴う損失要因としては主に、a) 導波路の曲げに伴う放射損失: α_1 、b) 直線導波路から曲がり導波路に入射する際の反射損失: α_2 、c) 曲り導波路の曲げ方向変化に伴う反射損失: α_3 の3つがあり、曲げ半径に対してそれらの大きさを比較したものを図 2 に示す。導波路曲げに伴う放射損失: α_1 に対して、直線導波路から曲がり導波路に入射する際の反射損失: α_2 や、曲り導波路の曲げ方向変化に伴う反射損失: α_3 が決して無視はできない大きさであることが分かった。得られた知見に基づき、Si 細線光導波路による複雑な光導波路パターンにおける伝搬損失の値を、パターンに含まれる上記損失要因の代数和として見積り、実測値 (論文 K. Yamada, et al., IEICE Trans. Electron. E87-C, 351, 2004 から引用) との比較を行った。その結果を図 3 に示すが、今回の手法によって見積もった伝搬損失の値は、実測値との良い一致を得ている。

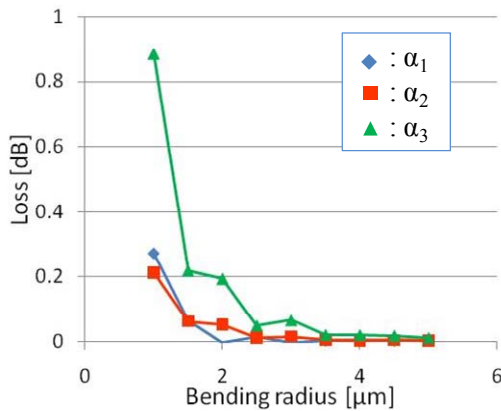


図 2 Si 細線光導波路の各種曲げ損失要因

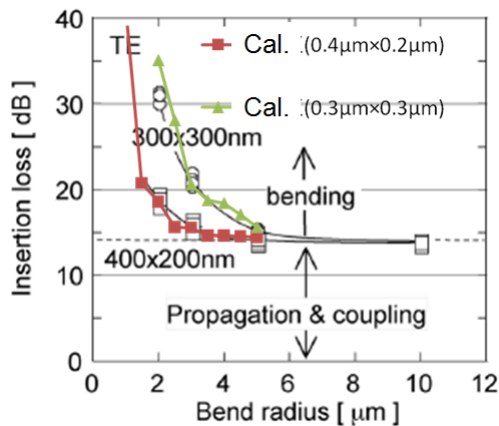


図 3 測定値との比較

② 分散特性

Si 細線光導波路の各種分散特性について計算し、各波長における単一モード条件、伝搬定数、波長分散、偏波モード分散について計算した。Si 細線導波路のような超 High- Δ 光導波路の分散特性は従来のシリカ系光導波路とは大きく異なり、強い構造分散のために導波路の実効屈折率が Si コアの屈折率よりも大きくなることもあり得ることが明らかとなった。これによって先に述べたように様々な特異な光伝搬現象が観測される。

本研究によって求めた各種導波路パラメータはデータベースとして構築され、Si 細線導波路による光集積回路設計のために利用することができる。

(3) Si 細線光導波路による熱光学光スイッチ

光スイッチは、ネットワークノードなどを構成するキーデバイスである。Si 細線導波路による熱光学光スイッチは、従来のシリカ系導波路による光スイッチの 1/1,000 のサイズで実現できることが実証されており、本格的な光集積回路実現のために有望であるため、本研究においても、Si 細線光導波路による熱光学光スイッチについて探求した。

本研究においては、市販の熱解析ソフトを用いて Si 細線光導波路による熱光学光スイッチの特性について解析し、低電力駆動と高速応答のためのヒーター構造に関する設計指針を得た。図 4 は、その一例としてのヒーター幅とスイッチング電力との関係を示す。図から分かるように、スイッチング電力はヒーターの幅を狭くすることによって劇的に低減できる。さらにスイッチング応答速度と上部および下部クラッド層厚との関係についても調べ、特に上部クラッド層厚の薄膜化によってスイッチング応答速度の大幅な向上が図れることが分かった。本研究においては実際に素子を試作し、その特性を評価したところ、計算結果との良い一致も確認した。

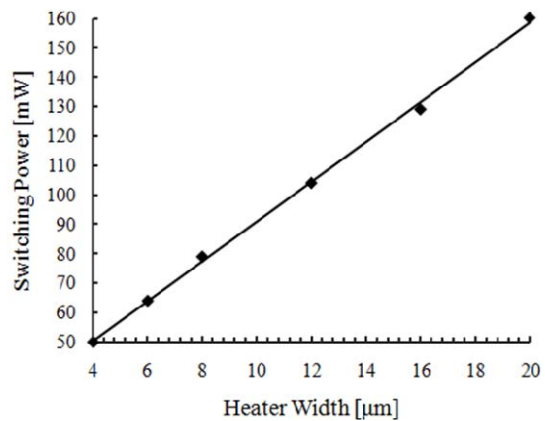
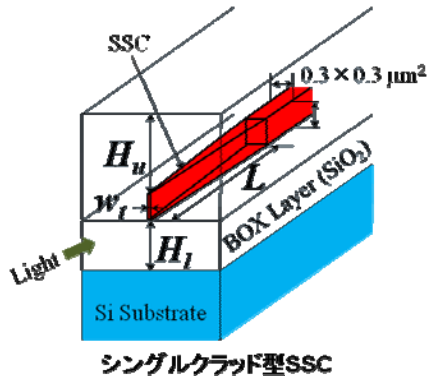


図 4 ヒーター幅とスイッチング電力との関係

(4) Si 細線光導波路と光ファイバとの低損失結合

単一モード光ファイバと Si 細線光導波路との間での光結合のためのビームスポットサイズ変換器の構造について理論解析を行った。単一モード光ファイバと Si 細線光導波路との間でのビームスポットサイズ変換器に関しては、従来からダブルコア型のもが NTT から提案され、片端 0.5dB 以下の良好な結合損失が得られているが、構造が複雑であるため製造工程も複雑となる。これに対して我々は図 5 に示すように、構造も製造工程もシンプルなシングルコア型のビームスポットサイズ変換器において、どこまで低損失化が図れるのかについて調べた。Si 細線導波路の先端を単にテーパにするだけの非常にシンプルな構造となっている。

図 6 には、先球加工を施した単一モード光ファイバと本ビームスポットサイズ変換器を有する Si 細線光導波路との間での結合損失を、基板に平行方向の光軸ズレに対して計算した結果を示す。導波路テーパ先端と先球光ファイバの先端との間隔を z_{Air} としている。計算結果より、 $\pm 1 \mu\text{m}$ の光軸のズレに対しても 3dB 以下の結合損失が実現できることが明らかとなった。



シングルコア型 SSC

図 5 シングルコア型ビームスポットサイズ変換器の構造

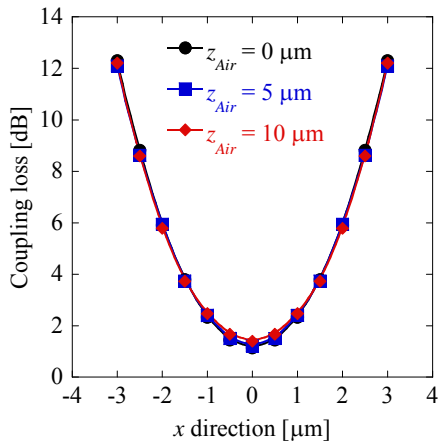


図 6 ビームスポットサイズ変換器の結合損失の計算結果

(5) Si 細線光導波路と半導体レーザとの低損失結合

Si 光導波路基板上に、光源としての半導体レーザ (LD) を搭載するための手法として、フリップチップ実装について検討した。

図 7 に示すように、位置合わせマーカを有する基板上に、同様な位置合わせマーカを有する LD チップをパッシブアライメント

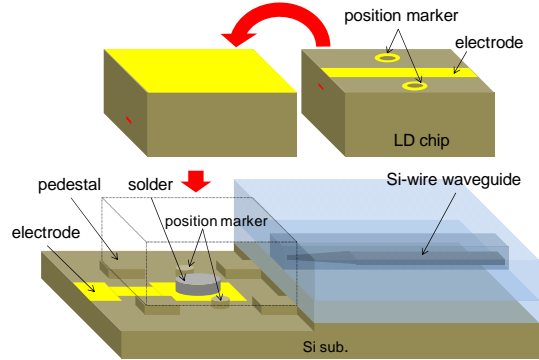


図 7 Si 光導波路基板上への LD のフリップチップ実装

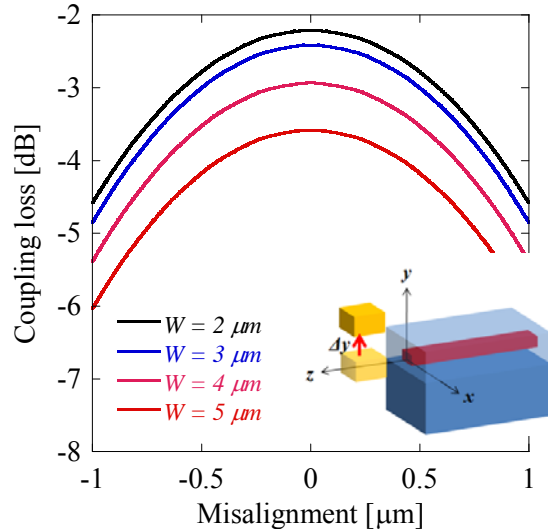
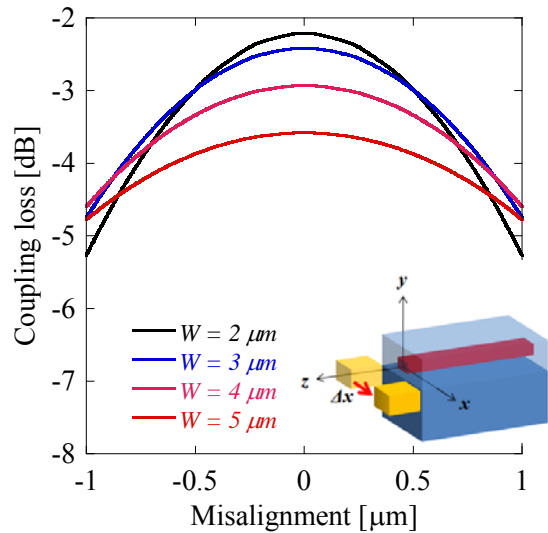


図 8 結合損失の軸ずれトレランス(計算)

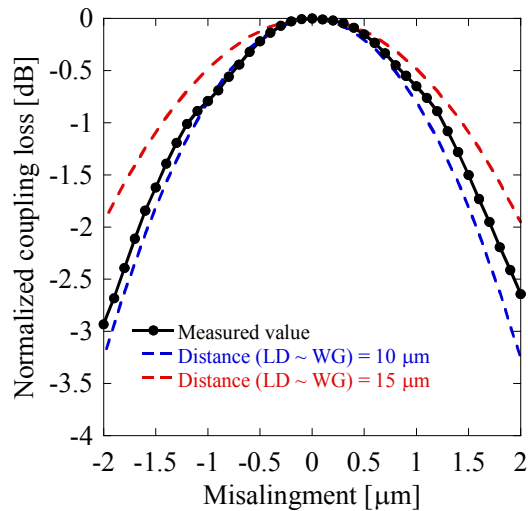


図9 結合損失の水平方向軸ずれトレランス(測定)

により実装する場合、位置合わせ精度は $\pm 0.5 \mu\text{m}$ 程度であるため、 $\pm 0.5 \mu\text{m}$ 以上の光軸ずれが許されるような光結合構造が必要となる。そこで、図に示す様な二重クラッド構造によるテーパコア型スポットサイズ変換器を用いた場合の結合損失および軸ずれトレランスについて、理論解析および実験検討を行った。

図8に、垂直方向および水平方向の光軸ずれに対する結合損失の変化を計算した結果を示す。結合損失の値として3dBを許容した場合、垂直、水平方向共に $\pm 0.5 \mu\text{m}$ 程度の軸ずれトレランスを有していることが明らかとなった。図9には実験結果を示す。測定においても $\pm 0.5 \mu\text{m}$ の光軸ずれトレランスが得られていることが分かる。

従って、二重クラッド構造によるテーパコア型スポットサイズ変換器を用いた場合、パッシブアライメントによるフリップチップ実装においても十分な結合損失および軸ずれトレランスが得られることが分かった。

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2件)

1. T. Kita and H. Yamada, Experimental and numerical analysis study of 1-D photonic crystal in Si photonic-wire waveguides, Proceedings of SPIE, 査読無し, 7601, (2010), 76011E
2. E.Y. Morales Teraoka, T. Kita, A. Tsukazaki, M. Kawasaki, Y. Ohtera and H. Yamada, ZnO channel waveguides for nonlinear optical applications, Jpn. J. Appl. Phys., 査読有り, 49, (2010), 04DG15

[学会発表] (計21件)

1. H. Yamada, Analysis of optical coupling for SOI waveguides, PIERS2010 Xi'an, 2010年3月24日、中国 西安
2. 山田 博仁, シリコンフォトニクス集積化技術の現状と展望、電子情報通信学会第3回集積光デバイスと応用技術研究会、2010年2月4日、ホテル箱根アカデミー
3. T. Kita and H. Yamada, Experimental and numerical analysis study of 1-D photonic crystal in Si photonic-wire waveguides, SPIE Photonic WEST, 2010年1月27日、San Francisco
4. H. Yamada and T. Kita, Last challenges toward practical use of Si photonic integrated circuits, 2nd Int. Conf. on Silicon Photonics, 2010年1月22日、MIT, Boston
5. M. T. Nguyen, T. Kita, Y. Ohtera, H. Yamada, Analysis of thermo-optic switch with Si photonic wire waveguide, 第12回シリコンフォトニクス研究会、2009年11月18日、東大 本郷
6. 鈴木 健、ゲン マイン タイ、阿部 政浩、北 智洋、大寺 康夫、山田 博仁、シリコン細線光導波路による波長可変レーザー用リング共振器型フィルタの解析、第12回シリコンフォトニクス研究会、2009年11月18日、東大 本郷
7. 阿部 政浩、宮村 悟史、中村 幸治、北 智洋、大寺 康夫、山田 博仁、SOI導波路基板上へのLDチップ実装方法に関する検討、信学会 光エレクトロニクス研究会(OPE)、2009年11月13日、機械振興会館
8. 外間 洋平、北 智洋、大寺 康夫、山田 博仁、シリコン細線光導波路の曲がり損失の数値解析、信学会 光エレクトロニクス研究会(OPE)、2009年11月13日、機械振興会館
9. Y. Morales, T. Kita, A. Tsukazaki, M. Kawasaki, Y. Ohtera and H. Yamada, ZnO channel waveguides for nonlinear optic applications, SSDM2009, 2009年10月9日、仙台国際ホテル
10. モラレス 芳男、北 智洋、塚崎 敦、川崎 雅司、大寺 康夫、山田 博仁、チャンネル型ZnO光導波路の作製と評価、2009年秋季第70回応用物理学会学術講演会、2009年9月11日、富山大学
11. 阿部 政浩、宮村 悟史、中村 幸治、北 智洋、大寺 康夫、山田 博仁、Si細線光導波路と半導体レーザーとの低損失結合構造に関する検討、2009年秋季第70回応用物理学会学術講演会、2009年9月10日、富山大学

12. 外間 洋平、小谷 恭子、八重樫 浩樹、北 智洋、大寺 康夫、山田 博仁、Si細線光導波路の曲げ損失の理論解析、2009年春季第56回応用物理学関係連合講演会、2009年4月1日、筑波大学
13. H. Yamada and Tao Chu、Photonic integration with Si-wire waveguides for photonic networks、PIERS2009 Beijing、2009年3月23日、北京
14. 山田 博仁、シリコン光パッシブデバイスの現状と展望、電子情報通信学会2009年総合大会、2009年3月18日、愛媛大学
15. H. Yamada and T. Kita、SOI Photonic Integration、1st Int. Conf. on Silicon Photonics、2009年1月23日、東大本郷
16. モラレス 芳男、北 智洋、大寺 康夫、山田 博仁、ワイドバンドギャップ半導体非線形光学効果光導波路、信学会 光エレクトロニクス研究会(OPE)、2008年12月19日、機械振興会館
17. M. Abe and H. Yamada、Analysis of optical coupling for Si photonic-wire waveguide、SSDM2008、2008年9月25日、筑波
18. M. T. Nguyen and H. Yamada、Analysis of thermo-optic switch with Si photonic-wire waveguide、SSDM2008、2008年9月25日、筑波
19. モラレス 芳男、北 智洋、山田 博仁、ZnO光導波路の導波特性解析、2008年秋季第69回応用物理学学会学術講演会、2008年9月5日、中部大学
20. グェン マイン タイ、山田 博仁、2008年秋季第69回応用物理学学会学術講演会、Si細線光導波路による熱光学光スイッチの解析、2008年9月2日、中部大学
21. 阿部 政浩、山田 博仁、Si細線光導波路と各種単一モード光ファイバとの結合解析、2008年秋季第69回応用物理学学会学術講演会、2008年9月2日、中部大学

〔産業財産権〕

○出願状況（計1件）

名称：複合光導波路、波長可変フィルタ、波長可変レーザ、および光集積回路

発明者：山田 博仁、山崎 裕幸

権利者：東北大学、NEC

種類：特許

番号：特願 2010-027852

出願年月日：2010年2月10日

国内外の別：国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山田 博仁 (YAMADA HIROHITO)
東北大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：60443991

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

儲 涛 (Chu Tao)
NEC ナノエレクトロニクス研究所
研究者番号：なし