

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 18 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24246019

研究課題名(和文) GaN/Siハイブリッドフォトニクス光回路プラットフォームの研究

研究課題名(英文) Study of optical circuit platform for GaN/Si hybrid-photonics

研究代表者

羽根 一博 (Hane, Kazuhiro)

東北大学・工学研究科・教授

研究者番号：50164893

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,800,000円

研究成果の概要(和文)：SiフォトニクスとGaNフォトニクスを融合した光回路のプラットフォームをマイクロマシニング技術により開発することを目的とした。GaNの能動導波路とSiの受動導波路を結合した機能性の高い光回路を実現するため、基盤技術を開発した。具体的には、GaN結晶を成長したSiウエハとSi-on-insulatorウエハを張り合わせ、GaNのマイクロリング導波路とSi直線導波路を結合した光回路を製作し、GaNの電気光学効果などによる光変調を実証した。GaN/Siハイブリッド光電子集積技術の一つの基礎を確立できた。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study was to develop the optical circuit platform by combining Si and GaN photonics on the basis of micromachining. To realize the functional optical circuits combining GaN active waveguide and Si passive waveguide, the fundamental technologies were developed. In the concrete, bonding a silicon-on-insulator wafer and a Si wafer on which GaN crystal was grown, the optical circuit coupling a GaN microring waveguide and a Si straight waveguide was fabricated, and the optical modulations using an electro-optic effect and other effect were demonstrated. One of the bases for opt-electronic hybrid integration was established.

研究分野：微小電気機械システム

キーワード：シリコンフォトニクス GaN導波路 ウエハ接合 MEMS 光集積回路 電気光学効果 マイクロリング

1. 研究開始当初の背景

年々拡大する光通信ネットワークにおいて、装置の小型化および電力消費を抑える技術の開発は緊急の課題である。また電子集積回路(LSI)の配線遅延を解決するため光インターコネクションが注目されており、電子回路への光回路の組み込みも急務の課題である。Si フォトニクスではサブミクロン幅の細線導波路などを利用して、Si 基板に集積光回路を実現できる。Si が光通信波長帯(1.5 μm)において高い屈折率(~3.5)を持つので、強い光閉じ込めにより、石英系導波路より回路面積を5~6桁縮小できる。またSi 電子回路とSi 光回路を融合することで光と電子の集積も可能となる。近年、集積回路大手企業などの参入により激しい技術革新が生じつつある。しかし、Si で光源の実現が困難であること、サブバンド間遷移デバイスができないことなど、光機能デバイスをSi 系材料で実現することは困難である。

一方 GaN 半導体は光半導体として、発光ダイオードやレーザとして広く産業化が進んだ。さらに、GaN 半導体は、Si 基板においても格子定数の緩衝層を設けることで優れた結晶が成長でき、デバイス性能もあまり劣らない。GaNの屈折率は2.4程度であるので、Si 同様に高い閉じ込めによる高密度の光回路が実現できる。加えて、GaN の非線形光学係数も LiNbO3 の半分程度と高く、またバンドギャップが 3.4eV であり、光透過域が広く(13.6 μm ~ 365nm)、波長変換など非線形光学材料として有望である。量子井戸によるサブバンド間遷移を利用した 1.5 μm 帯超高速光スイッチなど、Si では得られない光能動機能が得られる。また GaN 高移動度トランジスタは、テラヘルツ検出器としても有望である。さらに GaN 材料は機械強度が Si 同様に高いので、MEMS(マイクロマシン)などで用いられる機械構造の製作やウエハ張り合わせなどの半導体微細加工に十分耐えられる。GaN の圧電性は、マイクロアクチュエータへの応用も可能である。

このような背景のもと、Si と GaN 細線導波路の集積は、相補的であり、光通信をはじめとして多種類の光回路および電子回路の機能デバイスをオンチップ上に集積でき、省スペースおよび省エネルギーに寄与できると考えられる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、Si フォトニクスと GaN フォトニクスを融合した光回路システムおよび電子回路システムのプラットフォーム技術をマイクロマシニング技術により開発する。GaN の能動導波路と Si の受動導波路およびそれらの電子回路を有機的に結合することで、機能性の高い高集積光電子回路を実現するための基盤技術を開発する。具体的には、Si 上に GaN 結晶を成長したウエハと Si on Insulator (SOI) ウエハを張り合わせ、GaN および Si のナノ細線導波路を製作し、

GaN/Si ハイブリッド光電子集積技術の基礎を確立する。

3. 研究の方法

研究計画・方法は研究目的に従って、以下の4項目に分けられる。

- ①ハイブリッド基板の製作: Si の SOI 基板の上に GaN 層を張り合わせる技術を開発し、GaN/Si ハイブリッド導波路デバイスのためのウエハ基板を実現する。
- ②基本光回路の製作: 製作したウエハ基板を用いて、GaN 細線導波路および Si 細線導波路を混載した 1.5 μm 帯および可視域帯光回路を試作する。
- ③基本導波路の結合: Si 導波路と GaN 導波路の結合器等を MEMS 技術により製作する。
- ④電気回路への接続: Si 光検出器、GaN 発光素子を導波路に接続形成する技術を開発する。

4. 研究成果

ハイブリッド基板の製作をウエハ張り合わせ法により実施した。張り合わせ方法として SiO₂ による張り合わせ及びポリマーによる張り合わせを試みた。図1に製作プロセスを示す。SOI ウエハ上に Si 導波路を形成し、スピニングガラスをコーティングする。次に Si 基板に GaN 薄膜を MOCVD により結晶成長した GaN/Si ウエハを張り合わせる。GaN/Si ウエハの基板の Si 層を Si の深堀エッチングにより取り除く。さらに、GaN 層をエッチングにより、導波路に適した厚さにエッチングする。その後、GaN 層をエッチング加工した。

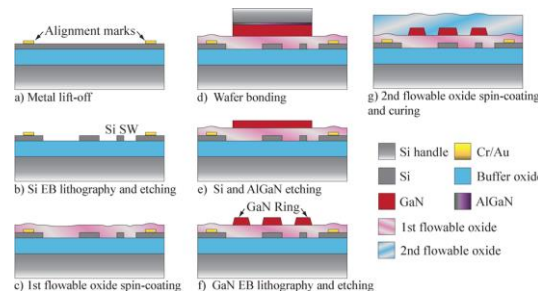


図1 SiO₂によるウエハ張り合わせ工程

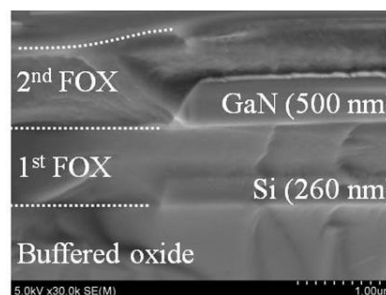


図2 SiO₂により張り合わせたウエハの断面

図2に製作した張り合わせウエハの断面構造を示す。GaN層を加工し、さらに上層をSiO₂層で保護している。第1のSiO₂層(1stFOX)により、空隙が発生せず、ウエハの張り合わせが実現できている。

図3にポリマーを用いたウエハ張り合わせ方法を示す。図1の方法と同様な2枚のウエハを用いて張り合わせを行う。接合のための

ポリマーには2種類を用いた。第1のポリマーは感光性ポリマーで、塗布、乾燥後に紫外線によりマスクを用いてパターン形成する。網目状のパターンを形成することでウエハ接合の折に問題となる気泡の混入を避ける方法を考案し、適用した。第2のポリマーで網目状パターンを埋めることで強固に接合できる。ポリマーは、容易に酸素等でドライエッチングできるので、GaN 薄膜の自立の立体構造を形成できる。

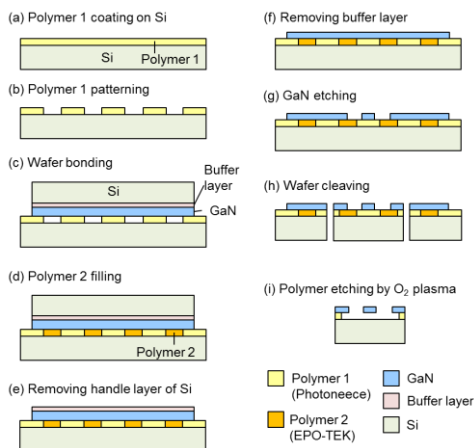


図3 ポリマーによるウエハ張り合わせ工程

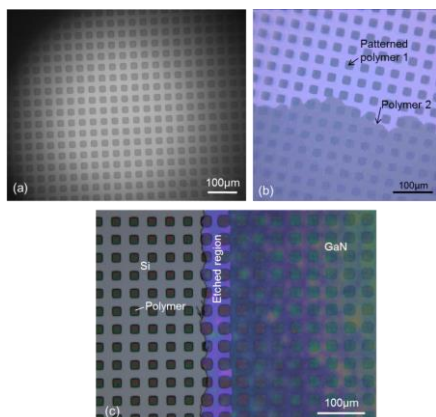


図4 ポリマー接合したウエハの写真(a)パターン形成した第1ポリマー層、(b)第2ポリマーによる第1ポリマーの隙間充填(c)ポリマーで接合されたGaN層の接合端部

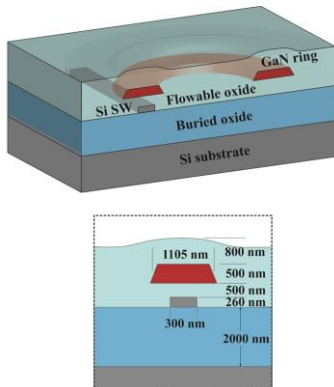


図5 GaN/Si マイクロリングの構造

次に、接合ウエハを用いて、GaN/Si ハイブリッド光デバイスとしてマイクロリングフ

ィルタを製作した。図5に構造を示す。上層のマイクロリングは張り合わせたGa_N層から形成されている。また下層のSiからSi直線導波路を形成しているため、Si導波路とGa_N導波路が結合し、フィルタとして動作する。

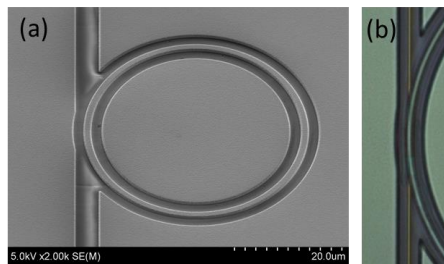


図6 製作したGaN/Si マイクロリング (a) 電子顕微鏡写真、(b) 光学顕微鏡写真

図6に製作結果を示す。図6(a)はGa_Nのマイクロリングを斜めから見た電子顕微鏡写真である。リングの形状がよく製作できている。下層のSi導波路はSiO₂層により見えない。図6(b)は光学顕微鏡像であるが、リングの下層にSi直線導波路が形成できていることが分かる。

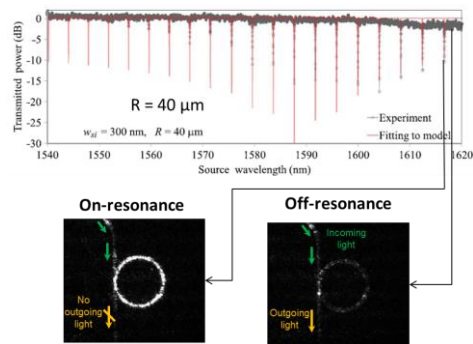


図7 GaN/Si マイクロリングの光学特性

また、製作したGaN/Siマイクロリングの光学フィルタ特性を測定した。結果を図7に示す。半径R=20μmのリングでQ値が40000、R=40μmの場合、Q=26000であった。高い共振Q値が得られ、狭帯域の導波路フィルタが実現できたことより、本提案手法の有効性が示された。

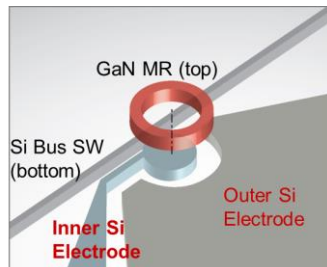


図8 GaN電気光学効果を用いたマイクロリング光変調器の構造

次に、製作したGaN/Siハイブリッドマイクロリングフィルタに、新たに電界が印加できるように電極を形成し、Ga_N半導体結晶の電気光学効果(ポッケル効果)により、電圧を印加して屈折率を変調する。フィルタ透過

帯をシフトさせ、Si 導波路を透過する光信号を変調する光変調器を実現することを目指した。

図 8 に変調器の構造を示す。GaN マイクロリングと Si バスラインに加えて、2つの電極を挿入している。リングの上下あるいは内外に電極を形成する必要があるが、本研究では、製作の容易な内外方向に形成した。内外電極を SOI ウエハの上層 Si を用いて形成する場合、金属薄膜を堆積し金属電極を形成する場合を試みた。図 8 の場合は Si の内外電極を示している。電界は水平方向を中心に斜め方向に印加される。上下方向に比べると印加強度は下がるが、製作は容易である。

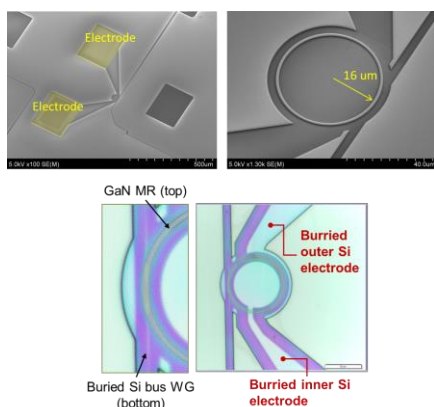


図 9 製作した電圧印加電極を備えた GaN/Si ハイブリッドマイクロリング

図 9 に製作した電極を備えた GaN/Si マイクロリングの電子顕微鏡写真および光学顕微鏡写真を示す。Si 導波路と合わせてパターンニングされた Si 電極は精度よく形成されており、さらにボンディングにより位置合わせよく、GaN マイクロリングが形成できていることがわかる。

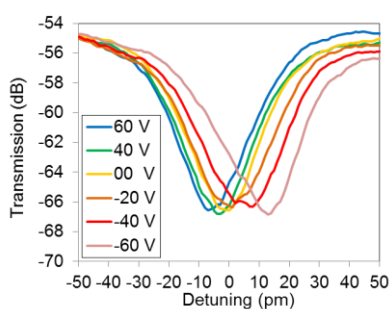


図 10 電圧印加による GaN/Si マイクロリング透過帯のシフト

図 10 は GaN マイクロリングに加える電圧をパラメータとして、相対波長に対して測定したマイクロリングの透過率である。電圧を -60V から +60V の範囲で変えて測定した。

印加電圧が負から正に変えたとき、中心周波数が負方向に次第に推移することから、電界の効果として電気光学効果（ポッケル効果）が作用していると考えられる。熱の効果である場合は、極性は現れない。本マイクロ

リングは GaN リング導波路と Si 導波路のハイブリッド結合のデバイスであるので、GaN の電気光学効果により、Si 導波路を通る光波の制御が行われている。

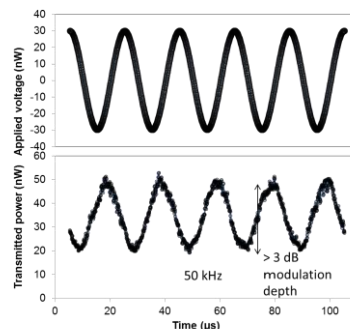


図 11 GaN/Si マイクロリングへの印加電圧と変調された透過光の時間波形

図 11 に交流電圧を GaN マイクロリングに印加した場合生じる光強度の時間依存性を示す。変調周波数は 50kHz である。印加電圧の波形も示している。正弦波状に電圧が変動するとき、正弦波的にマイクロリングの周波数シフトが生じる。波長が固定されたレーザー光を入射させているので、中心波長より少し離調させておくことで、透過波を変調できる。図 11 には対応した波形が得られている。変調に比較的大きな電圧が必要であったので、電源の制約でさらに高速の電圧印加は行えなかった。光通信に必要な高速の変調を実現するには、変調に必要な電圧を下げる必要がある。現在のデバイスでは、製作方法を容易にするため、電極が横方向であるので、電極間距離が大きい。マイクロリングに対して上下方向に電極を構成することで、電界強度を上げられると考えられる。また、上下方向は GaN 結晶の C 軸方向となるので、最適の電界印加方向となる。これらにより、低電圧で高速の変調器が実現できると考えられる。

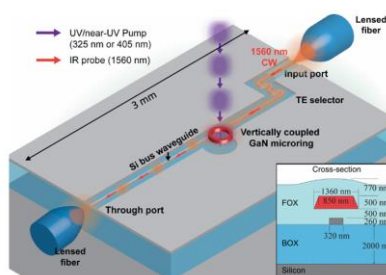


図 12 GaN/Si マイクロリングを用いた全光変調器と用いた構造断面

確立した GaN と Si のハイブリッド集積技術を用いて他のフォトニックデバイスの提案を行った。図 12 は GaN/Si ハイブリッドマイクロリングを用いた、全光学的変調器の構成を示している。光通信帯の信号光波を Si 導波路に通し、GaN マイクロリングには、GaN が吸収できる 325nm のレーザー光を照射し、Si

導波路中の光波を変調する方式である。325nm のレーザ光は GaN のバンドギャップよりエネルギーが大きいので、GaN に吸収され、ホットエレクトロンを発生させる。ホットエレクトロンは格子等と衝突緩和し、エネルギーを失う。この時発生する熱により、GaN 屈折率が変化し、マイクロリングの共鳴波長が推移し、Si 導波路の光波が変調される。光熱効果による光波の変調と考えられる。

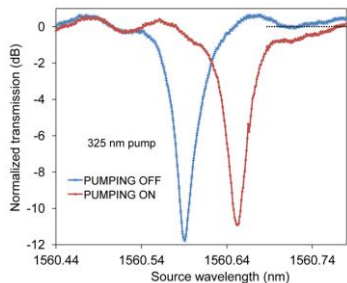


図 13 ポンプ光の照射による GaN/Si マイクロリングの透過強度の波長依存性の変化

図 13 に 325nm のポンプ光を照射した場合と、照射しない場合の GaN/Si マイクロリングの透過光強度の波長依存性を示す。325nm 波長のレーザの照射パワーは約 0.85mW であった。325nm ポンプ光の照射により、0.73pm/mW だけ共鳴波長が推移している。これにより共鳴曲線はほとんど重なりなく推移するので、十分な光変調が行えることが確認できる。

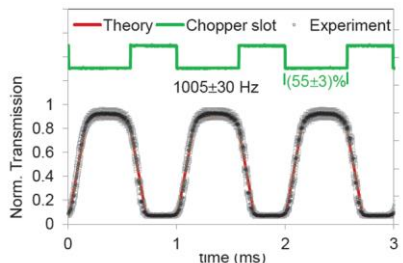
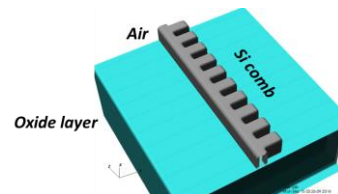


図 14 ポンプ光による透過光変調の時間波形

次にポンプ光を機械式チョッパーにより強度変調し、GaN/Si マイクロリングに照射したときに得られた透過光の時間依存性を図 14 に示す。チョッパーからの変調波形も示した。図 14 より、透過光は、チョッパーの変調に同期して、変調されていることが分かる。従って、ポンプ光による Si 導波路中の赤外光が変調されており、全光変調が実現できている。変調の周波数は約 1000Hz であり、機械式チョッパーの応答周波数に制限されている。波形のステップ応答部分より、全光変調の遮断周波数を推定できる。遮断周波数はおよそ 100kHz であった。遮断周波数は、GaN/Si マイクロリングの熱的構造に依存している。有限要素法を用いた熱的シミュレーションを行い、応答時間が説明できることを示した。本方式はデバイスの熱応用に依存しているため、電界効果を用いる方式と比較し

て、応答時間は高速化できないが、マイクロリングに必要な共鳴波長の初期調整等に利用できると考えられる。

提案した GaN 光回路と Si 光回路のハイブリッド化において問題となる重要な点として、導波路の材料定数が異なることによる、導波路伝搬速度の違いが挙げられる。導波路断面形状に制限がある場合は、ハイブリッド導波路結合のために伝搬速度の自由な調整が必要と考えられる。本問題を解決するために、Si 導波路の伝搬速度制御にフォトニック結晶導波路を用いる方法を研究した。



Si core:	Oxide:	Air:
$n_{si} = 3.48$	$n_c = 1.44$	$n_a = 1.00$

図 15 フォトニック結晶導波路の構造

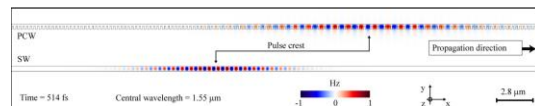


図 16 光パルスの導波路伝搬計算結果

図 15 は、用いたフォトニック結晶導波路の構造概略図である。片側の構造を周期的に空間変調した構造である。導波路体積一定のもとに、構造変調の深さ割合を変えて、特性を数値計算 (FDTD) により調べた。種々の条件で、群速度を調整できることを示すことができた。中でも、本提案構造を用いることで、同じ体積の矩形断面導波路より早い群速度を持った導波路が実現できることを初めて報告できた。群速度を遅くするスローライトの研究は多く行われているが、群速度を早くする研究は報告例がない。早い群速度を持った導波路を実現することは、計算機プロセッサの光配線における遅延問題を改善できる可能性もあると考えられる。

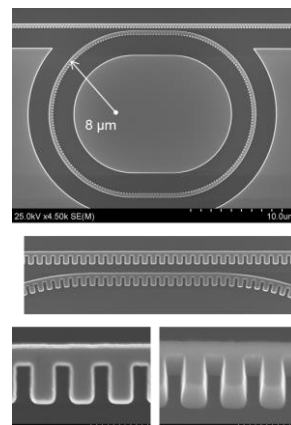


図 17 製作したフォトニック結晶導波路

図 16 に計算結果の一例を示す。左端より

入射したパルスの伝搬（電界強度）を計算した結果であるが、上は提案したフォトニック結晶導波路で下は等価体積を持つ矩形断面の導波路である。時間とともに上側のパルスが下側のパルスより早く伝搬していることが示されている。

これらの計算結果に基づいて、Si フォトニック結晶導波路と一般的な矩形断面導波路を製作し、測定を行った。図 17 に製作したマイクロリング導波路の電子顕微鏡写真を示す。サブミクロン構造の導波路であるが、精度よく実現できている。

製作した導波路の群速度をマイクロリング導波路および方向性結合器などの透過特性を測定することで評価した。結果の一例を図 18 に示す。一般的な矩形断面導波路の群速度は、導波路幅を変えても $0.25c$ (c :光速) 以下であることが測定結果および計算結果より分かる。これに対してフォトニック結晶導波路は $0.34c$ の値が得られ、同じ等価体積の矩形導波路より 67% の速度増加が得られており、等価体積矩形導波路よりも早い速度が得られている。

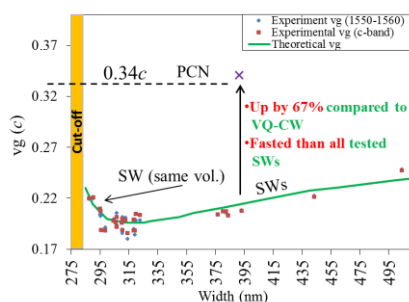


図 18 群速度の導波路幅依存性

まとめ：本研究により、GaN フォトニック導波路と Si フォトニック導波路を融合させたハイブリッドのフォトニック導波路のプラットフォームを実現できることを示すことができた。現在、普及が著しい GaN 半導体を用いることで、Si 導波路に補完的な活性導波路を容易に実現できると考えられる。以上のように、本研究では提案目的の大部分を達成できたと考えられる。

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 17 件) すべて査読あり

- 1) B. Thubthimthong, K. Hane, “All-optical guided resonance tuning in hybrid GaN/Si microring induced by non-radiatively trapped injected hot electrons,” *Opt. Exp.* 24(26) (2016) 29643-29658, 10.1364/OE.24.029643
- 2) B. Thubthimthong, K. Hane, “Group velocity enhancement for guided lightwave by the band-pulling effect in single-mode silicon comb photonic crystal wires,” *J. Opt.* 17(5) (2015), 055104(9pp), 10.1088/2040-8978/17/5/055104

- 3) B. Thubthimthong, T. Sasaki, K. Hane, “Asymmetrically and Vertically Coupled Hybrid Si/GaN Microring Resonators for On-Chip Optical Interconnects” *IEEE Photon. J.* 7(4) (2015), 7801511(12pp), 10.1109/JPHOT.2015.2464721

- 4) T. Sekiya, T. Sasaki, K. Hane, “Design, fabrication and optical characteristics of freestanding GaN waveguides on silicon substrate,” *J. Vac. Sci. Technol. B* 33(3) (2015) 031207(8pp), 10.1116/1.4917487

他 13 件

[学会発表] (計 20 件)

- 1) B. Thubthimthong, T. Sasaki, K. Hane, “Hybrid Si/GaN microring resonator integrated with Si electrode for electro-optic tuning,” *Int. Conf. Optical MEMS and Nanophotonics*, 2016, 8/1-4, Singapore
- 2) B. Thubthimthong, T. Sasaki, K. Hane, “All-optical modulation in the hybrid Si/GaN microring resonator by electro-absorptive resonance detuning,” *Int. Conf. NEMS*, 2016, 4/17-20, Japan, Sendai
- 3) B. Thubthimthong, T. Sasaki, K. Hane, “Photonic-crystal-waveguide-assisted directional couplers for hybrid Si/GaN nanophotonics,” *Int. Conf. Optical MEMS and Nanophotonics*, 2014, 8/18-21, United Kingdom, Glasgow
- 4) B. Thubthimthong, Y. Hayakawa, T. Sasaki, K. Hane, “Strong light coupling between heterogeneous nanophotonic circuits using a fast-guided-mode photonic crystal waveguide,” *The 4th Japan-China-Korea Joint Conference on MEMS/NEMS* 2013, 8/23-24, Japan, Sendai
- 5) B. Thubthimthong, K. Hane, “Fast guided mode of a photonic crystal waveguide,” *Int. Conf. Optical MEMS and Nanophotonics*, 2013, 8/18-22, Japan, Kanazawa

他 15 件

[その他]

ホームページ等

<http://www.hane.mech.tohoku.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

羽根 一博 (HANE KAZUHIRO)

東北大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：50164893

(2) 研究分担者

金森 義明 (KANAMORI YOSHIAKI)

東北大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：10333858

佐々木 敬 (SASAKI TAKASHI)

東北大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：60633394