様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９、Ｚ－１９　（共通）

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

平成 ２６ 年　 ５ 月 ２７ 日現在

機関番号：１６１０１

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2013

課題番号：２３６５６２４３

研究課題名（和文）グラフェン装荷光導波路を用いた光制御ピコ秒光スイッチの研究

研究課題名（英文）Study of picosecond optical switch controlled by optical light using graphene-loaded optical waveguides

研究代表者

後藤　信夫（Goto, Nobuo）

徳島大学・ソシオテクノサイエンス研究部・教授

研究者番号：６０１７０４６１

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　　2,700,000円、（間接経費）　　810,000円

研究成果の概要（和文）：通信波長帯においてピコ秒オーダーの高速非線形応答が期待できるグラフェン薄膜を装荷した光導波路を我々が提案した光強度制御型の波長選択光スイッチに組み込むことにより全光型の高効率高速光スイッチの実現めざした。グラフェン装荷光導波路における可飽和吸収特性を1560nmフェムト秒レーザを用い実験的に計測し、光導波路挿入損失の入射光パワー依存性を評価し光スイッチング制御に十分な10dB以上の変化量を確認した。また、挿入損失の偏光依存性を明らかにした。可飽和吸収に伴う屈折率変化を考慮した新しいスイッチ素子構成を提案し、スイッチング条件を理論解析した結果、より高効率な全光制御が可能であることを示した。

研究成果の概要（英文）：This project aims to realize a high-speed all-optical switch by efficient control with graphene-loaded waveguides in the optical communication band. The proposed switch is based on our previously proposed all-optical wavelength-selective switch controlled by Raman amplification. Optical saturable absorption in graphene can be used to control the optical signal amplitude. First, we experimentally measured optical power-dependent insertion-loss in a graphene-loaded waveguide and its dependence on optical polarization by using a femtosecond laser source. The measured result shows that the obtained 10-dB change of insertion loss can be enough large for applying to the proposed switch. Next, we theoretically analyzed optical switching controlled by saturable absorption accompanied by refractive-index change. We found that the switching efficiency can be improved by considering the accompanied refractive-index change.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学　・　電子デバイス・電子機器

キーワード：光スイッチ　非線形光学効果　グラフェン　可飽和吸収　光集積回路

１．研究開始当初の背景

　将来のグリーン・フォトニックネットワークにおいて光波の有する広帯域性を活かすためには、光パケットを光パルスにより高効率にピコ秒オーダーで制御可能な光スイッチが要求される。光制御による非線形光学効果を用いる全光スイッチでは、ピコ秒オーダーの応答の可能性を有している。現在、光学的に制御するスイッチとしては、非線形光学Kerr効果に誘起される位相シフト、半導体光増幅器(SOA)や量子ドットにおける位相シフトを用いるデバイス等が挙げられる。我々はラマン増幅により制御可能な全光スイッチを提案してきた。このデバイスでは光信号の位相ではなく光信号振幅を制御することによりスイッチングが可能となる。

　グラフェンはカーボンナノチューブを開いた構成になっており、電子素子および光素子への応用が期待され国内外で盛んに研究が行われ始めている。非線形光学特性としては通信波長帯においてカーボンナノチューブより優れた可飽和吸収特性を有しておりモードロックレーザなどへの応用が報告されている。また、グラファイトのラマンシフトに相当する G バンドのラマン散乱が $1580cm^{-1}$ に存在している。これらの非線形光学現象を我々が提案している光スイッチに適用することにより、高効率でピコ秒オーダーでの光制御型の光スイッチの実現が期待できる。

２．研究の目的

　本研究では 1.5μm 帯の通信波長帯においてピコ秒オーダーの高速非線形応答が期待できるグラフェン薄膜を装荷した光導波路を我々が独自に提案した光強度制御型の波長選択光スイッチに組み込むことにより全光型の高効率高速光スイッチの実現めざす。

　グラフェンの有する可飽和吸収特性および G バンド・ラマン誘導増幅を利用した全く新しい構成の光スイッチをめざす。

３．研究の方法

（１）単層グラフェンの垂直入射による可飽和吸収特性の実験的検討

①グラフェン薄膜は CVD により銅箔上に作製されたものを入手し、スライドガラス基板上に転写し、Z-scan 法により可飽和吸収を計測する。光源としては 1.5μm 帯のフェムト秒レーザを用いる。

②ファイバ端面にグラフェンを転写し、入力光強度を変化させることにより可飽和吸収特性を評価する。

（２）グラフェン薄膜装荷光導波路の作製と可飽和吸収による挿入損失の実験的検討

①ソーダガラスを基板とし、自作しているレーザ描画装置を用いたチャネル光導波路をパターニングしイオン交換により導波路を作製する。

②導波路上に数ミリ角のグラフェン薄膜を転写し導波路上に装荷する。

③1.5μm 帯のフェムト秒レーザを導波路端面から入射し、入射強度による挿入損失の変化を計測する。また、偏光依存性を評価する。

④波長の異なる制御光と信号光を入射し、可飽和吸収による減衰率の制御を検証する。

（３）スイッチング条件を緩和できる光回路構成の検討

①以前に提案していたスイッチ構成では使用波長範囲 400nm 以上でスイッチング可能である。スイッチングには増幅率（減衰率の低減と等価）を 5.8 倍程度制御する必要があるが、より小さい増幅率の変化でスイッチングできる回路構成を見出す。

②詳細なコンピュータシミュレーションにより特性の確認を行う。

③グラフェンの可飽和吸収では非線形効果による屈折率変化を伴うことが報告されている。減衰率と屈折率変化を用いた光制御により高効率なスイッチング条件を見出す。

（４）グラフェン装荷光導波路における誘導ラマン増幅の検討

①グラフェン装荷光導波路に、ポンピング光として 1.3μm の CW レーザおよび信号光として 1.56μm 帯の波長可変 CW レーザを入力し、信号光の増幅利得の計測を行う。

②導波路形状の違いによる誘導ラマン増幅利得の違いを調査し、最適導波路構成を見出す。

（５）光スイッチ回路デバイスの試作とスイッチングの実験的検証

①光スイッチ回路デバイスをレーザー描画装置によりパターン化し素子を作製する。

②数ミリ角のグラフェンを装荷することにより光制御の光スイッチを完成させる。

③光スイッチングの実験的検証を行う。

４．研究成果

（１）グラフェン導入導波路における可飽和吸収の測定

①ファイバ間挿入グラフェン

　光導波路に垂直にグラフェンを挿入する代わりに、ファイバコネクタ端面上に転写した単層グラフェンを用いて非線形透過率を測定した。非線形吸収を測定する実験系を図1 に示す。41.96 MHz の繰り返し率で0.4 ps 幅の1.56μm フェムト秒レーザを、光源として使用した。レーザ出力の平均電力は4.4mW である。

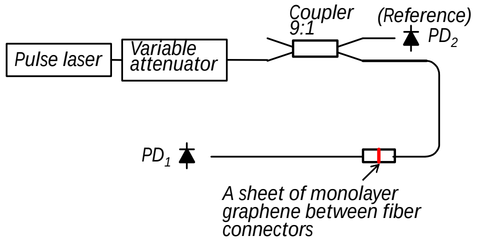


図１　ファイバ間のグラフェンを通した非線形透過率の実験系

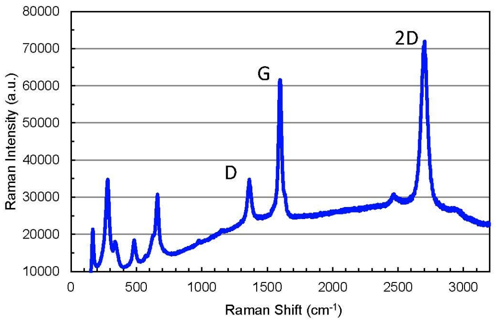


図２　ファイバ端面上のグラフェンにおけるラマンスペクトル

銅箔上にCVD 法により形成された単層グラフェン薄膜（iTRIX 社製）をファイバ端面上に転写した。ファイバ端面上に転写された単一グラフェンのラマンスペクトルを図2 に示す。このスペクトルは、ファイバコアに沿った非線形散乱を回避するために、コア断面上だけではなく、コア横におけるグラフェンにおいて測定した。単層グラフェンが良好にファイバ端面上に転写されていることが測定されたラマンピークからわかる。入射光パワーに対する透過率を、グラフェンなしの場合のファイバの透過率とともに、図3 に示す。単層グラフェンの透過率の増加は約2 %である。単層グラフェンの1 枚あたりの透過率の変化は約2.3 %であると報告されている。光パワーの増加による透過率の変化は、光スイッチに適用するのに十分ではない。入射光パワーと重ね合わせるグラフェン枚数の増加により、スイッチングのための要件を満たすと考えられる。

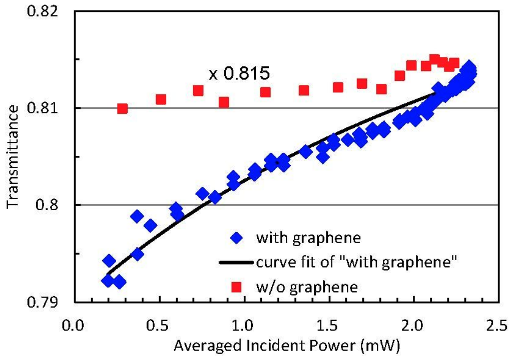
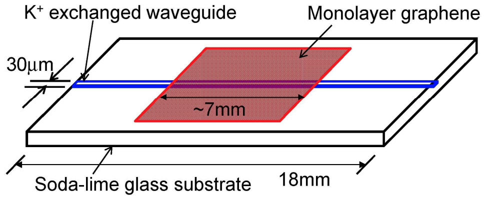


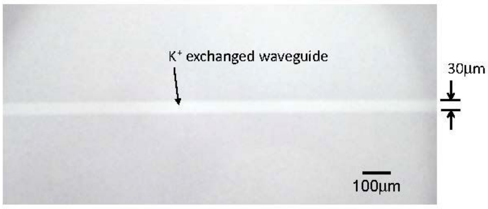
図３　ファイバ端面上グラフェンの透過率

②グラフェン装荷イオン交換導波路

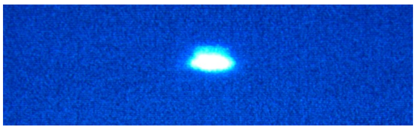
次に、単層グラフェン装荷導波路内の光可飽和吸収を測定した。光導波路は、ソーダライムガラス基板上にK+ イオン交換法により作製した。光チャネル導波路はアルミニウムマスクで30μm の開口部を介してイオン交換することにより形成している。硝酸カリウムをイオン源として使用し、イオン交換を370 ℃で4 時間行った。基板の屈折率は約1.507、K+ イオン交換法により、屈折率の増加は約1 × 10^{-2} である。導波路の両方の端面を研磨した後、単層グラフェンを、ガラス基板表面上に転写した。グラフェンシートの長さは約7 mmである。



(a)



(b)



(c)

図4　(a) グラフェン装荷光導波路構造，(b) 導波路の顕微鏡画像，(c)出力光ニアフィールドパターン

この導波路構造を、図4(a) に示す。表面の顕微鏡写真を(b) に示す。λ=1.56 μm での導波路出力光ニアフィールドパターンを図(c) に示す。図5 に、ガラス基板上に転写したグラフェン上のラマンスペクトルを示している。なお、測定されたラマンピークから単層グラフェンが良好に基板上に転写されていることがわかる。可飽和吸収を測定するための実験系を図6 に示す。1.56μm のフェムト秒レーザを、光源として使用した。偏光制御したレーザ光を×20 の対物レンズで導波路に結合させている。

図7 は、導波路の入力における平均入射パワーに対してTE 及びTM モードに対する挿入損失を示している。挿入損失は、結合損失、導波路の伝搬損失、グラフェンによる減衰損

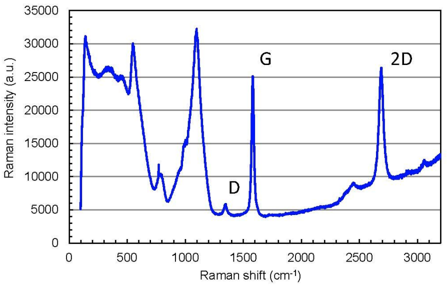


図 5　光導波路上のラマンスペクトル

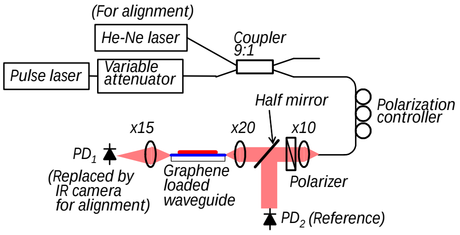


図 6　光導波路を用いた実験系

失を含んでいる。挿入損失は、入射光パワーが増大するにつれて10dB 以上低減する。これは、グラフェンの可飽和吸収特性に起因すると考えられる。得られた導波路の透過率の変調度は、光スイッチングのための要件を満たす。TM モードでの挿入損失は低い光パワーにおいて約10dB 程度であり、TE モードよりも大きくなっている。この差は、高い光出力パワーにおいては約3 dBまで低減する。

（２）屈折率変化を伴う可飽和吸収を用いるスイッチ素子構成とスイッチング条件

① 素子構成

提案する光スイッチは図8 に示すように非対称X 結合器で接続された2 つのマッハ・ツェンダ干渉計(MZI) からなる。図に示すように、2 段目のMZI の固定減衰器と固定位相シフタの位置が上側のアームか下側のアームかによりType A とType B の二つの構成を考える。従来の位相変化のみを利用する多くの光スイッチは1 段のMZI により構成されているが、本光スイッチは2 段のMZI の各アームにおける振幅と位相の制御により駆動できる。

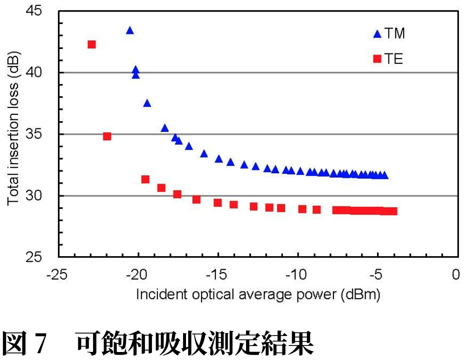
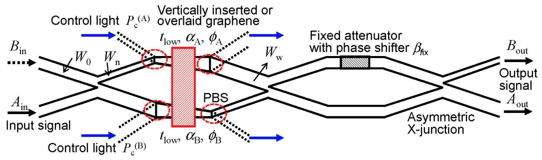
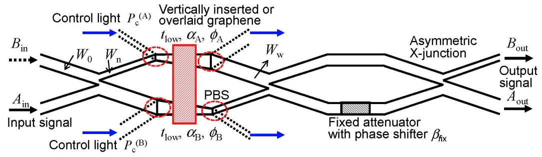


図 7　可飽和吸収測定結果



(a)TypeA



(b)TypeB

図8　可飽和吸収材料としてグラフェンを用いた2 段MZI からなる全光スイッチの構成。

1 段目のMZI における光信号は断面に垂直に挿入あるいは装荷型で導入されたグラフェンの可飽和吸収効果により制御される。制御には信号光と異なる波長あるいは直交する偏光の光を1 段目の各アームに結合させることにより行う。各アームの光電界振幅に対する透過係数は$t_{low}\alpha_i \exp(j\phi_i) = t_{low}\alpha_i$、($i$ = A または B）で与えられる。ここで、t_{low} は制御光がないときの光吸収係数、α_i は可飽和吸収による透過係数の増加、ϕ_i は可飽和吸収に伴う位相シフトを表す。2 段目のMZI における固定減衰器および固定位相シフタの透過係数は$\beta_{fix} = |\beta_{fix}| \exp(j \arg(\beta_{fix}))$ で表される。

② スイッチング条件

下側の出力ポートA にA_{out} として出力するとき、1 段目のMZI の上側のアームに光パワー$P^{(A)}_c$ の制御光を入力し、逆に、上側の出力ポートB にB_{out} として出力するとき、下側のアームに光パワー$P^{(B)}_c$ の制御光を入力するものと仮定する。したがって、可飽和吸収によるパラメータα_A' とα_B' は、上側の出力ポートにB_{out} としてスイッチする場合、$\alpha_A' = 1$、下側の出力ポートにA_{out} としてスイッチする場合$\alpha_B' = 1$ となる。Type A におけるβ_{fix} に対するスイッチング条件と、そのときの出力B_{out} は次式となる。

(i)B_{out} へのスイッチング

$$\beta_{fix} = (\alpha_B \exp(j\phi_B) - 1)/(\alpha_B \exp(j\phi_B) + 1), \quad (1)$$

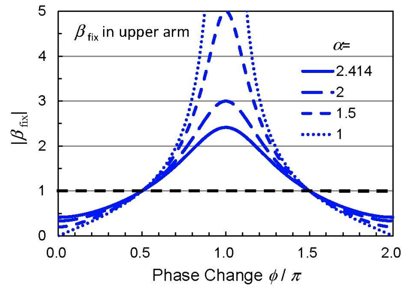
$$B_{out} = t_{low}E_{in}(1 - \alpha_B \exp(j\phi_B))/2^{1/2} \quad (2)$$

(ii)A_{out} へのスイッチング

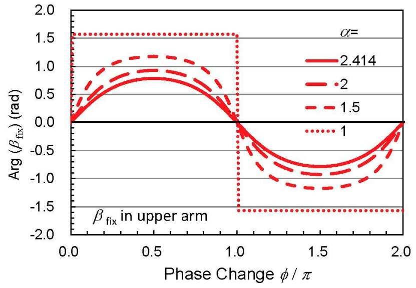
$$\beta_{fix} = (\alpha_A \exp(j\phi_A) - 1)/(\alpha_A \exp(j\phi_A) + 1), \quad (3)$$

$$A_{out} = t_{low}E_{in}(1 - \alpha_A \exp(j\phi_A))/2^{1/2} \quad (4)$$

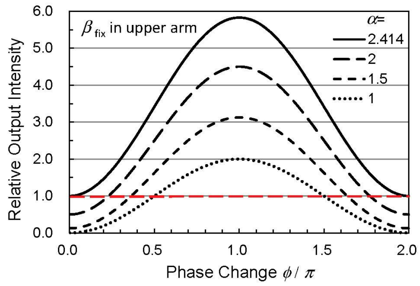
これらのスイッチング条件より、A_{out}へスイッチングするためのα_A とϕ_Aは、B_{out} へスイッチングするためのα_B とϕ_B に等しいことがわかる。よって、スイッチは固定のβ_{fix}で構成できることがわかる。同様に、Type B の場合のス



(a)



(b)



(c)

図9 TypeAにおいて、可飽和吸収による位相シフトϕ_i に対するスイッチング条件；(a) 固定減衰器の透過係数$|\beta_{\mathrm{fix}}|$、(b) 固定位相シフタに要求される位相シフト量arg(β_{fix})、および(c) スイッチされたポートにおける規格化出力光強度

イッチング条件は次式のように得られる。

(i)B_{out}へのスイッチング

$$\beta_{\mathrm{fix}} = (\alpha_B \exp(j\phi_B) + 1)/(\alpha_B \exp(j\phi_B) - 1), \quad (5)$$

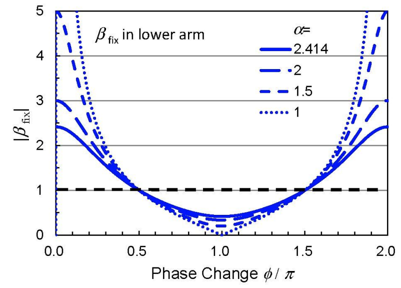
$$B_{out} = -t_{\mathrm{low}} E_{in}(1 + \alpha_B exp(j\phi_B))/2^{1/2} \quad (6)$$

(ii)A_{out}へのスイッチング

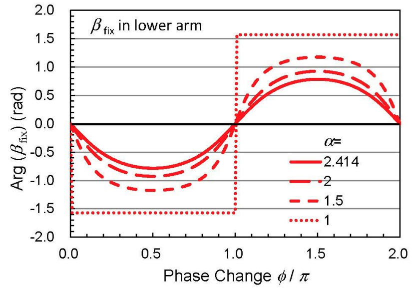
$$\beta_{\mathrm{fix}} = (\alpha_A \exp(j\phi_A) + 1)/(\alpha_A \exp(j\phi_A) - 1), \quad (7)$$

$$A_{out} = -t_{\mathrm{low}} E_{in}(1 + \alpha_A exp(j\phi_A))/2^{1/2} \quad (8)$$

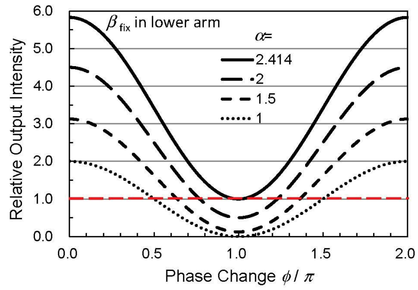
以上の式をもとに、β_{fix} に要求されるスイッチング条件と規格化出力パワー$|A_{out}/(t_{\mathrm{low}}E_{in})|^2$と$|B_{out}/(t_{\mathrm{low}}E_{in})|^2$を位相シフト量$\phi_A$ あるいはϕ_Bに対して図9 と10 に示す。ここで、パラメータとしてα_i= $1+2^{1/2}$、2.0、1.5 および1.0 の場合を示している。$|\beta_{\mathrm{fix}}|$ <=1 は減衰器のみで実現できるため、0 <=$|\phi_i|$ <=2π においては、Type A は$|\phi_i|$<=π /2 および$|\phi_i|$>=3π /2 の場合、Type B はπ /2 <=$|\phi_i|$ <=3π /2 の



(a)



(b)



(c)

図10 TypeBにおいて、可飽和吸収による位相シフトϕ_i に対するスイッチング条件；(a) 固定減衰器の透過係数$|\beta_{\mathrm{fix}}|$、(b) 固定位相シフタに要求される位相シフト量arg(β_{fix})、および(c) スイッチされたポートにおける規格化出力光強度

場合に対応する。α_i とϕ_i の任意の組み合わせに対して、$|\beta_{\mathrm{fix}}|$ とarg(β_{fix}) を適当に設定することによりスイッチングが可能であることがわかる。

（3）まとめと今後の課題

単層グラフェンを導入した光導波路における可飽和吸収特性については良好な結果が得られ、光スイッチへの適用の可能性を示すことができた。スイッチング制御に関して、グラフェンの可飽和吸収に伴う屈折率変化を考慮することにより、より効率的な全光制御が可能であることを理論解析により明らかにした。しかしながら、制御光による信号光の制御および光スイッチ素子の試作とスイッチング実験については今後の課題として検討していく必要がある。さらに、波長選択的なスイッチングへの可能性を有するグ

ラフェン装荷導波路における誘導ラマン増幅についても実験的検討についても今後の課題である。

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　2 件）

(1)M. Takahashi, W. Ueda, N. Goto, and S. Yanagiya, "Saturable Absorption by Vertically Inserted or Overlaid Monolayer Graphene in Optical Waveguide for All-Optical Switching Circuit", IEEE Photonics Journal,査読有, vol.5, no.5, pp.6602109-1 --9 (2013).
DOI: 10.1109/JPHOT.2013.2284256

(2) M. Oya, H. Kishikawa, N. Goto, and S. Yanagiya:"All-optical switch consisting of two-stage interferometers controlled by using saturable absorption of monolayer graphene", Opt. Express, 査読有, vol.20, no.24, pp.27322-27330 (2012).
DOI: 10.1364/OE.20.027322

〔学会発表〕（計　12 件）

(1) 高橋みさき、岸川博紀、後藤信夫、柳谷伸一郎：「2 段接続 MZI におけるグラフェンによる屈折率変化を伴った可飽和吸収を用いた全光スイッチの検討」電子情報通信学会光エレクトロニクス研究会、機械振興会館（東京都）OPE2014-2 (16 May 2014).

(2) 高橋みさき、上田和生子、後藤信夫、柳谷伸一郎：「全光スイッチのための単層グラフェン垂直挿入型および装荷型光導波路における可飽和吸収特性の検討」電子情報通信学会、光エレクトロニクス研究会、同志社大学（京都府）OPE2013-202 (24 Jan. 2014).

(3) 高橋みさき、上田和生子、後藤信夫、柳谷伸一郎：「単層グラフェンの可飽和吸収特性による全光スイッチングの検討」平成 25 年度電気関係学会四国支部連合大会、徳島大学（徳島県）12-33 (21 Sept. 2013).

(4) 高橋みさき、上田和生子、後藤信夫、柳谷伸一郎：「単層グラフェンの可飽和吸収特性による光波制御の検討」2013 年電子情報通信学会ソサイエティ大会、福岡工業大学（福岡県）C-3-6 (17 Sept. 2013).

(5) M. Takahashi, W. Ueda, N. Goto, and S. Yanagiya, "Saturable Absorption in Vertically Inserted and Overlaid Monolayer-Graphene in Optical Waveguide for All-Optical Switching", IEEE Photonics Conference (IPC2013), Hyatt Regency Bellevue (Seattle, USA) WB2.4 (11 Sept. 2013).

(6) M. Takahashi, W. Ueda, N. Goto, and S. Yanagiya, "Saturable Absorption in Multiple Sheets of Monolayer Graphene for Optical Switching", the 10th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim, and the 18th OptoElectronics and Communications Conference / Photonics in Switching 2013 (CLEO-PR & OECC/PS 2013), Kyoto International Conference Center (Kyoto) ThB2-1 (4 July 2013).

(7) 大屋誠啓、岸川博紀、後藤信夫、柳谷伸一郎：「単層グラフェンの可飽和吸収特性を用いた高速導波路型全光スイッチの検討」電子情報通信学会光エレクトロニクス研究会、大阪大学（大阪府）OPE2012-55 (25 Jan. 2013).

(8)大屋誠啓、岸川博紀、後藤信夫、柳谷伸一郎：「単層グラフェンの可飽和吸収特性を用いた導波路型全光スイッチ」2012 電気関係学会四国支部連合大会、四国電力総合研究所（香川県）12-15 (29 Sept. 2012).

(9) M. Oya, H. Kishikawa, N. Goto, and S. Yanagiya, "Waveguide-Type All Optical Switch Using Saturable Absorption of Graphene", 16th European Conference on Integrated Optics (ECIO2012), Melia Sitges Hotel (Barcelona, Spain) ID 9 (18 Apr. 2012).

(10) 大屋誠啓、岸川博紀、後藤信夫、柳谷伸一郎：「グラフェンによる可飽和吸収を用いた導波路型光スイッチの検討」電子情報通信学会総合大会、岡山大学（岡山県）C-3-51 (22 Mar. 2012).

(11)大屋誠啓、木宮健太、岸川博紀、後藤信夫、柳谷伸一郎：「単一制御光を用いた振幅制御による全光型波長選択スイッチの非対称性の軽減の検討」電気関係学会四国支部連合大会、阿南工業高等専門学校（徳島県）12-4 (23 Sept. 2011).

(12) M. Ohya, K. Kimiya, H. Kishikawa, N. Goto and S. Yanagiya, "Reduction of Asymmetry in All-Optical Wavelength-Selective Switch by Amplitude Control with Single Control Light", 16th Opto-Electronics and Communications Conference (OECC2011), Splendor Kaohsiung (Kaohsiung, Taiwan), 6D3_3 (6 July 2011).

６．研究組織

(1)研究代表者
後藤　信夫　（GOTO, Nobuo）
徳島大学・大学院ソシオテクノサイエンス研究部・教授
研究者番号：60170461

(2)研究分担者
柳谷　伸一郎（YANAGIYA, Shin-ichiro）
徳島大学・大学院ソシオテクノサイエンス研究部・助教
研究者番号： 40314851