

平成 30 年 6 月 13 日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2017

課題番号：16K18097

研究課題名(和文) Research on monolithically integrated autocorrelator using PIN-type silicon waveguide

研究課題名(英文) Research on monolithically integrated autocorrelator using PIN-type silicon waveguide

研究代表者

Cong Guangwei (Cong, Guangwei)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・電子光技術研究部門・主任研究員

研究者番号：20470049

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、シリコンPIN導波路を二光子吸収型光パルス検出器として干渉型オートコリレーターを実現し、1ピコ秒光パルスに対して正確なパルス幅計測に成功した。従来な製品に使用される非線形結晶と光電増倍管に比べてほぼ同様な高感度を実現し、従来なバルク二光子吸収型検出器に比べて約100倍の超高感度が得られた。さらに、非線形効果を含めて開発したシミュレータで計測の正確度やパルスパワーの依存性等の実験結果を理論的に解明した。最終に、集積型オートコリレーターの動作も確認した。本研究はオートコリレーターの小型化、低コスト化のような革新をもたらすこととオンチップ光信号計測等への幅広い応用とも期待されている。

研究成果の概要(英文)：In this study, the interferometric autocorrelation was achieved by utilizing the silicon p-i-n waveguide as the two-photon absorption optical pulse detector and correct pulse characterization was successfully demonstrated for 1-ps optical pulses. We also achieved a very high sensitivity which is almost same as that of conventional autocorrelators using nonlinear optical crystals and photomultiplier, nearly 100 times higher than that of traditional two-photon absorption type detectors. Moreover, we developed an autocorrelation simulator with nonlinear effects included, based on which the experimental results such as the pulse power dependent photocurrent and measurement accuracy were reasonably explained. Finally, we fabricated the monolithically integrated autocorrelator and confirmed its operation for sub-ps pulses. This work promises innovations of unprecedented compactness and low cost for autocorrelator products and is also expected to be applied to on-chip pulse characterization.

研究分野：工学

キーワード：オートコリレーター 超短光パルス シリコンフォトンクス フォトンクス集積回路 導波路 二光子吸収

1. 研究開始当初の背景

(1) ピコ秒またはそれ以下の超短光パルスは超高速光信号処理システム、超高速光計測、バイオイメージングのための超高速レーザー顕微鏡等の幅広い領域に应用されている。そこでは光パルスを時間領域でできるだけ正確に計測することが必要である。このような超短光パルスの波形を直接に計測することは通常困難であるため、よく用いられている手法は自己相関を利用するオートコリレーターと呼ばれる計測器でパルス波形を評価する。従来のオートコリレーター製品には、自由空間光学コンポーネント、および検出器として使用される非線形結晶と光電増倍管の組み合わせによる構成されており、大型で高価、第二高調波を発生するように位相整合を調整も困難である。近年ではシステム小型化、低コスト化を求めめるため、導波路型パルス検出器あるいは集積フォトニクス技術を基に集積オートコリレーターを目指す研究が進みつつある(引用文献 ~)。

(2) また、応用としては、生体材料計測やオンチップ信号計測等のより低パワーのパルスの測定が重要となっている。そのために集積型パルス検出器を高感度化することが要求されている。本研究では、産総研SCRにおいて性能が優れるシリコンPIN導波路を開発することで、この導波路の強い光閉じ込めにより増強された二光子吸収効果を利用して、高感度導波路型パルス検出器またはこの検出器を用いた集積型オートコリレーターを実現することを目指している。本研究はオートコリレーターの小型化、低コスト化のような革新をもたらすこととオンチップ光信号処理や計測等への幅広い応用とも期待されている。

2. 研究の目的

(1) サブマイクロメートル幅のシリコンPIN導波路により増強された二光子吸収を用いて、この導波路を超短光パルス検出器として高感度なオートコリレーター動作を実証することを目指している。さらに、シリコンフォトニクス技術を基づいた集積型オートコリレーターの動作を確認する。

(2) 実応用のため測定条件(入力パルス幅の制限、入力パワーの影響、測定正確度等)を説明し、その物理的な要因を解明する。

3. 研究の方法

(1) デバイスシミュレータ(Lumerical)でPIN導波路を設計し、二光子吸収が増強されたことを理論的に確認する。

(2) 産総研SCRシリコンフォトニクスプラットフォームを利用してトップシリコン厚220nmのSOIウエハでデバイス試作を行う。また、操作性に優れる光ファイバベースの測

定系を立ち上げ、超短光パルスの波形を自動的に測定、デバイスの特性評価をする。

(3) 非線形効果(二光子吸収効果、自由キャリアプラズマ効果等)を含めたFDTD法による超短光パルスの自己相関シミュレータを開発する。このシミュレータでの得られた結論を実験で検証する。

4. 研究成果

(1) **ここに記載された成果は論文(Opt. Express, Vol. 24, Issue 26, 2016, pp.29452-29458)で発表された。** 図1(a)で示すPINリブ導波路を設計し、Lumericalシミュレータでこの導波路のモードを計算した。図1(b)で示すようなTEモードのプロファイルを使用して導波路の有効面積を計算した結果、約 $0.1\mu\text{m}^2$ であり、光を強く光閉じ込めることができる。この面積を用いて、二光子吸収に誘導された光電流を計算し、さらに従来の厚いリブ導波路(文献)に対比したところより約66倍の光電流が予想された(図2)。この増強された二光子吸収を利用し、高感度パルス検出器が期待される。

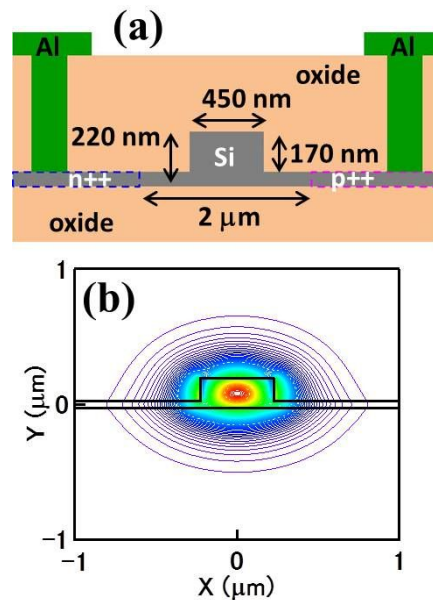


図1.(a)リブ型PIN導波路。(b)モードのプロファイル。

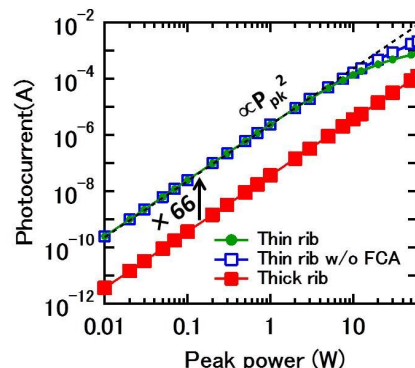


図2.二光子吸収に誘導された光電流。

(2) **ここに記載された成果は会議論文 (ECOC2017、P1.SC2.21) で報告された。**産総研 SCR の 300mm ラインのシリコンフォトニクスプラットフォームを利用して 220nm 厚のシリコンおよび 3ミクロン厚の埋め込み酸化膜を備えたシリコンフォトニクス SOI 基板にデバイスを制作した。制作した位相シフト長が 1mm のデバイスの光学顕微鏡図を図 3 に示す。光入出力は赤矢印で表示され、自己相関をしているパルスを入力すると二つのパルスの時間遅延に対して p と n コンタクトの間に流れる光電流を測定によるパルスの波形を計測することができる。このデバイスには、約 430nm 幅のチャンネル導波路を接続導波路とし、500nm 幅と 110nm スラブ厚を有する PIN 導波路に接続する。その接続部 (拡大図で示す) にはロスが非常に低い構造を使っている。

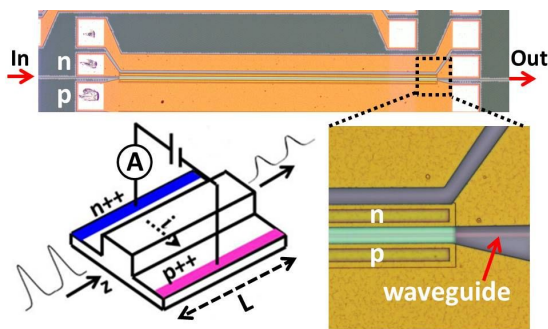


図 3 . 製作したデバイスの顕微鏡図とオートコリレーター動作の原理図

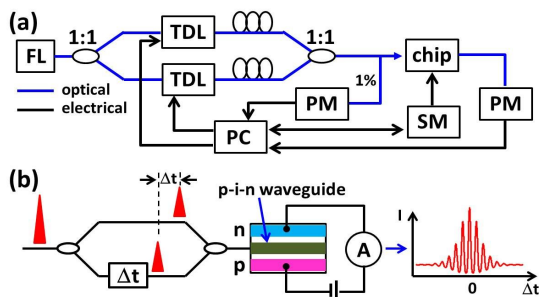


図 4 . オートコリレーター測定システムの構成 (a) と原理図 (b)

上に述べた PIN 導波路デバイスで超短光パルスのオートコリレーターの動作を検証するため、図 4 で示している測定系を構築した。ファイバレーザー (FL) から出た光パルス (約 1 ピコ幅) を分岐させて二つの高精度可変遅延線 (TDL) をそれぞれに通じて結合してから PIN 導波路のチップに入れる。図 4 (b) で示すように自己相関をしているパルスの時間差をチューニングする、同時に、電流電圧ソースメーター (SM) で PIN ダイオードに逆 10V バイアスを印加して二光子吸収に起こった光電流を測定する。入力パルスのピークパワーが 1.22 ワットと 0.04 ワットの場合 (1 ピコ秒幅である場合にはパルスエネルギーは 1.22pJ と 0.04 pJ となる) で測定し

たオートコリレーターの光電流を図 5 に示す。測定された相関幅に対し、パルス形状が sech^2 形と仮定して、パルス幅 (=相関幅/1.54) はほぼ 1 ピコ秒であり、商用オートコリレーターで測定結果に一致した。したがって、**この PIN 導波路を用いて干渉型オートコリレーター動作を実証し、1 ピコ秒光パルスに対して正確なパルス幅計測に成功した。**感度を評価するため、パルスパワーを減らして同様に測定を行い、1mm デバイスで $1 \times 10^{-8} \text{ W}^2$ レベルの非常に高い感度を得られた。この PIN 導波路検出器は、**従来な自由空間光学で組立したオートコリレーター製品に使用される非線形光学結晶と光増倍管の組み合わせ構成に比べてほぼ同等な高感度を持ち、従来なバルク二光子吸収型検出器に比べて約 100 倍の感度であった。**この成果は光通信技術に関する世界的国際会議の一つである ECOC2017 にて報告された。

さらに、最終年度には集積型オートコリレーターの設計と試作を行い、サブピコ秒 (0.1~0.4 ピコ秒) の光パルスに対し、オートコリレーターの動作もできることが確認され。現在、このデバイスの詳細測定が進められている。

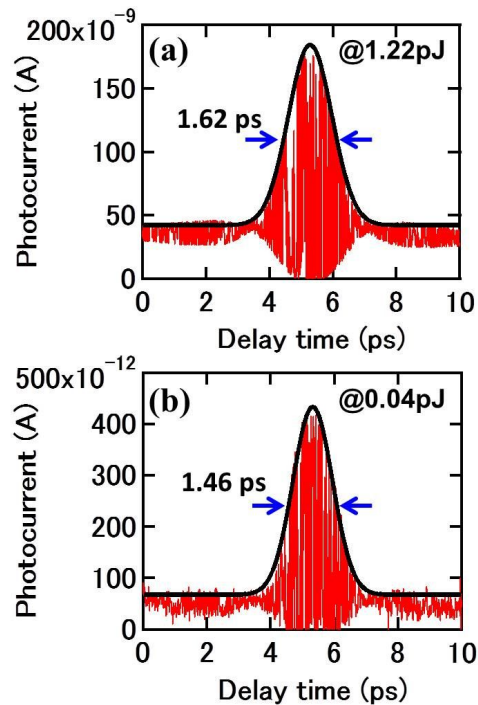


図 5 . 測定したオートコリレーターの光電流の波形。パルスエネルギーは (a) 1.22 と (b) 0.04 pJ。

(3) **ここに記載された成果は論文 (Opt. Express、Vol. 26、 Issue 12、 2018、 pp.15090-15100.) で発表された。** PIN 導波路を超短パルス検出器とする特性を解明するのは非線形効果 (二光子吸収効果、自由キャリアプラズマ効果等) を考えることが必要。そのため、そのような非線形効果を含めた FDTD 法に基づいた超短光パルスの自己相関シミュレータを開発した。シミュレーション結果は実験結果とよく一致することができ、

実験結果の物理的な要因を解明した。具体的には下記のような3点である。

(i) 1.22pJ のパルスエネルギーで測定した自己相関の波形はノイズを含めてシミュレートした波形に良く再現された(図6)。1.22pJ はファイバ中のパルスエネルギーであり、ファイバとチップの結合損を含めたPIN 導波路の入力端までのロスで 4.2dB を考えると、真の入力エネルギーは 0.5pJ になる。そこで、シミュレーションは 0.5pJ で実行した。

(ii) 図6に示されるように実験で得られた光電流値はシミュレーションとほぼ一致した。また、光電流値のパルスパワーの依存性も計算した結果を図7(a)に示す。シミュレーションには二光子吸収係数(0.9と4.5 cm/GW)を用いた。その理由は論文(Opt. Express, Vol. 26, Issue 12, 2018, pp.15090-15100.)で説明している。サブpJ以下の領域では、光電流がパルスエネルギーに対して二乗の依存があり、これは二光子吸収に誘導された光電流の特徴である。高いパルスエネルギーにおいて光電流値は二乗の依存からずれるのは、自由キャリア吸収効果が現れることが原因である。

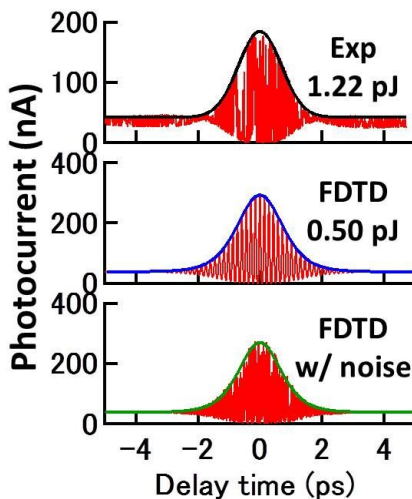


図6 . 測定した光電流の波形とシミュレートされた波形の比較。

(iii) 図7(b)に、測定したパルス幅のパルスエネルギーの依存性を示す。サブワット以下の低いピークパワー領域では正確なオートコリレーター計測に成功した。なお、パルスピークパワーが1W(1pJの1psのパルスパワー)を超えると計測エラーも増やしている。エラーが増えはじめるパワーの閾値はデバイスの長さを短くすると高くなる。導波路の中に伝搬されているパルスの形を調べたところで、二光子吸収過程で発生した自由キャリアによる屈折率の変化と吸収の時間域での非対称性を原因であることが解明された。したがって、オンチップや生体材料計測などの弱いパルスに応用される場合には正確なパルス計測ができ、強いパルスを測定する場合には減衰器でパワーをへらしてから測定すると考えている。

最後にその導波路型パルス検出器の使えるパルス幅の制限を重要な特性の一つとして検討した。導波路の群速度分散(GVD)であるため、より短いパルス幅が広がる。最小の応用できるパルス幅はGVDに決めることを考えて、GVDにより生じるパルス幅の変化を図8に示す。従来のオートコリレーター製品に使っている非線形結晶LiIO₃に対比して、長0.1mmのPIN 導波路はLiIO₃とほぼ同様な特性を持ち、数十フェムト秒までも測定が可能。長1mmの場合には約0.13ピコ秒以上のパルス幅を正確に計測できる。したがって、このデバイスはピコ秒またはサブピコ秒のパルスに応用することができる。

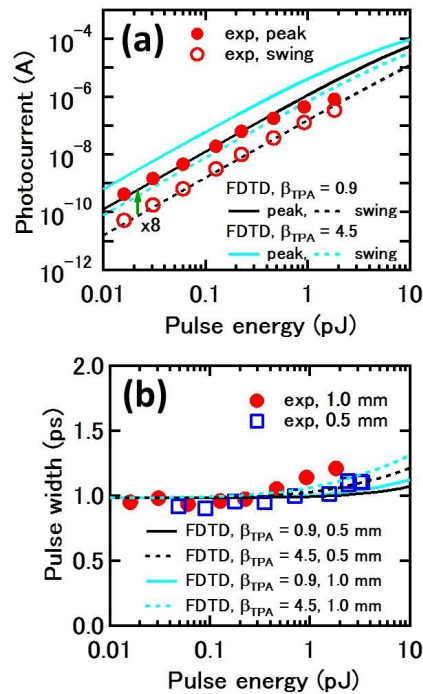


図7 .(a) 光電流のパルスエネルギーの依存性。(b) 計測されたパルス幅のパルスエネルギーの依存性。

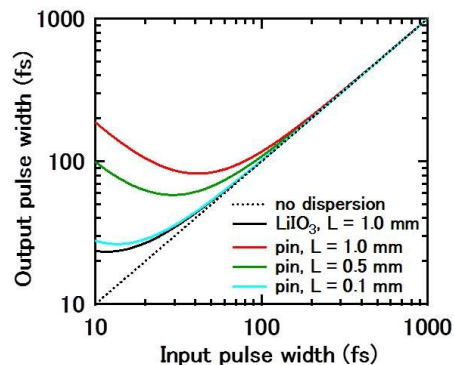


図8 . GVDによるパルス幅の変化。

<引用文献>

C. Monat, C. Grillet, M. Collins, A. Clark, J. Schroeder, C. Xiong, J. Li, L. O'Faolain, T.F. Krauss, B. J. Eggleton, D. J. Moss, Integrated optical auto-correlator based on third-harmonic generation in a

silicon photonic crystal waveguide、Nature Communications **5**、2014、3246。
T.K. Liang、H.K. Tsang、I.E. Day、J. Drake、A.P. Knights、M. Asghari、Silicon waveguide two-photon absorption detector at 1.5 μm wavelength for autocorrelation measurements、Appl. Phys. Lett **81**(7)、2003、1323-1325。

R. Hayakawa、N. Ishikura、H.C. Nguyen、T. Baba、"Two-photon-absorption photodiodes in Si photonic-crystal slow-light waveguides、Appl. Phys. Lett. **102**(3)、2013、031114。

K. Kondo、T. Baba、On-chip autocorrelator using counter-propagating slow light in a photonic crystal with two-photon absorption photodiodes、Optica **4** (9)、2017、1109-1112。

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)

Guangwei Cong、Morifumi Ohno、Yuriko Maegami、Makoto Okano、Koji Yamada、Optical autocorrelation performance of silicon wire p-i-n waveguides utilizing the enhanced two-photon absorption、**Opt. Express**、査読有、Vol. 24、Issue 26、2016、pp.29452-29458。
<https://doi.org/10.1364/OE.24.029452>
Guangwei Cong、Makoto Okano、Yuriko Maegami、Morifumi Ohno、Koji Yamada、Interferometric autocorrelation of ultrafast optical pulses in silicon sub-micrometer p-i-n waveguides、**Opt. Express**、査読有、Vol. 26、Issue 12、2018、pp.15090-15100。
<https://doi.org/10.1364/OE.26.015090>

[学会発表](計3件)

G. W. Cong、M. Ohno、Y. Maegami、M. Okano、K. Yamada、Autocorrelation Operation using Enhanced Two-photon Absorption Induced Photocurrent in Sub-micrometer Silicon PIN Waveguide、International Conference on Solid State Devices and Materials (**SSDM**)、C-1-05、2016。

Guangwei Cong、Morifumi Ohno、Yuriko Maegami、Makoto Okano、Koji Yamada、Autocorrelation measurement of ultrafast optical pulses using silicon p-i-n waveguides as two-photon absorption detector、第78回**応用物理学会**秋季学術講演会 6p-A414-16、2017。
Guangwei Cong、Yuriko Maegami、

Morifumi Ohno、Makoto Okano、Koji Yamada、High-sensitivity Autocorrelation Measurement of Ultrafast Optical Pulses Using Silicon Wire P-I-N Waveguides、43rd European Conference on Optical Communication (**ECOC**)、P1.SC2.21、2017。

[図書](計0件)

[産業財産権]

出願状況(計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況(計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

[その他]
ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究代表者

Cong Guangwei
国立研究開発法人産業技術総合研究所・工
レクトロニクス・製造領域・主任研究員
研究者番号：20470049

(2)研究分担者

()

研究者番号：

(3)連携研究者

()

研究者番号：

(4)研究協力者

山田 浩治 (Yamada, Koji)
大野 守史 (Ohno, Morifumi)