

- シリコン上に非線形光学デバイスを実現
ーハイブリッドシリコンフォトニクスへの一歩ー

- 平成19年8月17日

概要

1. 独立行政法人物質・材料研究機構(理事長:岸 輝雄)の栗村 直主任研究員、早稲田大学の中島 啓幾教授らは、シリコン上で世界最高効率の非線形光学デバイス¹⁾を実現し、強誘電体材料とのハイブリッドシリコンフォトニクスへの可能性を開いた。本研究成果の一部は、独立行政法人情報通信研究機構(理事長代行:池川 博士)の委託研究「量子制御光変復調技術」を受けて行われたものである。
2. 電子デバイス及び電子回路の能力限界を決める要素としてデータ転送スピードが重視されている。電子デバイスのバススピードは1GHz程度であるが光ファイバ通信に代表される光通信は40GHzを越えるデータ転送レートを持ち波長多重化によりTHzを越える大容量化が実現されている。シリコンを代表とする電子デバイスに光通信の高速伝送技術を持ち込むことは、電子デバイスのブレークスルーになると期待されており、シリコンフォトニクスと呼ばれている。世界最大の半導体メーカー、インテルはこれを積極的に推し進めている。
3. シリコン内ではレーザー光源を実現することが難しく、InP系の半導体レーザーをシリコン上に集積化するハイブリッドシリコンフォトニクスがインテル及びカリフォルニア大学サンタバーバラ校の共同研究で提案されている。今回は強誘電体導波路をシリコン上に実現し、シリコンで困難な非線形光学デバイスを作製して波長変換の機能を実現した。
4. 今回開発した非線形光学デバイスはニオブ酸リチウム化合物から作製しており、その電氣的極性が周期的に分極反転²⁾しているものである。シリコン上に微細分極反転構造及び接着リッジ光導波路³⁾を両立したことで、従来のシリコン内波長変換法に比べて1000倍前後の変換効率を達成できた。これらは、光通信デバイスの小型化集積化を通して量子情報通信⁴⁾用光源の小型化、低消費電力化にも貢献し、高機能シリコンフォトニクスにはずみをつける成果といえる。
5. 本研究成果は、8月末開催の国際会議Conference on Lasers and Electro-Optics(レーザー・電気光学国際会議)9月開催の応用物理学会および10月開催の国際会議Microoptics Conference(微小光学国際会議)にて発表される予定である。

研究の背景

半導体集積回路では高速化に伴いデータ転送バスの時間遅れが顕在化してきており、低誘電率の絶縁材料や低抵抗の配線金属材料が提案されてきている。しかしその配線容量は設計ルールの微細化と共に大きくなるため、 $0.2\ \mu\text{m}$ 以下の設計ルールでは光配線技術への要望が強い。このため世界最大の半導体メーカー、インテルを中心として、チップ内配線、ボード内配線への適用をめざして電子回路であるシリコン内に光バスを導入する機運が高まっている。インテルではこれをシリコンフォトニクス(SP)と呼び、精力的に開発を続けてきている。

SPにおいては、レーザー光源、光スイッチ、検出器、など個別の要素技術を蓄積する必要がある。シリコンの発光は格子振動を介在する間接遷移型であるため、原理的にレーザー発振の効率が低く困難であった。これに対し2006年にインテルとカリフォルニア大学サンタバーバラ校(UCSB)はシリコン上にInP系半導体レーザーを集積化する技術を開発し高効率レーザーの集積化に成功した。これはシリコン単体では不得意な機能をより適した他の材料で代替するハイブリッドシリコンフォトニクス(HSP)という概念に基づいており、より最適な材料をシリコン上に集積化することで高機能な光回路をめざすものである。

他方光スイッチでは、シリコン内に非対称構造を導入することで電気光学変調⁵⁾を実現し、変調周波数40GHzまで報告されている。光ファイバ通信では変調周波数100GHzを越えるニオブ酸リチウム光変調器も実現されているため、シリコン変調器においては高速化及び低電圧化が課題といわれている。

これら要素技術の著しい進展はSPの明るい将来を予感させるが、通常の光デバイスで実現されている非線形光学デバイスはシリコン上では極めて困難であった。これはシリコン自体が中心対称な構造をもつため原理的に2次の非線形光学効果をもたないことによる。このため波長変換や全光スイッチなどの高い光機能は不可能とされていたが、2003年にシリコン内のラマン効果⁶⁾を用いることで波長変換を行う手法が提案された。ここでは光通信波長帯の $1.5\ \mu\text{m}$ から $1.3\ \mu\text{m}$ への波長変換が実現されている。しかしその変換効率は0.001%と低く、実用レベルにはるかに及ばなかった。

成果の内容

今回、物質・材料研究機構と早稲田大学のグループは、シリコン基板上に初めて非線形光学デバイスを作製することに成功し、その波長変換効率が1%程度まで高められることを実証した。波長変換材料としてはマグネシウム添加ニオブ酸リチウム(Mg:LN)を用いたHSP用デバイスである。Mg:LNとシリコン単結晶を接着した後研磨して平面導波路を作製し、波長変換効率を向上させるための周期的な分極反転構造を作製した。その後コアを残してドライエッチングすることでリッジ導波路に加工を行い波長変換デバイスを作製した。波長変換材料の自発分極(磁石の自発磁化N、Sに対応する電気の+、-)を反転させたデバイスは過去15年以上にわたり研究されてきており、電極を任意のパターンに加工した後に高電圧をかける作製法は日本で初めて実現された手法である。波長変換材料に周期的に分極反転構造を施すことで、変換効率を格段に向上させることができる。

また波長変換の際に光導波路を用いると、光を狭い領域に閉じ込めて長く伝搬させることができ、漏れの少ない、高変換効率デバイスが得られる。分極反転構造と光導波路を組み合わせることで、格段の効率向上をはかることができる。

今回はこの接着リッジ導波路(ARW)をシリコン上に実現し、シリコンの透明波長領域である $1.5\mu\text{m}$ 帯で波長変換機能を実現した。 $1.5\mu\text{m}$ 帯は光通信の波長帯でもあるため廉価で信頼性の高い光部品を利用することができ、光ファイバ通信におけるフォトニックネットワークなどへの展開も視野にしている。

作製されたデバイスの全体写真を図1に示す。黒く見えるシリコン基板上に白く見える導波路構造が造り込まれている。デバイス長は12mmであり分極反転周期 $16.6\text{--}17.0\mu\text{m}$ が導波路全体に作製されている。分極反転の全体写真を腐食後顕微鏡で撮影したのが図2である。デバイス長さ全体にわたり均一な周期構造が得られており、シリコン上において分極反転型非線形光学デバイスが初めて実現された。分極反転比はほぼ理想的な0.5を全デバイス長に渡って維持している。また図3はリッジ導波路の電子顕微鏡写真を示している。ドライエッチングによりほぼ垂直に切り立ったリッジ導波路が得られており、屈折率差の大きい閉じ込めの良い導波路が得られている。

非線形光学特性の評価においては、通信帯 $1.5\mu\text{m}$ 波長の第二高調波発生を利用してデバイスの評価を行った。波長可変半導体レーザーの波長 $1.5815\mu\text{m}$ 光から波長 $0.79075\mu\text{m}$ の第二高調波を発生させその効率を測定した。変換効率の入射波長依存性が図4に示されている。絶対変換効率は1%を越え、シリコン内のラマン効果による波長変換に対して、約1000倍の高効率を得られている。本非線形光学デバイスは、波長変換のみならず光で光を制御する高速光スイッチなどへも展開できる技術であり高い潜在力をもつ。

波及効果と今後の展開

光ファイバ通信の波長帯においては、波長多重通信を用いるフォトニックネットワークにおいて、波長の異なるチャネル間の全光切り替え器や異なるバンドの一括変換などノード機能のワンチップ化が期待できる。また量子光学におけるもつれ光子対発生や量子通信における変調・復調技術への展開も可能であり、量子テレポテーション、量子コンピュータなどへの応用も期待される。

可視の緑色波長においては半導体レーザーが存在しないため波長変換で緑色レーザーを得ているが、半導体レーザーや駆動回路をシリコンプラットフォーム上に集積化することで超小型緑色波長変換レーザーが実現できる。これはレーザーディスプレイなどの応用分野で切望されている光源である。

用語解説

1) 非線形光学デバイス

光と電子の応答が線形ではない、すなわち非線形である効果を利用したデバイス。設計によってレーザー光の波長変換や光でオン、オフできる光スイッチなどの機能が実現できる。超高速の光制御や光計測に利用されている。

2) 分極反転

強誘電体の電氣的なプラスマイナスである自発分極を反転させた構造。周期的な分極反転構造を作製すると、レーザーの波長変換デバイスとして高効率動作する。周期によって発生する波長や偏光を選択することができ、設計の自由度が高い。

3) 接着リッジ光導波路

導波路とは物質の一部の屈折率を高めて作製した光の道のことであり、光ファイバはその典型例である。光を狭い領域に閉じ込めて伝搬させることができるため、漏れが少なく、分極反転と組み合わせると高い波長変換効率が得られる。光導波路のない場合に比べて、100-10000倍の効率を得られる。

特に接着リッジ型導波路では、基板の上下方向および導波路の左右方向に段差状に屈折率が変化するため導波路からの漏れ光が少なく閉じ込めの強い導波路ができる。

4) 量子情報通信

光子や電子などは、単一光子や単一電子の世界では、粒子としての性質と波としての性質を併せ持つ量子としてとらえられる。量子を通信や演算に利用する情報処理分野を量子情報処理と呼び、量子の示す不確定性原理や、重ね合わせの原理を用いることで、量子暗号通信や量子コンピュータを実現する。量子情報通信は究極的な安全性が保証されることで知られている。

5) 電気光学変調

外部からの電界によって屈折率を変化させる現象。導波路に電界を印加すると屈折率変化を通して光の位相(進み具合)をかえることができる。電界による光のオン、オフに利用されている。

6) ラマン効果

ラマン博士が発見した格子振動や分子振動を介して散乱された光のエネルギーが変化する現象。波長変換にも適用できる。

<広報 問合せ先>

〒305-0047 茨城県つくば市千現1-2-1

独立行政法人物質・材料研究機構

広報室 TEL:029-859-2026 FAX:029-859-2017

〒184-8795 東京都小金井市貫井北町4-2-1

独立行政法人情報通信研究機構

総合企画部広報室 TEL:042-327-6923 FAX:042-327-7587

委託研究グループ TEL:042-327-6011 FAX:042-327-5604

<研究内容に関する 問い合わせ先>

独立行政法人物質・材料研究機構

光材料センター

主任研究員 栗村 直(くりむら すなお)

TEL:029-860-4365(ダイヤルイン)、029-860-4692(オフィス)

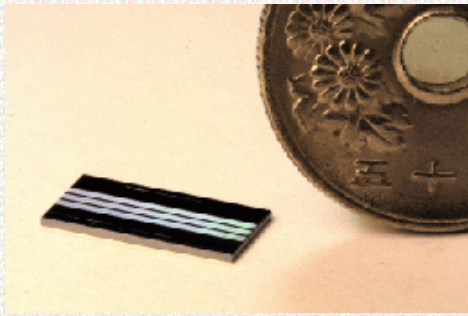


図1 シリコン上非線形光学デバイス：
黒く見えるシリコン基板の上に白く見える強誘電体導波路が作製され波長変換機能が実現されている。

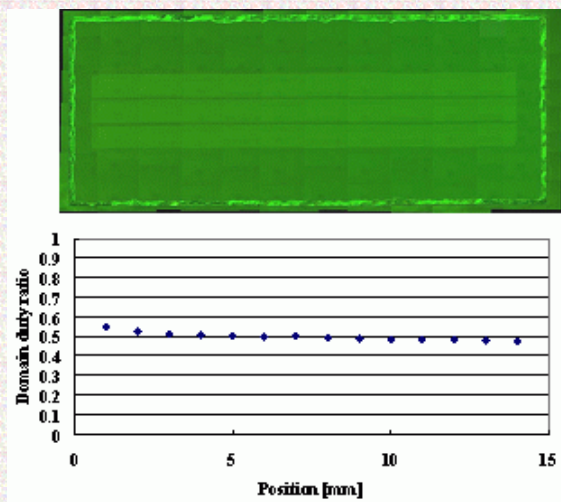


図2 周期分極反転構造の光学顕微鏡写真：
腐食後分極反転構造を観察している。分極反転比としてほぼ理想的な0.5がデバイス全体で得られている。

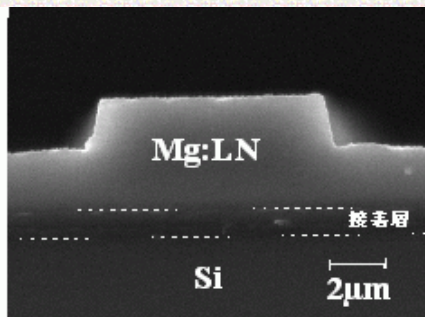


図3 リッジ導波路の電子顕微鏡写真：
ドライエッチングにより垂直に切り立ったリッジ構造が得られている。

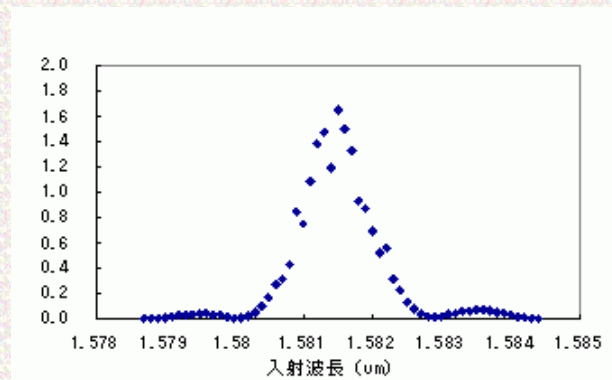


図4 波長変換効率の波長依存性：
第二高調波発生の変換効率で1%を超える値を達成できた。