# シリコンの非線形光学効果とその応用

山田　浩治・福 田　浩・土 澤　泰
渡辺　俊文・篠島　弘幸・板橋　聖一

## Applications of Nonlinear Optical Effects in Silicon

Koji YAMADA, Hiroshi FUKUDA, Tai TSUCHIZAWA, Toshifumi WATANABE, Hiroyuki SHINOJIMA and Sei-ichi ITABASHI

Enhancement of optical nonlinear effects in silicon photonic wire waveguides is discussed. Using this enhancement, two types of efficient nonlinear optical functions are demonstrated. One is a wavelength conversion based on a four-wave mixing effect. Internal conversion efficiency was around −11 dB when a CW-operated 160-mW pump was applied. Another is an all-optical modulation based on a two-photon absorption effect. Modulation depth was about 50% when a pump power was 300 mW. Performances of these functions were degraded by the free-carrier absorption effect. To eliminate this problem, two practical methods were proposed: carrier extraction using PIN structures and recombination enhancement using lattice defects.

**Key words:** nonlinear optics, silicon, waveguide, four wave mixing, two photon absorption, free carrier absorption

近年，シリコンCMOS電子回路の製造プロセスを用いて，高機能光デバイスをシリコンで構築するシリコンフォトニクスが注目されつつある．特に，サブミクロンサイズのコア断面をもつシリコン微小光導波路（シリコン細線導波路）を用いた光デバイスは超小型であり，また電子デバイスとのモノリシック集積が可能であるため，超小型で高機能な光電融合システムのプラットフォームとして期待されている[1−3]．シリコン光導波路を用いた光分岐[4]や波長フィルター[5,6]のようなパッシブデバイス，あるいは光スイッチ[7,8]，減衰器[9]，高速変調器[10,11]のようなダイナミックデバイスはすでに実現されつつあり，今後は発光，増幅，波長変換などのアクティブデバイスの実現が求められている．

シリコンは間接遷移半導体であるため，バンド間遷移を用いたアクティブ機能の実現は難しく，光非線形効果を利用したアクティブデバイスに期待がもたれている．特に，近年では，微小コアによる光パワー密度の増大を通じた光非線形効果の発生効率向上を期待して，シリコン細線導波路を用いた非線形光デバイスの研究が盛んになりつつある．

そこで本稿では，おもにシリコン細線導波路を媒体にしたさまざまな光非線形現象を紹介し，その実用デバイスへの応用にむけた課題，そしてその解決方法などについて述べる．

## 1.　光非線形媒体としてのシリコン細線導波路

### 1.1　光非線形材料としてのシリコン

シリコンは一般に光非線形効果が弱いといわれており，非線形光学の分野ではこれまでほとんど利用されてこなかった．例えば，二次の光非線形現象による波長変換などに利用されるリチウムニオブ酸結晶は，結晶の異方性などに起因した大きな二次の光非線形性を示すが，結晶対称性のよいシリコンでは原理的に二次の光非線形性は発現しない．アモルファスのように格子欠陥が存在する場合[12]，あるいは強い応力が与えられた場合[13]などは対称性が乱れ，若干の二次の光非線形性が生じる．しかしながら，前者は

NTTマイクロシステムインテグレーション研究所（〒243-0198 厚木市森の里若宮3-1）　E-mail: kyamada@aecl.ntt.co.jp

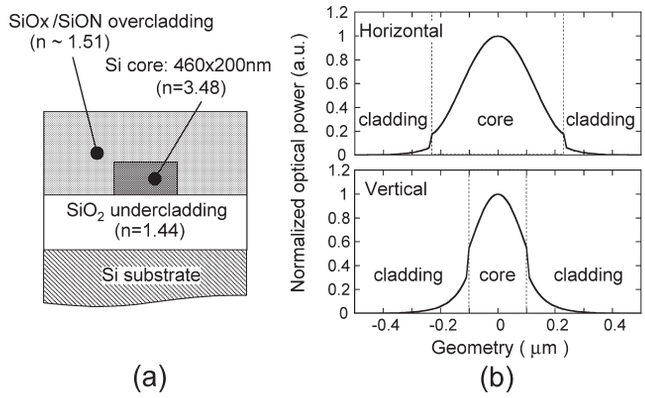


図1 (a) シリコン細線導波路の構造と，(b) 導波路断面における光パワー分布．

欠陥による吸収と散乱による損失が課題であり，後者はごく最近現象が見いだされた段階で，現状ではまだ実用的ではない．

そこで，シリコンでは結晶性にかかわらず存在可能な三次の光非線形現象を利用せざるを得ないのであるが，これにしても光非線形専用材料に比べると非常に弱い．例えば，InGaAs/InAlGaAs 多層量子井戸を用いた光非線形材料では非線形屈折率 $n_2$ は $\sim 10^{-13}$ m$^2$/W であるが[14]，シリコンでは$\sim 10^{-17}$ m$^2$/W である[15,16]．

### 1.2 光非線形媒体としてのシリコン細線導波路

以上のように，シリコンは光非線形材料としては効率のよいものではないが，実は非線形屈折率が $n_2 = 10^{-20} \sim 10^{-19}$ m$^2$/W とシリコンより 2 桁小さい石英系光ファイバーでも[17]，通常の光通信に利用される程度の光パワーで通信品質に影響を与えるほどの光非線形効果が発現する．これは，石英系光ファイバーが低損失で相互作用長が長いこと，および光が直径 9 $\mu$m ほどの小さなファイバーコア内に光を閉じ込められ，パワー密度が高くなっていることに起因する．

そこで，シリコンを導波路化し，長い相互作用長と高パワー密度を実現できれば，有意な光非線形性の発現が期待できる．特にコア径が数百 nm と小さなシリコン細線導波路を用いれば，非常に高いパワー密度を得ることができ，著しい光非線形効果の発現促進が期待される．

シリコン細線導波路の構造を図 1 (a) に示す．この導波路はシリコンをコアとし，二酸化シリコン ($SiO_2$) あるいはそれに光学的に等価な材料をクラッドに用いたチャネル光導波路である[1,2]．コアとクラッドとの比屈折率差は $\Delta \sim 0.4$ と石英系の光ファイバーや導波路に比べ数十倍も大きい．すなわち屈折率差による閉じ込め効果が非常に強く，波長 1.55 $\mu$m 近傍の通信用赤外線における導波路コアサイズは 400×200 nm 程度と非常に小さい．図 1 (b) にコアサイズ 460×200 nm の導波路における光強度分布を示すが，光パワーの多くはシリコンコア内に閉じ込められていることがわかる．有効モードフィールド面積は $A_{\mathrm{eff}} = 0.04\ \mu\mathrm{m}^2$ 程度で，通常の光ファイバーの 1000 分の 1 以下である．この微小断面に対し，通信用デバイスで CW 光が容易に得られる 100 mW 程度の光パワーを導入すると，250 MW/cm$^2$ の光パワー密度が得られ，上述の $n_2$ の値を考慮すると，$2.5 \times 10^{-5}$ 程度の屈折率変化が期待される．

非線形光デバイスに必要な相互作用長の長さの目安として，マッハ・ツェンダー干渉計などの単純な干渉デバイスの動作に必要な長さ，すなわち上記非線形屈折率変化により半波長分の位相差が生成される導波路長を算出すると，1.55 $\mu$m 帯の光に対して 3 cm 程度となる．シリコン細線導波路では 2 dB/cm 以下の伝搬損失が得られるようになりつつあり[18]，cm オーダーの相互作用長はすでに実現可能である．

100 mW 級の CW ポンプ光の効率的な導入や，実用的なデバイス挿入損失の実現には，モードフィールド面積で 1000 倍もの違いのある光ファイバーとシリコン細線とが低損失で接続されねばならないが，この問題は近年開発された結合効率 0.5 dB 程度の低損失スポットサイズ変換[2,19]により解決された．

## 2. シリコン細線導波路における光非線形現象の応用

これまでシリコン細線導波路を用い，さまざまな光非線形現象やそれを利用したアクティブ光機能の研究がなされてきた．例えば，自己位相変調[20]，相互位相変調[21]，四波混合現象を利用した波長変換[16,22]やパラメトリック増幅[23]，二光子吸収現象を利用した直接光変調[21,24]などがある．また，シリコン細線導波路よりも大きなコア径のリブ導波路ではあるが，誘導ラマン散乱を利用したシリコンラマンレーザーは，シリコンベースで唯一発光したレーザーとして有名である[25]．ラマン散乱は，入射されたポンプ光が光学フォノンとの非弾性散乱を通じ，フォノン周波数分だけずれた周波数の光に変換される現象である．この低周波数側の散乱光に対して光導波路共振器を構築し，誘導放出させることによりレーザーを実現しているが，原理的には四波混合現象と同様な波長変換を用いたデバイスに近い．

本稿では，これらの光非線形現象のうち，四波混合現象による波長変換，および二光子吸収現象を利用した直接光変調について説明する．さらに，これらの研究の過程から

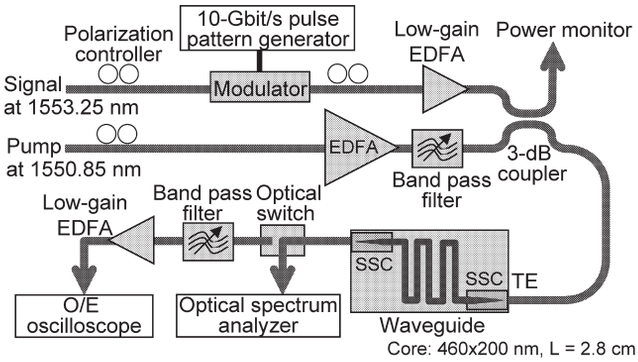


図2　四波混合現象を用いた波長変換の実験系．

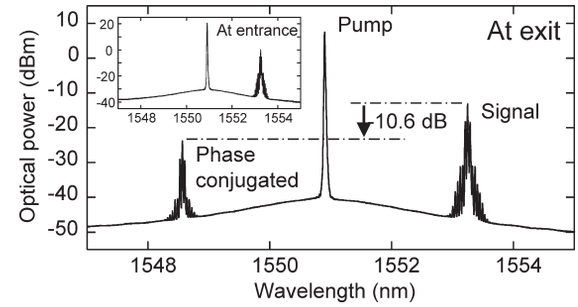


図3　波長変換の実験における導波路入出力のパワースペクトル．

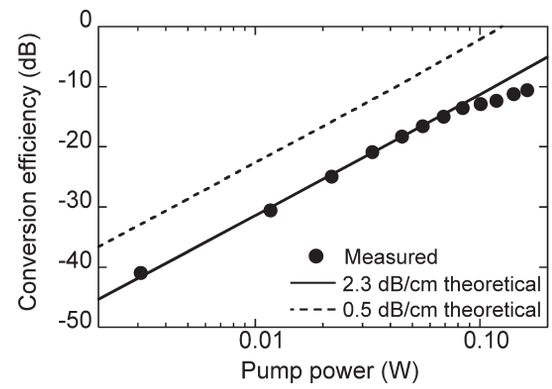


図4　内部変換効率のポンプパワー依存性．

明らかになった，シリコンベースの光非線形デバイスの実用化にむけた問題点とその解決方法について述べる．

### 2.1　四波混合現象を利用した波長変換

四波混合現象を利用した波長変換は，強力なポンプ光と，それとは異なる波長の信号光を1本の導波路に導入し，これらの相互作用により，新たな波長の光を生み出すものである[16,22]．図2に波長変換の実験系を示す．まず，レーザーダイオードからの周波数 $\nu_1=193.31$ THz（波長 $\lambda_1=1550.85$ nm）の光をエルビウム添加ファイバーアンプ（EDFA）により300 mW程度に増幅してポンプ光とし，また周波数 $\nu_2=193.01$ THz（$\lambda_2=1553.25$ nm）を10 Gbit/s周期パターンで変調して信号光とした．これら2種の光を3 dBカップラーで合成し，スポットサイズ変換構造付きシリコン細線導波路に入力した．導波路の長さは2.8 cm，伝搬損失は2.3 dB/cm，導波路入口でのポンプパワーは160 mW-CW程度であった．

光導波路入出力のパワースペクトルを図3に示すが，入力ではポンプ光と信号光のみが存在する．これに対し，導波路出口では新たなピークがポンプ光より短波側に出現した．このピークの周波数は $\nu_3=2\nu_1-\nu_2$ の位相共役条件を満たしており，すなわち四波混合現象により発生した光であることがわかる．また，信号光よりも長波側にもうひとつの位相共役条件である $\nu_4=2\nu_2-\nu_1$ のピークが存在するが，本図では省略している．

この位相共役光のピークは信号光と同様に10 Gbit/s変調に相当するサイドバンドをもっており，まさに信号光がポンプ光と相互作用し波長変換されて出てきたものであることを示している．信号光に対する位相共役光（＝変換光）の割合を内部変換効率 $\eta$ と定義すると，$\eta=-10.6$ dBであった[22]．また，10 Gbit/s，NRZの擬似ランダム信号（PRBS）を信号光として適用した場合，変換光は完全に開いたアイパターンを示し，この波長変換がすでに実用的な変換効率をもっていることが判明している．ここで得られた内部変換効率は，擬似位相整合型リチウムニオブ酸（QPM-LN）デバイスにおいてほんの数年前に実現されていた値に匹敵する[26]．波長変換が可能な帯域（−3 dB）は約20 nmであるが，この値はこの導波路系における位相整合により制限されている[16]．

図4にポンプパワーと内部変換効率の関係を示す．実線は実測のシリコンの非線形屈折率 $n_2=9\times10^{-18}$ m²/W[16]と実験で用いた導波路の断面形状や伝搬損失を考慮して計算した変換効率の理論値であるが，ポンプパワーが100 mW以下の場合は理論と実験が非常によく一致する．しかしながら，ポンプパワーが100 mWを超えると変換効率に飽和が観測された．この飽和は，ポンプ光の二光子吸収により発生した自由キャリヤーの影響であることが知られている[22,27]．自由キャリヤーは光を吸収するため，実効的な相互作用長が短くなり，光非線形現象の発生効率が低下するのである．

伝搬損失を低減して相互作用長を伸ばすことができれば，より高効率な波長変換が可能である．図4中の点線は，伝搬損失を0.5 dB/cmとした場合の変換効率の計算値である．この図より，自由キャリヤー吸収の影響がまだ

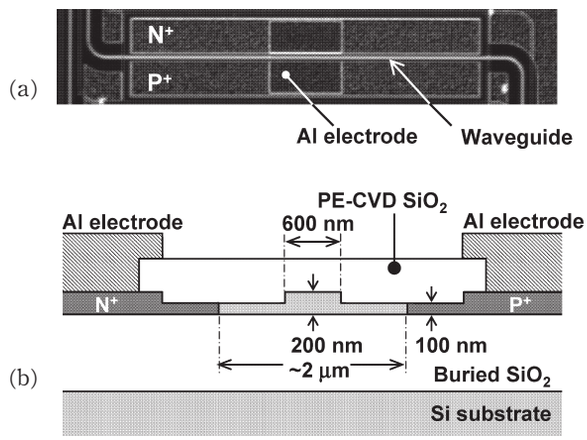


図5　(a) PIN 構造付きシリコン細線導波路と (b) その断面構造.

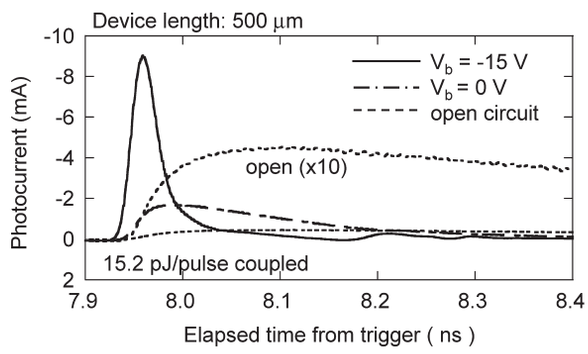


図6　PIN 構造付きシリコン細線導波路における光励起キャリヤー除去特性の測定結果.

少ない 80 mW 程度のポンプパワーでも −5 dB 程度の高い変換効率を得られることがわかる．ポンプパワーを 200 mW にまで増やせばシリコン細線導波路は光増幅媒体にさえなりうるが，再び自由キャリヤー吸収が問題となってくる．このような高パワーポンプ状態においては，自由キャリヤーを何らかの方法で除去する必要がある．

自由キャリヤーを除去する最良の方法として，PIN ダイオード構造を導波路に付与し，ダイオードの逆バイアス動作によりキャリヤーを除去する方法が提案されている．図 5 に，筆者らが開発した PIN ダイオード構造付きシリコン細線導波路の写真と断面構造図を示す．導波路コア形状は 600×200 nm のリブ型であり，その両サイドのスラブ部にはキャリヤー除去用の高濃度 P 型半導体領域と高濃度 N 型半導体領域が設けられている．これらの高濃度 P/N 領域による光吸収を避けるため，これら領域は導波路コアから 0.7 μm 以上の距離をおいて設置され，その結果，伝搬損失は通常のシリコン細線導波路と同等の 2 dB/cm 以下となっている[9]．

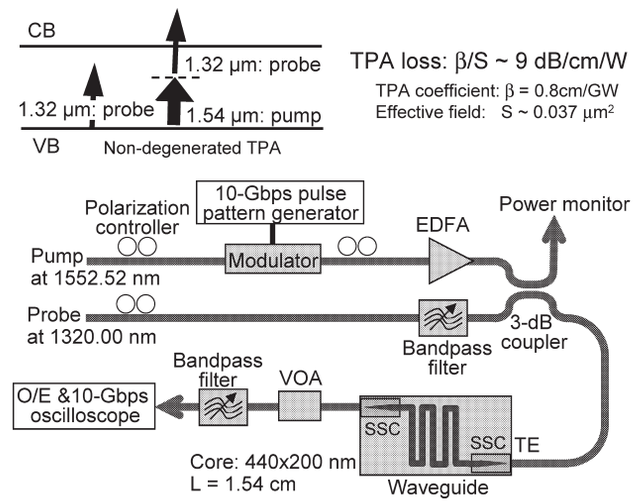


図7　二光子吸収現象を利用した直接光変調の実験系.

PIN 構造付きシリコン細線導波路によるキャリヤー除去機能を確認するために，この導波路に波長 1.55 μm の短パルス光（7.2 ps，2 W）を導入して自由キャリヤーを生成させ，PIN 構造から取り出されるキャリヤー由来の光電流の時間変化を測定した．本測定では，さまざまな逆バイアス条件において，PIN 構造から出力された信号の AC 成分のみを 40 GHz 帯域のバイアスティーを通じて，50 GHz 帯域のオシロスコープで観測した．測定結果を図 6 に示す．まず本図中点線はバイアス回路を接続しない場合の光電流の時間変化であるが，その減衰時間は約 1 ns であった．DC 的に接続された外部回路がないので，ここで観測されている波形はキャリヤーの拡散と再結合に起因するものである．一点鎖線はバイアス回路を接続し，0 V バイアスを与えた場合，すなわち P–N 間短絡の場合に対応するが，キャリヤー減衰時間は 300 ps 程度に高速化する．これはシリコン PIN 構造が太陽電池モードで動作し，キャリヤーを外部回路に吐きだすことにより得られた効果である．さらに図 6 の実線は 15 V の逆バイアスを印加した場合の結果であるが，キャリヤー減衰時間は 30 ps 程度までに劇的に改善していることがわかる[9,28]．ただし，この波形は実験系の周波数帯域により制限されたものであり，実際のキャリヤー減衰時間はさらに短いものと推測される．すなわち，この PIN 構造を用いることにより，キャリヤー減衰時間は通常のシリコン細線の 30 分の 1 以下に高速化されていることがわかる．また，同種のデバイスはコアサイズが 4 μm 程度の大型のシリコンリブ型導波路でも実現されているが，そこでのキャリヤー減衰時間は 1.2 ns 程度であり[25]，シリコン細線型 PIN 構造は，その 40 倍以上のキャリヤー除去能力を示している．

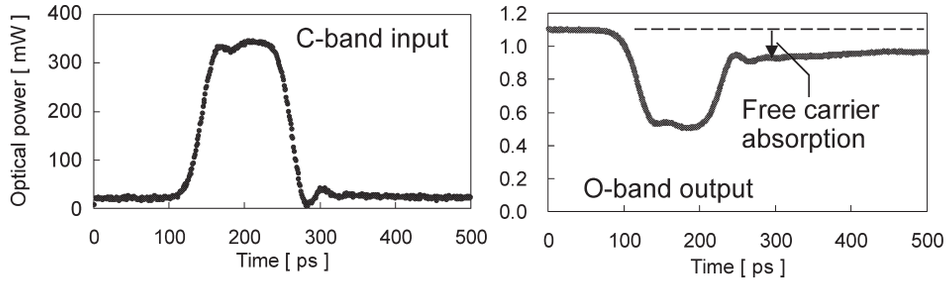


図 8　二光子吸収現象を利用した直接光変調の実験結果．

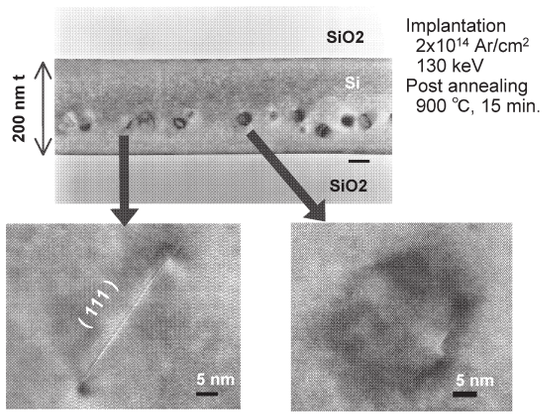


図 9　格子欠陥を導入したシリコン細線導波路の断面透過型電子顕微鏡写真．

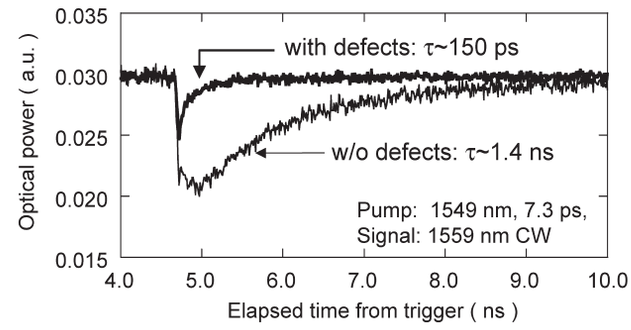


図 10　格子欠陥を導入したシリコン細線導波路における直接光変調実験の結果．

このような高速キャリヤー除去構造は，二光子吸収により発生する自由キャリヤーの蓄積を抑制し，シリコン製光非線形デバイスの効率向上に大きく寄与するであろう．

### 2. 2　二光子吸収現象を利用した直接光変調

前節において，自由キャリヤーの発生源であった二光子吸収現象は直接光変調として利用することが可能である[21,24]．図 7 に，二光子吸収現象を用いた C/O バンド直接光変調の実験系を示す．C バンド（1550 nm 帯）のポンプ光を 10 Gbit/s 信号で変調した後，EDFA で尖頭値を最大 300 mW 程度にまで増幅する．このポンプ光を O バンド（1300 nm 帯）の CW 信号光と WDM カップラーで合成し，シリコン細線導波路に入力した．導波路の長さは 1.54 cm，伝搬損失は 2.4 dB/cm である．変調の原理は単純である．C バンドの強いポンプ光が導入されると，この C バンドポンプ光と O バンド信号光とが関与した非縮退二光子吸収の確率が大きくなる．すなわち，O バンド信号光からみれば，C バンドポンプ光が入射されたときのみ導波路の吸収係数が増大したようにみえる．そこで，導波路出口にて O バンド光のみを WDM フィルターで取り出せば，C バンドパルスに対し反転変調された O バンド光を得ることができる．

図 8 にピークパワー 300 mW の単一ポンプパルスを入力した場合の実験結果を示すが，導波路出口における O バンド出力の時間波形は，ポンプ波形に対し反転変調されていることがわかる[21]．しかしながら，この反転変調信号には，減衰時間 1 ns 程度のテールが存在しており，Gbps を超える高速データストリーム適用時には，パターン効果によるビットエラー率の悪化が危惧される．この低速成分は，前節で問題となった自由キャリヤー吸収によるものであることが判明しており，実用デバイス適用にむけては，自由キャリヤー除去が課題となる．

自由キャリヤーの除去には上述の PIN 構造による対策が有効であるが，電子デバイス的な構造が必要となる．そこでより簡便な自由キャリヤー除去方法として，格子欠陥によるキャリヤー再結合の促進について紹介する[28–30]．

本実験においては，シリコン細線導波路に次の方法で格子欠陥が導入された．まず，導波路コアとなる厚さ 200 nm の Si 層に $2\times10^{14}$ Ar/cm² のドーズでアルゴンイオンを注入して点欠陥を生成し，さらに 900℃，15 分のアニールによる固層エピ成長で欠陥を Si 層中央部に集積させた．また，この過程を通じ，点欠陥はキャリヤーの再結合に適した転移ループへと変成している．この欠陥導入基板に，上述の PIN 構造付き導波路と同じリブ型シリコン細線導波路を形成した．また，比較対象として，欠陥を導入しな

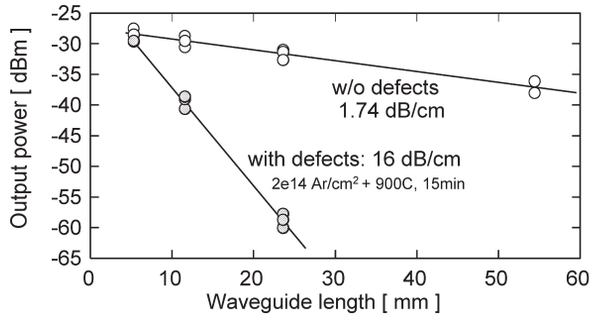


図 11　格子欠陥を導入したシリコン細線導波路の光透過率測定結果．

い試料も合わせて準備した．

図 9 には，格子欠陥が導入された導波路の透過型電子顕微鏡写真を示す．導波路の厚さ方向のほぼ中央に格子欠陥が導入されている状況が観察されるが，さらに拡大してみると，直径数十 nm の転位ループが形成されていることがわかる．

これらの導波路を用いた非縮退二光子吸収による直接光変調の実験結果を図 10 に示す．ここでは，ファイバーモードロックレーザーからの波長 1549 nm，パルス幅 7.3 ps の短パルス光をポンプ光，波長 1559 nm の CW 光をプローブ光として導波路に光を導入した．そして，導波路出口においてアレイ導波路格子型波長フィルターでプローブ成分のみを抽出し，その時間波形を測定した．まず，欠陥が導入されていない導波路では，二光子吸収によるプローブ光の減衰の後にも自由キャリヤー吸収による減衰が観測された．自由キャリヤーによる光減衰の回復時間は 1.4 ns であり，上述の PIN 構造付き導波路においてバイアス回路を取り付けない場合の光電流の回復時間にほぼ一致する．これに対し，転位ループを導入した導波路では，自由キャリヤー吸収の回復時間は 150 ps 程度と，欠陥なしの場合に比べほぼ 10 分の 1 に高速化された[28–30]．すなわち，転位の導入により，自由キャリヤーが速やかに除去されたことを示している．

ただし，この種の格子欠陥の導入においては，格子欠陥による散乱や，欠陥準位を通じた光吸収などによる，導波路伝搬損失の増大に注意しなければならない．図 11 に欠陥導入した導波路の透過率測定結果を示す．図からもわかるように，格子欠陥を導入した導波路では導波損失が，欠陥なしの場合に比べ大幅に増加し 16 dB/cm に至っている．本稿で検討した直接光変調実験では 1.5 cm の導波路を用いているため，16 dB/cm の伝搬損失は実用上許容できない．しかしながら，本デバイスではポンプ強度が最も強い導波路入口近傍の寄与が大きいので，実際に必要とされる導波路長は数 mm と思われる．また，アニールによる転位ループサイズの制御などにより伝搬損失も調整可能と思われ，格子欠陥の導入は本デバイスにおける有効な自由キャリヤー除去法といえる．

このような考え方に基づくと，格子欠陥による自由キャリヤー除去は，むしろシリコン細線型リング共振器やフォトニック結晶点欠陥型微小共振器のような，極微小な共振器型デバイスへの適用に適していると思われる．この種のデバイスでは，格子欠陥による損失は共振器バンド幅に影響を与える可能性があるが，上述した程度の損失は実用上問題にならないことが判明している[30]．

以上述べてきたように，モードフィールドサイズが小さなシリコン細線導波路では，光パワー密度が著しく増大するため，実用レベルに近い効率の光非線形デバイスが実現可能となる．シリコン細線導波路型光非線形デバイスの重要な特徴は，通信用光源として容易に入手できる 100 mW 級のポンプ光を用いて CW のデバイス動作が可能であること，および導波路の折り畳みによりデバイスサイズが非常に小さくできることである．また，シリコン細線導波路ですでに実現している他の光学デバイス，そしてさらには電子デバイスともモノリシック集積できる利点も非常に大きい．

本稿では，具体的な応用例として波長変換デバイスや直接光変調を紹介したが，前者は光非線形効果に期待されている重要な機能であり，たとえば波長群変換による高スループット光ルーティングなどへの利用が考えられている[31]．また，ポンプ光を伝送路のゼロ分散近傍に配置し，信号光波長と変換光波長とに逆分散をもたせ，伝送路の分散補償に使う提案もなされている[32]．このような波長変換の実現には，現在のところ高価な QPM-LN 導波路を利用したデバイスが用いられているが，今回紹介した四波混合現象を利用した波長変換の効率がさらに向上すれば，シリコン細線導波路が安価で生産性の高い波長変換デバイスとして利用可能となるであろう．

また，後者は単純導波路における単純な二光子吸収のみを利用した例であったため，10 pJ/100 ps-pulse オーダーのやや強めの制御光を必要とするが，高 $Q$ 値の共振器構造と非線形屈折率変化を用いれば，100 fJ/pulse 以下で制御可能となっており[30]，低消費電力，集積化全光ロジックとしての応用が期待される．

シリコン導波路を利用した光非線形デバイスにおける最大の問題点は，自由キャリヤー吸収であるが，PIN 構造によるキャリヤー除去や格子欠陥導入によるキャリヤー再

結合の促進などの解決策が完成しつつあり，これらの手法を適用することにより，より実用的な光非線形デバイスが実現されるであろう．

本研究の一部は総務省戦略的情報通信研究開発推進制度（SCOPE）の委託研究開発 051403002 として実施された．

## 文　　献


1) K. Yamada, T. Tsuchizawa, T. Watanabe, J. Takahashi, E. Tamechika, M. Takahashi, S. Uchiyama, H. Fukuda, T. Shoji, S. Itabashi and H. Morita: "Microphotonics devices based on silicon wire waveguiding system," IEICE Trans. Electron., **E87-C** (2004) 351–357.
2) T. Tsuchizawa, K. Yamada, H. Fukuda, T. Watanabe, J. Takahashi, M. Takahashi, T. Shoji, E. Tamechika, S. Itabashi and H. Morita: "Microphotonics devices based on silicon microfabrication technology," IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., **11** (2005) 232–240.
3) W. Bogaerts, T. Baets, P. Dumon, V. Wiaux, S. Beckx, D. Taillaert, B. Luyssaert, J. Van Campenhout, P. Bienstman and D. Van Thourhout: "Nanophotonic waveguides in silicon-on-insulator fabricated with CMOS technology," J. Lightwave Technol., **23** (2005) 401–412.
4) 渡辺俊文・土澤　泰・福田　浩・山田浩治・篠島弘幸・板橋聖一："Si 細線導波路を用いた多段分岐デバイスの特性"，電子情報通信学会 2006 年ソサイエティ大会講演論文集（2006）CS-3-10.
5) K. Yamada, T. Shoji, T. Tsuchizawa, T. Watanabe, J. Takahashi and S. Itabashi: "Silicon-wire-based ultrasmall lattice filters with wide free spectral ranges," Opt. Lett., **28** (2003) 1663–1664.
6) T. Fukazawa, F. Ohno and T. Baba: "Very compact arrayed-waveguide-grating multiplexer using Si photonic wire waveguides," Jpn. J. Appl. Phys., **43** (2004) L673.
7) H. Yamada, T. Chu, S. Ishisa and Y. Arakawa: "Si photonic wire waveguide devices," IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., **12** (2006) 1371–1378.
8) T. Tsuchizawa, K. Yamada, H. Fukuda, T. Watanabe, S. Uchiyama and S. Itabashi: "Low-loss Si-wire waveguides and their application to thermooptics switches," Jpn. J. Appl. Phys., **45-8B** (2006) 6658–6662.
9) K. Yamada, T. Tsuchizawa, T. Watanabe, H. Fukuda, H. Shinojima and S. Itabashi: "Applications of low-loss silicon photonic wire waveguides with carrier injection structures," *IEEE/LEOS 4th International Conference on Group IV Photonics*, Tokyo (2007) WP23.
10) A. Liu, L. Liao, D. Rubin, H. Nguyen, B. Ciftcioglu, Y. Chetrit, N. Izhaky and M. Paniccia: "High-speed optical modulation based on carrier depletion in a silicon waveguide," Opt. Express, **15** (2007) 660–668.
11) Q. Xu, S. Manipatruni, B. Schmidt, J. Shakya and M. Lipson: "12.5 Gbit/s carrier-injection-based silicon micro ring silicon modulators," Opt. Express, **15** (2007) 430–436.
12) K. Ikeda, Y. Shen and Y. Fainman: "Nonlinear optical property of amorphous silicon," *Topical Meeting on Nonlinear Optics: Materials, Fundamentals and Applications 2007*, Kona (2007) ThD2.
13) R. S. Jacobsen, K. N. Andersen, P. I. Borel, J. Fage-Pedersen, L. H. Frandsen, O. Hansen, M. Kristensen, A. V. Lavrinenko, G. Moulin, H. Ou, C. Peucheret, B. Zsigri and A. Bjarklev: "Strained silicon as a new electro-optics material," Nature, **441** (2006) 199–202.
14) L. Brzozowski, E. H. Sargent, A. S. Thorpe and M. Extavour: "Direct measurements of large near-band edge nonlinear index change from 1.48 to 1.55 mm in InGaAs/InAlGaAs multiquantum wells," Appl. Phys. Lett., **82** (2003) 4429–4431.
15) H. K. Tsang, C. S. Wong, T. K. Liang, I. E. Day, S. W. Roberts, A. Harpin, J. Drake and M. Asghari: "Optical dispersion, two-photon absorption and self-phase modulation in silicon waveguides at 1.5 $\mu$m wavelength," Appl. Phys. Lett., **80** (2002) 416–418.
16) H. Fukuda, K. Yamada, T. Shoji, M. Takahashi, T. Tsuchizawa, T. Watanabe, J. Takahashi and S. Itabashi: "Four-wave mixing in silicon wire waveguides," Opt. Express, **13** (2005) 4629–4637.
17) R. H. Stolen and C. Lin: "Self-phase-modulation in silica optical fibers," Phys. Rev. A, **17** (1978) 1448–1453.
18) 山田浩治，土澤　泰，渡辺俊文，福田　浩，篠島弘幸，板橋聖一："シリコン細線導波路の作製およびその関連技術，" レーザー研究，**35** (2007) 550–555.
19) T. Shoji, T. Tsuchizawa, T. Watanabe, K. Yamada and H. Morita: "Low loss mode size converter from 0.3 $\mu$m square Si wire waveguides to single mode fibres," Electron. Lett., **38** (2002) 1669–1670.
20) H. Yamada, M. Shirane, T. Chu, H. Yokoyama, S. Ishida and Y. Arakawa: "Nonlinear-optic silicon-nanowire waveguides," Jpn. J. Appl. Phys., **44-9A** (2005) 6541–6545.
21) H. Fukuda, K. Yamada, T. Tsuchizawa, T. Watanabe, H. Shinojima and S. Itabashi: "All-optical wavelength conversion based on nonlinear optical effects in Si wire waveguides," *Topical Meeting of the Integrated Photonics Research and Applications 2006*, Uncasville (2006) ITuH1.
22) K. Yamada, H. Fukuda, T. Tsuchizawa, T. Watanabe, T. Shoji and S. Itabashi: "All-optical efficient wavelength conversion using silicon photonic wire waveguide," IEEE Photonics Technol. Lett., **18** (2006) 1046–1048.
23) M. A. Foster, A. C. Turner, J. E. Sharping, B. S. Schmidt, M. Lipson and A. L. Gaeta: "Broad-band optical parametric gain on a silicon photonic chip," Nature, **441** (2006) 960–963.
24) T. K. Liang, L. R. Nunes, T. Sakamoto, K. Sasagawa, T. Kawanishi, M. Tsuchiya, G. R. A. Priem, D. Van Thourhout, P. Dumon, R. Baets and H. K. Tsang: "Ultrafast all-optical switching by cross-absorption modulation in silicon wire waveguides," Opt. Express, **13** (2005) 7298–7303.
25) H. Rong, A. Liu, R. Jones, O. Cohen, D. Hak, R. Nicolaescu, A. Fang and M. Paniccia: "An all-silicon Raman laser," Nature, **433** (2005) 292–294.
26) O. Tadanaga, M. Asobe, H. Miyazawa, Y. Nishida and H. Suzuki: "Efficient 1.55 $\mu$m-band quasi-phase-matched ZnO-doped $LiNbO_3$ wavelength converter with high damage resistance," Electron. Lett., **39** (2003) 1525–1575.
27) T. K. Liang and H. K. Tsang: "Role of free carriers from two-photon absorption in Raman amplification in silicon-on-insulator waveguides," Appl. Phys. Lett., **84** (2004) 2745–2747.
28) K. Yamada, H. Fukuda, T. Watanabe, T. Tsuchizawa, H. Shinojima, T. Tanabe and S. Itabashi: "All optical wavelength conversion and nonlinear functions enhanced in ultra-small silicon waveguides," *Topical Meeting on Nonlinear Optics: Materials, Fundamentals and Applications 2007*, Kona (2007) ThD1.
29) K. Yamada, H. Fukuda, T. Watanabe, T. Tsuchizawa, H.

Shinojima, T. Tanabe, M. Takahashi and S. Itabashi: "All-optical wavelength conversion using silicon photonic wire waveguide," *IEEE/LEOS 3rd International Conference on Group IV Photonics*, Ottawa (2006) FB5.
30) T. Tanabe, K. Nishiguchi, A. Shinya, E. Kuramochi, H. Inokawa, M. Notomi, K. Yamada, T. Tsuchizawa, T. Watanabe, H. Fukuda, H. Shinojima and S. Itabashi: "Fast all-optical switching using ion-implanted silicon photonic crystal nanocavities," Appl. Phys. Lett., **90** (2007) 031115.
31) J. Yamawaku, E. Yamazaki, A. Takada and T. Morioka: "Field trial of virtual-grouped-wavelength-path switching with QPM-LN waveband converter and PLC matrix switch in JGN II test bed," Electron. Lett., **41** (2005) 88–89.
32) S. Ayotte, H. Rong, S. Xu, O. Cohen and M. Paniccia: "Multi-channel dispersion compensation using a silicon waveguide based optical phase conjugator," Opt. Lett., **32** (2007) 2393–2395.

(2007 年 9 月 3 日受理)