Si細線導波路を用いた超高速光スイッチとSi基板上への 化合物半導体発光材料形成

Tak-Keung LIANG, 赤羽 浩一, 山本 直克, Luis Romeu NUNES, 川西 哲也, 土屋 昌弘

(独)情報通信研究機構 (〒184-8795 東京都小金井市貫井北町4-2-1)

Ultra-Fast Optical Switches Using Si Nano-Wire and Growth of Compound Semiconductor on Si Substrate

Tak-Keung LIANG, Kouichi AKAHANE, Naokatsu YAMAMOTO, Luis Romeu NUNES,

Tetsuya KAWANISHI, and Masahiro TSUCHIYA

National Institute of Information and Communications Technology (NICT), 4-2-1 Nukitakamachi, Koganei, Tokyo 184-8795

(Received February 5, 2007)

Ultra-fast silicon all optical switches using two-photon absorption (TPA) were developed in silicon nanowire optical waveguide on silicon-on-insulator substrate. This waveguide can produce high optical intensities that yield optical nonlinearity such as TPA even at input optical powers typically used in fiber optic communication systems. In addition, we fabricated a high quality GaSb based quantum well (QW) on a Si substrate using AlSb initiation layer. The emission wavelength of QW was 1.55 μm at room temperature, so that the new function can be developed on Si-photonics using this QW.

Key Words: Silicon photonics, Optical switch, Heteroepitaxy, GaSb

1. はじめに

シリコン(Si)は光通信に使用される波長域において損失が小さく、LSI等のマイクロエレクトロニクス産業向けに開発された成熟した加工技術が利用できることから、光デバイスの材料として大きく注目されている¹⁾。SOI (silicon-on-insulator) 光導波路では、埋め込みSi酸化膜(SiO₂)によって基板から分離された単結晶Si層内に光が閉じ込められる。この際SiとSiO₂の間には大きな屈折率差があるため、光を狭いモード領域に確実に閉じ込めることが可能になる。このため、SOI基板上では屈折率差の小さい従来のシリカ導波路に比べて導波路の寸法を大幅に小さくでき、サブミクロンサイズの低損失Si導波路(Si細線導波路)が実現可能である。こうした導波路では強力な光の閉じ込め作用と狭い有効モード断面積(<0.1 μm^2)が実現されることから、光通信に一般に使用される入力光パワーにおいても大きな光強度を生成できる。光強度が強くと、相互作用距離が長い導波路では、2光子吸収や自由キャリア吸収といった非線形光学効果が容易に顕現し、これを積極的に利用することで超高速光信号処理が可能になる。本稿では前半に、Si細線導波路と2光子吸収過程を利用した全光高速変調について紹介する。

他方、Siは発光効率が低いという弱点を持ち、これまで

フォトニクス分野におけるSiの応用範囲は、そのほとんどが受動素子であった。これはSiが間接バンドギャップを持つためである。Siを用いた能動素子の開発は大きな課題であり、それゆえSi・ナノ結晶²⁾やSi-Ge超格子³⁾などの研究が広く実施されてきた。これに対してSiの発光効率が低いという性質を補う別の方法として、化合物半導体を積極的にSiフォトリックデバイスに融合させる手法も有力であると考えられる。光通信に使用される波長域で発光する材料としてはnarrow gapをもつアンチモン(Sb)系化合物半導体が有力である。従ってSb系化合物半導体をSi基板上に直接結晶成長する技術が確立されれば、Si基板上において様々なデバイスを実現することが可能となる。しかしながらSiとSb系化合物半導体の間には大きな格子定数差が存在する。例えば室温で0.726 eV(波長1710 nm)のバンドギャップを持つGaSbとSiの間には約12%の格子ミスマッチが存在し、通常の結晶成長条件下では高品質な結晶を得ることが困難であることが予想される。本研究グループではこの問題点を解決する結晶成長技術を開発し、Si基板上において高品質なGaSb結晶を形成する技術を開発した⁴⁾。本稿後半ではこの技術、およびその応用として、Si基板上に作製した室温で1.55 μm 帯で発光するGaSb/AlGaSb量子井戸⁵⁾について紹介する。

2. 2光子吸収を利用した超高速全光スイッチ

半導体光導波路は、将来の超高速光信号処理デバイスに用いられる全光スイッチ要素の有力候補と目されているため、その全光非線形特性は大きな研究テーマになっている⁶⁾。

これまでもSi細線導波路を用いた全光変調は数多く報告されているが⁷⁾、通常Si細線導波路デバイスにおいて用いられている変調原理はプラズマ分散効果である。しかしプラズマ分散効果を用いた場合の変調速度は有効キャリア寿命によって制限され、通常Si細線導波路で数百ピコ秒⁸⁾、Siリブ導波路で数ナノ秒⁹⁾程度である。

本研究グループでは非縮退2光子吸収過程を用いた全光高速変調の実証を行った。実験に使用した導波路サンプルをFig. 1に示す。SOI基板を加工することにより作製し、480 nm×220 nmの断面を持つSi導波路がSi酸化膜上に載った形状をしている。デバイス長は10 mmである。このSi細線導波路を用い、2波長の時間分解ポンプ-プローブ測定を行い、Si細線導波路中に強い光励起パルスが存在する条件で弱いプローブ・パルスの非線形透過率を測定した。励起パルスとプローブ・パルスはともに、波長1550 nm付近で動作する受動モード同期ファイバレーザを光フィルタによるスペクトルスライスにより生成した。この際、干渉を回避し安定した信号を得るため、励起パルスとプローブ・パルスは異なる波長とした。パルス光源の繰り返し周波数は50 MHzであり、励起パルスの時間分離は光生成された全ての自由キャリアが再結合するのに十分な長さである。また、自己相関測定により見積もられる励起パルスとプローブ・パルスの半値幅はいずれも約1.5 psであった。

Fig. 2はポンプ-プローブ法により測定した相互相関曲線(a)と変調深さの励起パワー依存性(b)を示している。プローブ信号の回復時間は3 ps未満であり、2光子吸収過程を利用した本デバイスが非常に高速動作していることを示している。また、プローブ信号の透過率が90 %以上まで回復したことは導波路内に自由キャリアの大きな蓄積が無かったことを示している。プローブ・パルスの変調深さは励起パルスのピークパワーが5 W程度で90 %を超えており、Si細線導波路を用いることにより非線形過程である2光子吸収を比較的低パワーのレーザー光で発現させることが可能となっている。

本研究グループではシリコン光スイッチの回復時間がきわめて短いことを利用して光論理NORゲートを作製した。シリコン細線導波路における非線形透過曲線を用い

Fig. 1 Wire waveguide structure.

Fig. 2 (a) Time-resolved probe transmission in cross-correlation measurement. (b) Modulation depth of probe signal as a function of peak-coupled pump powers.

たNORゲートの動作原理と実験概念図をFig. 3 (a)および(b)にそれぞれ示す。ここでは同じピーク・パワーをもつ信号P1とP2を加算して導波路に結合し、導波路の出力において弱い連続波(CW)プローブ光をP1とP2の和によって混変調した。ブール(論理)NOR演算は暗パルス(ダークパルス)の形で実行された。

Fig. 4に、シリコン導波路の2光子吸収を利用した高速論理NORゲートの実験の様子を示す。信号P1とP2はそれぞれFig. 4(a)および(b)に示す。自己相関器で測定したパルス幅はいずれもFWHMで1.6 psである。サンプリング・オ

Fig. 3 (a) Operating principle. (b) Schematic diagram of NOR gate.

Fig.4 (a) Signal P1. (b) Signal P2. (c) Output cross-modulated CW probe with logic NOR operation.

シロスコープで測定したパルスは、光検出器の帯域幅の制限によって13 ps程度に広がった。干渉を回避し、それによって安定した出力波形が得られるよう、2つの信号には異なる波長を選択した。P1とP2のピーク・パワーは5 W程度で、対応するパルス・エネルギーは8 pJ程度となる。そのため出力暗パルスの変調深さは90 %を超えると予想される。しかし帯域幅の限られた光検出器では実際の変調深さを直接測定することはできない。Fig. 4 (c)を見れば出力論理NORの演算結果が「0100」であることがわかる。今回の2つの信号の時間分離は12.5 psであるため、光NORゲートの等価データレートは80 Gbpsとなる。また論理出力はシリコンのバンドギャップ未満の任意の波長域において得ることができる。

3. Si基板上におけるGaSb結晶成長

本稿の後半ではSi基板上へのGaSb結晶成長とSi基板上で作製したGaSb/AlGaSb量子井戸の光学特性について紹介する。全ての試料は固体ソースの分子線エピタキシー装置によって作製した。基板にはn-Si(001)基板を用いた。基板前処理は希釈フッ酸(約2.5 %)で3分間エッチング後、超純水洗浄を行った。希釈フッ酸エッチング後のSi基板の表面は水素終端されるため、真空チャンバー内での加熱で用意に清浄表面を得ることが可能である^{10,11)}。エッチングした基板はすぐに真空チャンバーに導入し、予備加熱を行った後、成長チャンバーに移動し、760 °Cの基板温度で約15分のサーマルクリーニングを行った。サーマルクリーニングの完了は高速電子線回折(RHEED)の回折パターンが2×2のパターンを示すことにより確認した。その後、基板温度を500 °Cに下げ、5分間のSb分子線照射を行い、AlSb初期層の成長を行った。Sbの分子線強度は1~2×10⁻⁶ Torrであり、AlSbの成長速度は0.1 ML/s(MLは1分子層)である。その後、再度5分間のSb分子線照射を行った後、500 nmのGaSb膜を0.5 ML/sで成長した。成長した薄

膜の結晶性はX線回折(XRD)のGaSb(004)ロックンカーブの半値幅によって評価を行った。また、試料表面の平坦性は原子間力顕微鏡(AFM)により評価を行った。GaSb/AlGaSb量子井戸の光学特性はフォトルミネッセンス(PL)測定により評価した。

まず最初にAlSb初期層の最適条件を調べるため、成長したGaSb膜のロックンカーブ半値幅についてAlSb初期層の膜厚依存性を調べる実験を行った。上記の成長過程の内、AlSbの膜厚を0から20 nmまで変化させた試料を作製し、XRD測定を行った。AlSbの膜厚0 nmの試料はGaSbを直接Si上に成長した試料である。Fig. 5にGaSb(004)回折のロックンカーブの半値幅のAlSb膜厚依存性を示す。AlSb初期層を導入しない試料ではロックンカーブの半値幅は707秒という大きな値を示し、試料表面は白濁した。これに対してAlSb初期層を導入した試料では全ての試料表面が鏡面を示し、結晶性の大きな改善が見られた。半値幅の最も小さくなったAlSb初期層の膜厚は5 nmで、523秒の半値幅であった。AlSb初期層の膜厚依存性で興味深い特徴の一つとして、わずか1 MLのAlSbの初期層の導入によってもGaSb膜の結晶性が大幅に改善されている点がある。この点からもAlSbの導入はSi基板上のGaSb結晶成長において非常に重要な役割を果たしていると言える¹²⁾。

次にSi基板上へのGaSb厚膜の成長を行う実験を行った。5 nmのAlSb初期層を導入し500 nmのGaSbを成長した試料にさらに2 μmのGaSbを1 ML/sで成長した試料を作製し、500 nmのGaSbを成長した試料との結晶性を比較した。2 μmの厚膜を成長した試料ではXRDロックンカーブの半値幅が215秒となり、500 nmの薄膜から得られた値の半分以下の値となった。成長膜厚の増加に伴う転位密度の減少などにより、結晶性が改善したものと考えられる。また、試料表面のAFM観察を行い、表面の平坦性の評価も行った。Fig. 6にその結果を示す。(a)は5 nmのAlSbを導入し500 nmのGaSbを成長した試料のAFM像、(b)はその後さらに2 μmのGaSbを成長した試料のAFM像である。

Fig. 5 Dependence of FWHM of XRD rocking curve on thickness of AlSb initiation layer. Growth temperature was fixed at 500 °C.

Fig. 6 AFM images of surface of GaSb grown on Si; (a) 500 nm GaSb and (b) 2.5 μm GaSb.

500 nmのGaSbを成長した試料では多くのドメインが観察されたが、その後の2 μmのGaSbの成長でドメインの領域が大きくなり数が少なくなっている。これも前出のXRDの結果と同様、成長膜厚の増加に伴う転位密度の減少が原因であると考えられる。実際、転位密度の減少は断面の透過電子顕微鏡観察により確認されており¹³⁾、転位同士が合体してクローズドループを形成することにより、転位が減少している。これらのことより、Si基板上におけるGaSb成長で、厚膜を成長することにより結晶の高品質化が可能であることが示された。

最後に我々はSi基板上にGaSb/AlGaSb多重量子井戸の作製を行い、そのPL特性評価を行った。サンプルの作製は以下のように行った。まず5 nmのAlSb初期層を成長し、その後、500 nmのGaSbバッファ層を成長した。その後、2 μmのAl_{0.3}Ga_{0.7}Sb層を1 ML/sで成長した。最後に5周

Fig. 7 PL spectrum of GaSb/Al_{0.3}Ga_{0.7}Sb multi-quantum well measured at 300 K.

Fig. 8 Dependence of PL emission energy on GaSb well width. Solid line represents calculated theoretical curve.

期のGaSb量子井戸 (wnm)/Al_{0.3}Ga_{0.7}Sb障壁層 (20 nm)と5 nmのGaSbキャップ層を成長した。この際、量子井戸の膜厚 w が5, 8, 10 nmの3種類の試料を作製した。Fig. 7に井戸膜厚8 nmの試料の室温におけるPL測定結果を示す。室温においても明瞭な発光が観測され、そのエネルギー(波長)と半値幅はそれぞれ0.7886 eV (1572 nm)と25 meVであった。この波長は光ファイバ通信の波長に適應している。Fig. 8はPL発光エネルギーの井戸膜厚依存性を示す。プロットが実験結果を示し、実線は有限ポテンシャルの量子井戸におけるシュレーディンガー方程式を解いた際の基底準位のエネルギーの理論曲線である。ポテンシャル形状は参考文献14)及び15)のパラメータを用いて決定した。理論計算による値と実験結果は良く一致しており、この結果はSi基板上に形成したGaSb/AlGaSb量子井戸の発光波長の制御性の良さを示しており、光通信波長帯においてSiとSb系化合物半導体を融合した新機能光デバイスへの応用が期待できる。

4. まとめ

本稿ではSOI基板上に形成したSi細線導波路における2光子吸収過程を利用した全光スイッチとSi基板上へのSb系化合物半導体結晶成長に関する研究を紹介した。

SOI基板上におけるSi細線導波路では低損失の導波路を実現し、非縮退2光子吸収過程を利用し、超高速光スイッチ動作を実証した。実際の実験ではpJという低パルスエネルギーで3 psでのプローブ光の回復を確認した。またこのスイッチを利用した高速光NORゲートの実証も行った。

Si基板上のSb系化合物半導体結晶成長ではAlSb初期層の導入により、その後に成長するGaSb結晶の結晶性を大幅に改善した。この技術を用いてSi基板上に作製した井戸幅8 nmのGaSb/AlGaSb多重量子井戸は室温において1.55 μmの通信波長帯で発光しその発光波長は井戸幅の変化により制御可能であることを示した。井戸幅の変化に伴う発光波長の変化は理論と良く一致しており、Si基板上に成

長したSb系化合物半導体を用いて様々な通信波長帯光デバイスの作製が可能であると考えられる。

謝 辞

本研究推進にご協力頂きましたNICT東脇 正高氏, 松井 敏明氏, 板部 敏和氏, 井筒 雅之氏に感謝致します。

参考文献

- 1) G. T. Reed: *Nature* **427** (2004) 595.
- 2) L. Pavesi, L. Dal Negro, C. Mazzoleni, G. Franzo, and F. Priolo: *Nature* **408** (2000) 440.
- 3) N. D. Zakharov, V. G. Talalaev, P. Werner, A. A. Tonkikh, and G. E. Cirlin: *Appl. Phys. Lett.* **83** (2003) 3084.
- 4) K. Akahane, N. Yamamoto, S. Gozu, and N. Ohtani: *J. Cryst. Growth* **264** (2004) 21.
- 5) K. Akahane, N. Yamamoto, S. Gozu, and N. Ohtani: *Jpn. J. Appl. Phys.* **44** (2005) L15.
- 6) T. Kamiya and M. Tsuchiya: *Jap. J. Appl. Phys.* **44** (2005) 5875.
- 7) V. R. Almeida, C. A. Barrios, R. R. Panepucci, and M. Lipson: *Nature* **431** (2004) 1081.
- 8) R. L. Espinola, J. I. Dadap, R. M. Osgood, Jr., S. J. McNab, and Y. A. Vlasov: *Opt. Exp.* **12** (2004) 3713.
- 9) T. K. Liang and H. K. Tsang: *Appl. Phys. Lett.* **84** (2004) 2745.
- 10) T. Takahagi, I. Nagai, A. Ishitani, H. Kuroda, and Y. Nagasawa: *J. Appl. Phys.* **64** (1988) 3516.
- 11) G. S. Higashi, Y. J. Chabal, G. W. Trucks, and T. Raghavachari: *Appl. Phys. Lett.* **56** (1990) 656.
- 12) K. Akahane, N. Yamamoto, S. Gozu, A. Ueta, and N. Ohtani: *J. Cryst. Growth* **283** (2005) 297.
- 13) K. Akahane, N. Yamamoto, S. Gozu, A. Ueta, and N. Ohtani: *Thin Solid Films* **515** (2006) 748.
- 14) M. P. C. M. Krijn: *Semicond. Sci. Technol.* **6** (1991) 27.
- 15) M. Levinshtein, S. Rumyantsev, and M. Shur: *Handbook Series on Semiconductor Parameters* (World Scientific, 1996, vol. 1) p. 125.

レーザーワード

2光子吸収(two photon absorption: TPA)

通常, 半導体のバンドギャップ E_g よりエネルギーの小さい光子(エネルギー E_p)はその半導体に吸収されない。しかし光強度が十分に大きい場合には2個の光子が同時に吸収され, 半導体結晶中に1個の電子正孔対が生成される。この非線形光学効果を2光子吸収(Two photon absorption:

TPA)と呼ぶ。同じエネルギーの光子が吸収される場合($E_g > E_p$ かつ $E_g < 2E_p$)は縮退2光子吸収, 異なるエネルギーの光子が吸収される場合($E_g > E_p$, E_p かつ $E_g < E_p + E_p$)は非縮退2光子吸収と呼ばれる。(赤羽 浩一)