

シリコンベース光検出器

大橋 啓之*・藤方 潤一**

Silicon-Based Optical Detectors

Keishi OHASHI^{*,**} and Jun-ichi FUJIKATA^{*,**}

Silicon-based photo-detectors are reviewed with emphasis on silicon photodiodes for on-chip integrated optoelectronics. A variety of device structures have been developed to obtain high-speed and high-efficiency response using silicon with relatively low optical-absorption coefficient. Optical resonators are useful for the high-speed silicon photodiodes to obtain small drift time by reducing the separation between electrodes. Surface-plasmon antenna adds other merits of small electric capacitance and efficient coupling between the waveguide and the active layer of a photodiode. These technologies make silicon photo-detectors operate at high-frequency at more than tens of GHz on a silicon chip.

Key words: photodiode, silicon photonics, surface-plasmon, optical waveguide

シリコン (Si) はエレクトロニクスを支える基本材料である。その理由は、必ずしも Si が半導体材料として最もすぐれているからではなく、集積化にあたり化学的および機械的に適した材料であることによるところが大きい。一方で、太陽電池やノイズを遮断するためのフォトカップラーなど光電デバイス材料の多くにも Si が用いられている。しかし、これまでのところ GHz 以上の高速な応答を必要とする長距離光通信デバイスの材料には、Si でなくおもに化合物半導体が使われている。その理由として、Si においては光が吸収される際の電子の状態遷移がフォノンによる運動量の変化を伴う間接的なものであるため光吸収係数が小さいことが挙げられている (図1参照)。このことは発光デバイス、特に Si によるレーザーの実現を妨げるうえでは大きな障害となっている¹⁾。しかし、Si あるいは Si 系の材料を用いた GHz 台の高速光検出器についてはさまざまな試みがあり、シリコンフォトニクス^{2,3)}とよばれる半導体集積回路製造プロセスを用いた光電集積実現に向けての技術開発の一部を担っている。本稿は、Si ベースの光検出器、特に Si フォトダイオードにつき、その

高速化のための試みを紹介する。

1. 光検出器材料としてのシリコン

高速応答する光検出器の材料は、光が速やかに吸収されて効率よく電流に変換されるものである必要がある。半導体 Si のバンドギャップは 1.12 eV であり、それよりフォトンエネルギーの大きい可視光および短波長近赤外 (波長 1100 nm 以下: 簡略化のため本稿で単に波長という場合は真空中の波長を指すことにする) の光に対しては吸収体として働き荷電キャリア (電子と正孔) を生成する。長距離光通信で利用されるそれより長い波長の光に対して Si は透明となる。このことから、シリコンフォトニクスには、光源の波長を 1100 nm 以上として光導波路に Si を用いる光信号検出にはゲルマニウム (Ge) などを用いる長波長型と、光源の波長を 900 nm 以下にして光導波路にその波長で透明な SiO₂ や SiON などを用いる短波長型がある⁴⁾。これまで報告されているシリコンフォトニクスにおいては、半導体プロセスで用いられる Si 基板あるいは SOI 基板 (silicon-on-insulator: Si の

* 日本電気(株) (〒305-8501 つくば市御幸が丘 34) E-mail: k-ohashi@cb.jp.nec.com

** (株)半導体先端テクノロジーズ (〒305-8501 つくば市御幸が丘 34)

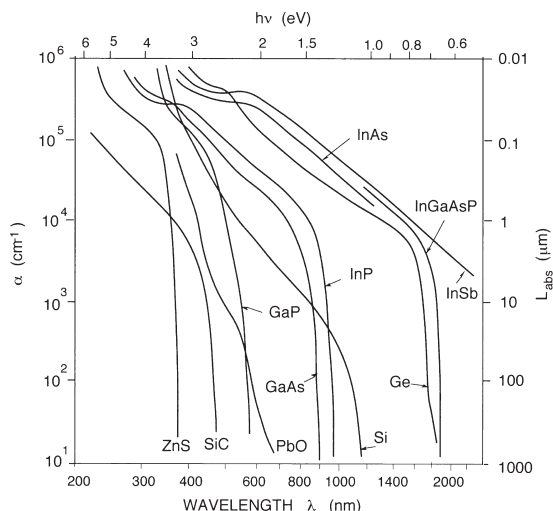


図1 各種半導体材料における光吸収係数 α および吸収長さ L_{abs} の波長依存性⁵⁾.

基板上に SiO_2 さらに Si 層をのせた構造) を利用することが多い。ただし、長波長型では光検出器を Si 以外の材料に、短波長型では導波路を Si 以外の材料にする必要がある。Si を用いた高速の半導体光検出デバイスには、発生した荷電キャリアを光電流として取り出すフォトダイオードと、荷電キャリアの発生を半導体の電気伝導度変化として利用するフォトコンダクターがある。

2. 高速シリコンフォトダイオード

フォトダイオードは、入射光で発生した電子と正孔を分離して光電流として電極から取り出す。そのために、逆バイアスされた PN 接合あるいはショットキー接合における電荷空乏層が利用される。空乏層を厚くすると、荷電キャリアが通過するドリフト時間により応答速度が遅くなる。一方、空乏層を薄くすると、光の吸収が不十分になって量子効率が低下し、さらにフォトダイオードの電気容量(おもに空乏層容量) C が大きくなる。その結果、負荷抵抗 R との積である回路時定数 RC の増加により応答速度が遅くなる。高効率・高速設計を行ううえで重要な空乏層の厚さが自由に設定できる PIN 構造のフォトダイオードもよく用いられる。

シリコンフォトニクス実現に向け、Si 基板上に半導体集積回路製造プロセスを用いて高速応答するフォトダイオードを作製する数多くの研究が進められている。バイポーラー技術を用いたフォトダイオードとして、受光面積 $100 \mu\text{m}^2$ の Si 製ベースコレクター型 PIN フォトダイオードが報告されている⁶⁾。この Si フォトダイオードは、波長 850 nm において 3 Gbits/s で動作することが報告されて

いるが、この構造においては光の吸収層がエピタキシャル成長させた $1 \mu\text{m}$ 程度の厚さの領域に限られているため、量子効率は 45 mA/W (約 6%) であった。CMOS 技術を用いたフォトダイオードとして、Si 製 PN フォトダイオードも開発された⁷⁾。このフォトダイオードでは光により発生した荷電キャリアの拡散が大きな律速になっているため、応答の帯域はかなり低くて 10 MHz 程度であった。BiCMOS 技術を用いた Si 製 PIN フォトダイオードも 500 MHz 以上の帯域が得られたと報告されている⁸⁾。この PIN フォトダイオードの量子効率も、光の吸収層の厚さが 700 nm 程度しかないため、波長 850 nm で 70 mA/W (10%) である。さらに、 N^+ の Si 基板をカソードとし P^+ 領域をアノードとした垂直型 PIN フォトダイオードも開発されている⁹⁾。この Si フォトダイオードは、バイアス電圧 3 V における -3 dB 帯域が 1.7 GHz であったと見積もられている。また、量子効率は反射防止膜なしで 49%、ありでは 94% という高い値であったと報告されている。

これらの結果を踏まえ、Schaub ら¹⁰⁾ は高速の応答性と高い効率を両立させることを目指して、Si 基板に代えて SOI 基板を導入した。彼らは横型 PIN フォトダイオード構造により活性層に使える Si の厚さを $3 \mu\text{m}$ 程度と比較的大きくすることで、波長 850 nm において量子効率 200 mA/W (29%) という高い値が得られた。また、バイアス電圧 20 V で -3 dB 帯域は 2.8 GHz であったと報告している。これらの結果から、先に定義した短波長のシリコンフォトニクスにおいては、 10 GHz 以下ならば従来の Si フォトダイオード技術で対応が可能であることが予想される。

導波損失を無視できるような短距離配線の用途では、さらに短い波長を用いることで Si 光検出器の感度を上げることができる。例えば、DVD などの光ストレージに用いる波長領域においては、図 1 からわかるように Si の光吸収長がかなり短くなる(赤: 波長 $630 \sim 650 \text{ nm}$ で吸収長 $3 \mu\text{m}$, 青: 波長約 400 nm で吸収長 100 nm) ことから、Si フォトダイオードの高効率化と高速性の両立を同時に実現することが容易になる。この波長領域においてきわめて高速に応答するフォトダイオードとして、Si の上に Ti/Au による櫛歯状の電極対を置いた形の金属-半導体-金属 (MSM) フォトダイオードが作製されている^{11,12)}。ここで報告された MSM フォトダイオードは、対になる 2 つの櫛歯電極と Si との間にショットキー障壁が 2 箇所形成されるダブルショットキー型になっている。電極の櫛歯の幅と間隔はどちらも約 300 nm であった。波長 620 nm のモードロックレーザーを用いての実験では、パルス応答波形

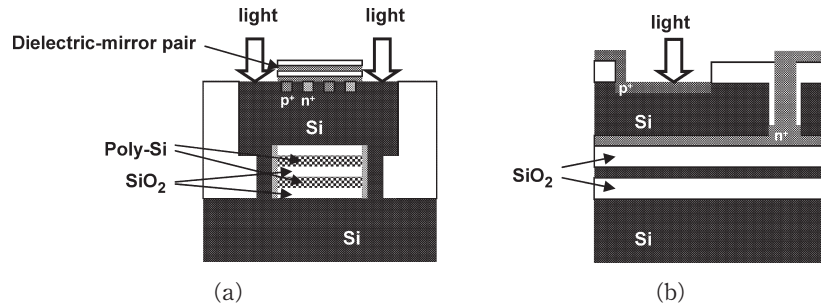


図2 DBRによる光閉じ込め機構を備えたSiフォトダイオード。(a) 2種類のミラーによるDBR利用型¹³⁾、(b) ダブルSOI基板利用型¹⁴⁾。

の全値半幅 (FWHM) は 11 ps (38 GHz に相当) ときわめて短い値であったことが報告されている。Si の吸収長がさらに短くなる波長 465 nm においては FWHM 5.5 ps (75 GHz に相当) という高速な応答が得られ、さらに量子効率も 13% と比較的高いことが報告されている。これらの結果は、Si フォトダイオードが短波長の用途に適していることを示している。

一方、長波長型のシリコンフォトニクスでは Ge を光検出器に用いた報告が多い。Ge の光吸収においても電子の状態遷移は運動量変化を伴う間接遷移型ではあるが、間接バンドギャップ 0.64 eV と直接バンドギャップ 0.8 eV の差が小さい (Si はおのおの 1.12 eV と 3.4 eV) ことから、直接遷移型とほとんど同じ大きな光吸収係数 (短い吸収長) が得られる (図 1 参照)。ただし Ge は表面付近での物性制御が Si ほど簡単ではなく集積回路化には相応の困難を伴う。Ge のもうひとつの長所は、バンドギャップが 0.8 eV 近辺にあるため近赤外の受光材料としても用いることができる点である。特に、Si 上に形成された Ge は大きな歪みを持ちバンドギャップが縮むことにより、波長 1600 nm 近辺までの長波長応答が可能で長距離光通信の波長帯域に対応させることができる。Ge 受光器については文献 3 を参考にされたい。

3. 光閉じ込めとシリコンフォトダイオード

Si フォトダイオードの応答の遅さの原因は基本的には吸収長が長いことにある。図 1 からわかるように、波長 850 nm の場合 Si における光の吸収長 (侵入深さ) は 10 μm 強である。したがって、光を完全に吸収して効率のよいフォトダイオードを得るために、通常は電極 (カソードとアノード) の間隔を 10 μm 以上とる必要がある。その結果、光吸収により発生した荷電キャリアがドリフトおよび拡散で電極まで到達するのに時間がかかる。このことが応答の遅さに大きな影響を及ぼしている。荷電キャリアのドリフト時間を短縮してフォトダイオードの応答を高速化する

には、対となる電極 (カソードとアノード) の間隔を小さくする必要がある。前章に述べた MSM フォトダイオード^{11,12)} は電極対を Si の上 (入射光側) に置くことで、効率をなるべく下げずに電極間隔を狭めて高速化を図っている。

量子効率を下げずに電極間隔を小さくするもうひとつの方法として、ブラッグ反射による光の閉じ込めが利用されている。その方式として、薄い光吸収層をブラッグミラーで挟んで光閉じ込めを行うことが試みられている。ブラッグ反射の利用は、光が閉じ込められる特定の共鳴波長においてきわめて有効な方法となる。図 2 (a) は、Schaub らが報告した分布型ブラッグミラー (DBR) 利用の Si フォトダイオードの断面図である¹³⁾。上下ミラー間の間隔 (選択エピタキシャル成長 Si 層の厚さ) 500 nm、面積 10 \times 10 μm^2 、入射光波長 800 nm の条件において、-3 dB 帯域はバイアス電圧 3 V の場合で 20.4 GHz、5 V の場合で 34 GHz 以上という値が得られた。量子効率も 30% 台という高い値が得られている。さらに、図 2 (b) に示すダブル SOI とよばれる Si/SiO₂/Si/SiO₂/Si 基板を用いて作製された DBR を用いた Si フォトダイオード¹⁴⁾ が、波長 860 nm の光に対して、バイアス電圧 9 V 印加により量子効率 40%、応答速度 29 ps という値を示したことが報告されている。この方式の欠点としては、特性の温度依存性が大きいなど外部環境の変化に敏感という問題がある。

4. シリコンナノフォトダイオード

動作速度を制限するもうひとつの要因である RC 時定数を低減するには、フォトダイオード回路の電気容量を減らす必要がある。電気容量は光電流が電圧を作り出すのに要する時間に比例するからである。この電気容量の主要部分は、通常、フォトダイオードの接合電気容量 (空乏層容量) である。接合電気容量を減らすためには受光面積 (空乏層面積) を減らす必要があるが、受光面積を減らすと信号強度が低下するというジレンマがある。接合面積を小さ

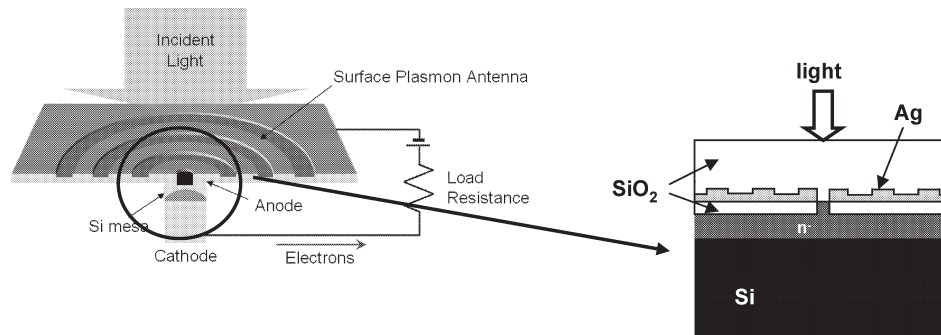


図3 シリコンナノフォトダイオードの断面模式図およびその拡大説明図。

くして電気容量を小さくするために、レンズで光を絞り受光面積を小さくすることが行われることがある。ただし、レンズは実装上の複雑さを増すことから、低コストの製造プロセスには適さないという問題がある。筆者らは、表面プラズモンを利用して光を閉じ込めることで、電極間隔だけでなく電極の面積も小さくできることに注目した。

通常、レンズなどにより光を集める場合、集光スポットは回折現象によって波長程度の広がりをもつ。この回折限界より小さな光を得る方法のひとつに、微小な穴や散乱体からの近接場を利用する方法がある¹⁵⁾。この方法により、穴の径や散乱体の曲率半径程度の広がりをもつ近接場を比較的自由に得ることができ、極微細光素子の実現に有効な手段となる。シリコンフォトニクスに適した高速小型光電変換素子として、筆者らは表面プラズモンを利用したSiナノフォトダイオード技術を開発した^{16,17)}。近接場光は一般には微弱であるが、微小範囲では強い強度を得ることができる。ここで、近接場の強度は光と半導体が相互作用する確率に比例する局所的な光電場の振幅と考えることができる。表面プラズモンは、金属の表面形状を工夫することで、必要な箇所に強い近接場を作り出す手段のひとつである。

シリコンナノフォトダイオードは、ショットキー電極を兼ねる表面プラズモンアンテナがSi中に発生する近接場光を利用する。表面プラズモンが減衰しないうちにショットキー領域でフォトキャリアを発生させることができれば、効率よく光電流を得ることが可能になる。このとき、高速化の妨げとなる拡散電流の影響を小さくするために、Siの活性化領域とショットキー領域と近接場光領域とがなるべく一致するように設計を行う必要がある。図3のような表面プラズモンアンテナとよぶ周期的な凹凸をもつ金属により、中央部の微小な穴付近に強力な近接場光を作り出すことができる。穴の直径を波長の半分より小さくすることにより、透過光はほとんどなくなり、近接場光の有効

な利用が可能になる。

このように、表面プラズモンアンテナを利用して小さな近接場光を作り出すことにより、シリコンナノフォトダイオードの応答速度はきわめて速くできる。実際、ナノ電極を組み合わせ試作したシリコンナノフォトダイオードでFWHMが20 ps以下という高速な応答が得られた¹⁸⁾。また、図3のようなアノード側にのみショットキー障壁が現れる構造では、外部から強い電圧を印加しなくてもショットキー障壁に伴うビルドアップ電圧により光電流が流れる。実際、バイアス電圧ゼロでも高速応答する¹⁸⁾。ナノフォトダイオードの電極面積が小さく低電気容量であることは、発生する光電流を速やかに効率よく電圧に変換するのにも有効であることがわかっている¹⁹⁾。また、電極の面積が小さいことから、暗電流（光信号がないときに流れる電流）も小さい。

5. 光導波路との結合

Si光検出器に光導波路から光を入れる方法として、エバネセント結合を用いた検討がされている(図4(a))。SiON光導波路とSiの結合では、Siの厚さを最適化することにより結合長を40 μm 程度にできることが示されている²⁰⁾。さらに結合長を短くする方法として、プラズモンアンテナ機能をMSM(金属-半導体-金属)型電極にもたせた光導波路型Siナノフォトダイオードが検討されている²¹⁾。図4(b)に、導波路結合用のプラズモンアンテナの模式図を示す。また、その断面模式図と、光が導波路からSi中に吸収される様子を計算シミュレーションにより求めた結果を図5に示す。わずか10 μm 程度の長さで表面プラズモン共鳴を利用した回折モードにより、Si中に光が吸収されることがわかる。この光導波路型Siナノフォトダイオードでは、FWHM 20 ps以下という高速な応答と10%程度の量子効率が得られている²²⁾。さらに、金属微粒子の表面プラズモンを利用して半導体の光吸収を増や

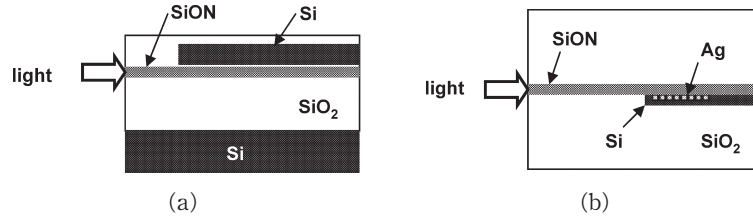


図4 導波路型 Si フォトダイオードの結合方式. (a) エバネセント結合, (b) プラズモンアンテナ結合.

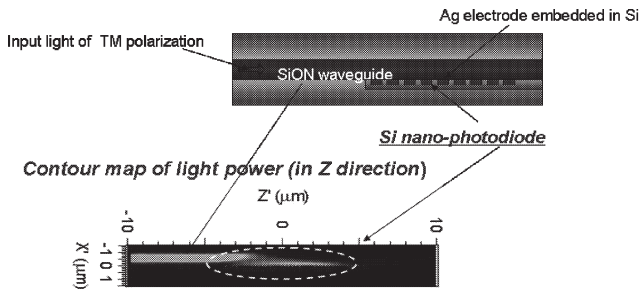


図5 光導波路型シリコンナノフォトダイオード. 断面構造とFDTDによる光吸収シミュレーション結果を示す²¹⁾.

す試みも報告されている²³⁾. このように、表面プラズモンを用いたナノフォトダイオード技術は、今後シリコンフォトニクスがエレクトロニクスにおける光配線に導入されるにあたり重要な技術になることが期待される。

6. その他のシリコン光検出器

光により発生した荷電キャリアをなだれ現象により増倍させて高感度化する光検出器をアバランシフォトダイオードとよぶ。降伏電圧に近いバイアス電圧下において、荷電キャリアがバンドギャップよりも大きな運動エネルギーを獲得すると、衝突電離により新たな荷電キャリアを発生する。この新たな荷電キャリアもバンドギャップよりも大きな運動エネルギーをもつと、衝突電離の連鎖反応が起こることによりなだれ増倍効果が発生する。増倍率はバイアス電圧を上げて電子と正孔の衝突電離係数の値が開くことで大きくなり、Si アバランシフォトダイオードの場合、100 V のバイアス電圧で 100 倍以上の増倍率が得られる²⁴⁾。しかし、増倍率が高い領域では、それに反比例して遮断周波数が低下するため高速応答性は悪くなる。なお、なだれ増倍効果はショットノイズを増加させるが、フォトダイオード回路において負荷抵抗の熱ノイズが支配的な場合には、出力増加の効果がまさるために S/N 比も改善される²⁵⁾。

ナノフォトダイオードのプラズモンアンテナと似た概念が、フォトコンダクターに適用されている。SOS 基板 (silicon-on-sapphire) とダイポールアンテナをもつ構造

の対にフェムト秒パルスレーザーを照射することにより、サブテラヘルツ～テラヘルツの成分をもつ電磁波の発生および検出が行われている²⁶⁾。アンテナの材料には Ti/Au などが用いられた。サファイア基板は裏面からの光照射を可能にしている。また、この実験では、Si 膜中のキャリア緩和時間を短くするために Ar イオンでダメージを与えている。このような手法は、テラヘルツ波実験に用いられている。

すでに 1980 年代後半からその必要性が強調されてきた光電子集積回路であるが¹⁾、データ伝送のバンド幅拡大への要求から、今後の大きな市場発展が期待される分野になってきた。本稿で解説したシリコンベース光検出器は、シリコンフォトニクスの主要素子として、幅広い分野で使われていくと考えられる。

本研究遂行にあたり、ナノフォトダイオードに関しては石勉、牧田紀久夫、馬場寿夫、野瀬浩一、西研一、岡本大典、牛田淳の各氏にお世話になった。また、研究の機会を与えていただき日頃ご支援いただいている田原修一、中村隆、渡辺久恒、廣瀬全孝、最上徹の各氏に深く感謝します。なお、本研究の一部は、NEDO (新エネルギー・産業技術総合開発機構) の次世代半導体材料・プロセス基盤 (MIRAI) プロジェクトの委託研究として行われた。

文 献

- 1) 林 厳雄：“光電子集積回路 (OEIC) の現状と将来”，電子情報通信学会論文誌 C, **J71-C** (1988) 613-619.
- 2) R. Soref: “The past, present, and future of silicon photonics,” *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **12** (2006) 1678-1687.
- 3) 和田一実, ライオネル C. キマリング：“高度情報社会に向けた Si フォトニクスの将来展望”，*応用物理*, **76** (2007) 141-147.
- 4) 大橋啓之：“表面プラズモンを用いたシリコンフォトダイオード”，*レーザー研究*, **35** (2007) 572-576.
- 5) S. Donati: *Photodetectors, Devices, Circuits, and Applications* (Prentice Hall PTR, New Jersey, 2000).
- 6) J. Wieland, H. Duran and A. Felder: “Two-channel 5 Gb/s silicon bipolar monolithic receiver for parallel optical interconnects,” *Electron. Lett.*, **30** (1994) 358-359.

- 7) U. Hilleringmann and K. Goser: "Optoelectronic system integration on silicon: Waveguides, photodetectors, and VLSI CMOS circuits on one chip," *IEEE Trans. Electron Devices*, **42** (1995) 841-846.
- 8) P. J.-W. Lim, A. Y. C. Tzuen, H. L. Chuang and S. A. S. Onge: "A 3.3 V monolithic photodetector/CMOS preamplifier for 531 Mb/s optical data link applications," *Digest of Technical Papers of ISSCC* (1993) p. 96-97.
- 9) H. Zimmermann, T. Heide and A. Ghazi: "Monolithic high-speed CMOS photoreceiver," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **9** (1999) 254-256.
- 10) J. D. Schaub, R. Li, J. Csutak and J. Campbell: "High-speed monolithic silicon photoreceivers on high resistivity SOI substrates," *J. Lightwave Technol.*, **19** (2001) 272-278.
- 11) S. Y. Chou, Y. Liu and T. F. Carruthers: "32 GHz metal-semiconductor-metal photodetectors on crystalline silicon," *Appl. Phys. Lett.*, **61** (1992) 1760-1762.
- 12) S. Alexandrou, C. C. Wang, T. Y. Hsiang, M. Y. Liu and S. Y. Chou: "A 75 GHz silicon metal-semiconductor-metal Schottky photodiode," *Appl. Phys. Lett.*, **62** (1993) 2507-2509.
- 13) J. D. Schaub, R. Li, C. L. Schow, J. C. Campbell, G. W. Neudeck and J. Denton: "Resonant-cavity-enhanced high-speed Si photodiode grown by epitaxial lateral overgrowth," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **11** (1999) 1647-1649.
- 14) M. K. Emsley, O. Dosunmu and M. S. Ünlü: "High-speed resonant-cavity-enhanced silicon photodetectors on reflecting silicon-on-insulator substrates," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **14** (2002) 519-521.
- 15) 大津元一, 河田 聡, 堀 裕和編: ナノ光工学ハンドブック (朝倉書店, 2002).
- 16) T. Ishi, J. Fujikata, K. Makita, T. Baba and K. Ohashi: "Si nano-photodiode with a surface plasmon antenna," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **44** (2005) L364-L366.
- 17) 大橋啓之, 藤方潤一, 石 勉, 西 研一, 馬場寿夫: "プラズモン共鳴を用いた近接場光増強 Si ナノフォトダイオード", *応用物理*, **74** (2005) 1453-1457.
- 18) J. Fujikata, T. Ishi, K. Makita, T. Baba and K. Ohashi: "Highly efficient surface-plasmon antenna and its application to Si nano-photodiode," *IEEE LEOS Annual Meeting Conference Proceedings*, Montreal, Canada (2006) pp. 476-477.
- 19) K. Ohashi, J. Fujikata, M. Nakada, T. Ishi, K. Nishi, H. Yamada, M. Fukaishi, M. Mizuno, K. Nose, I. Ogura, Y. Urino and T. Baba: "Optical interconnect technologies for high-speed VLSI chips using silicon nano-photodiode," *Digest of Technical Papers and Visual Supplement of ISSCC* (2006) 23.5.
- 20) L. C. Kimerling, L. Dal Negro, S. Saini, Y. Yi, D. Ahn, S. Akiyama, D. Cannon, J. Liu, J. G. Sandland, D. Sparacin, J. Michel, K. Wada and M. R. Watts: "Monolithic silicon microphotonics," *Silicon Photonics*, eds. L. Pavesi and D. J. Lockwood (Springer-Verlag, Berlin, 2004) pp. 89-119.
- 21) J. Fujikata, T. Ishi, K. Makita, T. Baba and K. Ohashi: "LSI on-chip optical interconnection with Si nano-photodiode," *Extended Abstracts of SSDM 2007* (2007) E-3-1.
- 22) J. Fujikata, J. Ushida, D. Okamoto, A. Gomyo, K. Nishi, T. Tsuchizawa, T. Watanabe, K. Yamada, S. Itabashi and K. Ohashi: "Si nano-photodiode with a surface-plasmon antenna for SiON waveguide-integrated structure," *2007 IEEE LEOS Annual Meeting Conference Proceedings* (2007) pp. 929-930.
- 23) D. M. Schaadt, B. Feng and E. T. Yu: "Enhanced semiconductor optical absorption via surface plasmon excitation in metal nanoparticles," *Appl. Phys. Lett.*, **86** (2005) 063106.
- 24) C. A. Lee, R. A. Logan, R. L. Batdorf, J. J. Kleimack and W. Wiegmann: "Ionization rates of holes and electrons in silicon," *Phys. Rev.*, **134** (1964) A761-A773.
- 25) 高宮三郎: "光検出器と材料", *光エレクトロニクス*, 日本材料科学会編 (裳華房, 2000) p. 63.
- 26) P. R. Smith, D. H. Auston and M. C. Nuss: "Subpicosecond photoconducting dipole antennas," *IEEE J. Quantum Electron.*, **24** (1988) 255-260.

(2007年10月19日受理)