

表面プラズモンアンテナを利用した Si ナノフォトダイオード

藤方 潤一^{*,**}・大橋 啓之^{*,**}・最上 徹^{**}

Si Nano-Photodiode with Surface-Plasmon Antenna

Junichi FUJIKATA^{*,**}, Keishi OHASHI^{*,**} and Toru MOGAMI^{**}

We studied the surface plasmon (SP) resonance effect on Si nano-photodiode (PD) characteristics for future optical interconnections on LSI chips. We designed an SP antenna which converts input light into SP polaritons and localizes light power on the subwavelength area, and developed a very efficient and very fast Si nano-PD which consists of the SP antenna and a small Si absorption layer. We also developed a waveguide-integrated Si nano-PD with an SP antenna for on-chip optical clock distribution. The interfacial periodic nano-scale metal-semiconductor-metal Schottky electrodes were shown to function as an SP optical antenna and also as an optical coupler between a SiON waveguide and a very thin Si-absorption layer. A very high speed response as well as enhanced photoresponsivity was achieved for a 10- μm coupling length. By using this technology, we fabricated a prototype of a large-scale-integration (LSI) on-chip optical clock system and demonstrated 5 GHz of optical clock circuit operation connected with a 4-branching H-tree structure.

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

ユビキタス情報社会を実現するため、ネットワークと情報処理技術の融合が進展してきている。情報システムを支える基本となる超大規模集積回路 (VLSI) においては、Si を主体とした CMOS (complementary metal oxide semiconductor: 相補型金属酸化膜半導体) 技術が著しく発展してきており、スケーリング則に基づく素子や配線の微細化により、高集積および高機能化、高速化が行われてきている。一方、光を用いた超高速伝送は、電気配線における回路遅延や伝送ロス、クロストークなどの問題を回避でき、波長多重化による大容量化が可能なことから、世界のどこからでも瞬時に情報交換することを可能とする技術へと成長してきている。これら進展がめざましい LSI 技術と超高速光伝送技術を融合させることを目的として、CMOS 技術と整合のとれる低コストな光配線技術である Si フォトニクスが、将来の LSI 技術における消費電力や伝送速度の限界を打破し、新しい機能性を生み出す技術として注目を

集めてきている¹⁻⁶⁾。

Si フォトニクスを構成するキーコンポーネントとしては、光導波路、発光素子、光変調素子、受光素子などが挙げられる。今回報告する受光素子 (フォトダイオード) に関しては、従来の光通信においては化合物半導体を用いたものが一般的である⁷⁾。10 Gbit/s 程度の伝送速度の光通信には、InGaAs を吸収層とするアバランシフォトダイオード (avalanche photo diode; APD) や GaAs を用いた pin 型フォトダイオード (pin-PD) などが用いられるが、Si フォトニクスが目指している CMOS 技術との整合性および低コスト化などの点で問題がある。一方、Si は間接遷移型の半導体であり、化合物半導体と比較して光吸収効率が 1 桁程度低いことが効率を高める上で問題となる。

さらに、フォトダイオードの応答速度を律速する因子としては、光吸収により生成されたフォトキャリア (電子-正孔対) の移動時間と光吸収層 (空乏層) の電気容量が挙

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

** MIRAI-Selete (〒305-8501 つくば市御幸が丘 34)

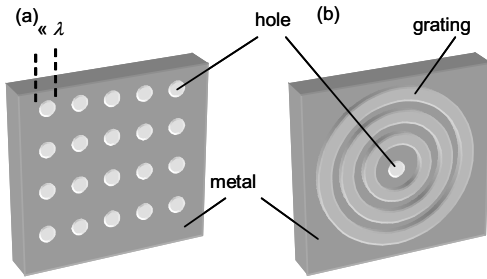


図1 表面プラズモンエンハンス構造. (a) ホールアレイ構造, (b) ブルズアイ構造.

げられる⁸⁾. すなわち、キャリアの移動時間を短くするためには、光吸収層を薄くする必要があるが、これによる電気容量の増大を軽減するため接合面積の低減が行われるのが一般的である. したがって、高速性を実現するためには光吸収層を小さくする必要があり、高速性と感度特性はトレードオフの関係にある.

筆者らは、この量子効率と高速性の両立がきわめて困難とされる Si を吸収層に用いたフォトダイオードにおいて、表面プラズモンによる近接場増強効果を利用して、電極と半導体との界面に光を閉じ込め、さらに波長以下の領域に集光することを実現した. これにより、高感度化と高速化の新しい概念であるナノフォトダイオードの可能性を検討した結果について報告する. さらに、LSI 上への光配線の適用例として、Si ナノフォトダイオードを用いたオンチップ光クロック配信実証に関しても報告する.

1. 表面プラズモンアンテナに関して

表面プラズモンによる光透過率増大効果は、1998 年に Ebbesen らにより初めて報告された⁹⁾. 従来、光学の分野では、表面プラズモン共鳴による光吸収やこれに伴う近接場増強などが報告されているが^{10, 11)}、波長以下の微小開口を透過するエバネセント波の強度が表面プラズモンにより増大することは、1944 年に報告された Bethe による aperture theory で予測される理論値を大きく打破する現象であり、画期的な発見であると紹介された¹²⁾. 図1は、表面プラズモン共鳴により光透過率増大効果が現れるとして報告されている典型的な構造を示したものである. 図中 (a) は微小開口をアレイ状に配列したホールアレイ (hole array) とよばれる構造であり、(b) は微小開口の周囲にプラズモン共鳴を生じさせる金属グレーティング構造を形成した構造で、弓矢的と似ていることからブルズアイ構造とよばれる構造である. ホールアレイ構造については、すでに数多くの理論解析および実験結果が報告されているため詳細は割愛するが、表裏のプラズモン共鳴モードが微小

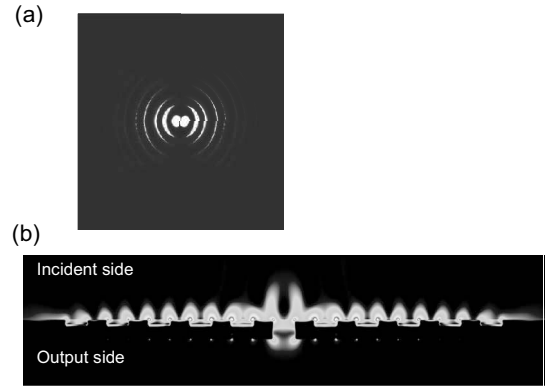


図2 ブルズアイ構造における (a) アンテナ表面の電界強度分布, (b) 断面の電界強度分布.

開口におけるエバネセント波を介して結合している点が重要である. したがって、高い光透過率を得るためには、表裏のプラズモン共鳴モードが同じ周波数および位相で生じること、すなわち表裏が対称な構造をしていることが理想である.

一方、ブルズアイ構造に関しては、表裏のグレーティングの機能という観点でプラズモン共鳴による光透過率増大効果をとらえることが可能である. 図2は、有限差分時間領域法 (finite-difference time-domain method; FDTD 法) を用いて、ブルズアイ形状における共鳴状態を計算した例である. 図中、(a) はアンテナ表面の電界強度分布、(b) は断面の電界強度分布を示したものである. 同心円状のグレーティング形状は、入射光を表面プラズモンポラリトンとしてグレーティングに結合させる機能と、これを中心部に集光するレンズ機能を有する. また、微小開口部に集光された表面プラズモンポラリトンは、微小開口部のエバネセント波を介して裏側に伝わり、さらに裏側のグレーティングによりブラッグ反射されて伝播モードにつながるようになる. このとき裏側のグレーティング構造は伝播光の指向性に寄与し、プラズモン共鳴モードの位相を制御することにより、beaming とよばれる指向性のある透過光を生じさせる機能がある. これはグレーティングに垂直入射された光が表面プラズモンポラリトンに変換されるプロセスと同じメカニズムで、逆のプロセスが裏側で生じているものととらえることが可能である.

2. 面入射型フォトダイオード¹³⁾

図3にナノフォトダイオードの断面模式図を示す. Si ナノフォトダイオードは基本的に以下の3つの部分からなる. (1) 中心部に形成されたショットキー接合電極としての機能と、入射光を表面プラズモンポラリトンに変換して集光するプラズモンアンテナとしての機能を兼ね備えた表

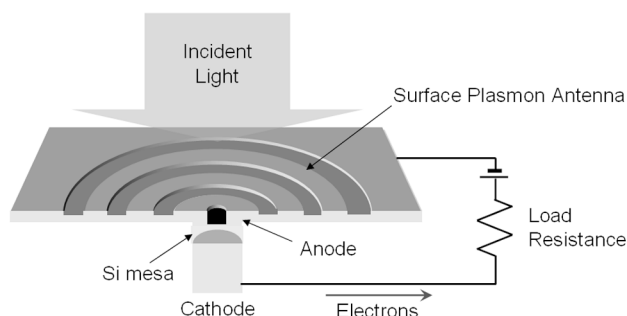


図3 ナノフォトダイオードの断面模式図¹³⁾。

面金属電極、(2) 光を吸収してフォトキャリアを生成するSiメサ構造、(3) オーミックコンタクト電極。表面プラズモンアンテナは、波長以下のサイズの微小開口と周囲に同心円状のグレーティング構造を有する。Siメサは表面プラズモンアンテナの下にショットキー接合を介して配置されている。また、ショットキー接合の面積は、表面プラズモンアンテナの微小開口部とほぼ同じ大きさである。

ナノフォトダイオードに入射した光は、まず同心円状に配置された金属グレーティングにより表面プラズモンに変換され、中心部に集光される。集光された表面プラズモンは、微小開口部においてエバネセント波を介して出射端において散乱され、強い近接場光を発生することとなる。表面プラズモンには、本質的に電子-フォノン散乱に起因する抵抗損失（オーミック損失）が存在することが知られており、電場強度が $1/e$ になるまでの時間が伝播寿命として定義される。したがって、ナノフォトダイオードを高効率化するためには、プラズモンの寿命以下の時間内に半導体内に染み出した電場成分がフォトキャリアを生成する必要がある。今回検討した850 nmの波長においては、表面プラズモンによるオーミック損失に比較してSi半導体における吸収係数が1桁以上大きいことを計算により確認している。

図4は作製したナノフォトダイオードの概念図と作製したプラズモンアンテナの走査型電子顕微鏡（SEM）写真、およびプラズモンアンテナ形成前のSiメサ構造の断面のSEM写真である。実験に用いた構造においては、表面プラズモンアンテナはSi基板上に厚さ200 nmのAg膜が積層され、さらに周期560 nm、深さ50 nmの同心円状グレーティングが形成されている。また、保護膜としてSiO₂膜が積層されている。中心部の微小開口径は300 nmであり、この下にSiメサとショットキー接合を形成するために10 nmのCr膜が配置されている。

表面プラズモンポラリトンの分散関係は以下の式で表され、SiO₂/Ag界面における表面プラズモンポラリトンの実

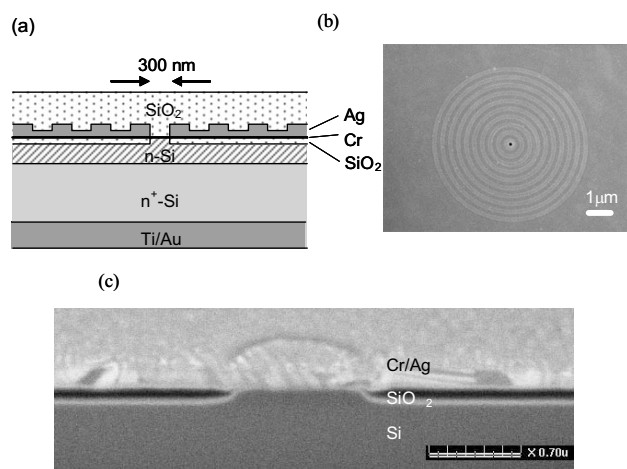


図4 (a) 作製したナノフォトダイオードの概念図、(b) プラズモンアンテナのSEM写真、(c) プラズモンアンテナ形成前のSiメサ構造断面のSEM写真¹³⁾。

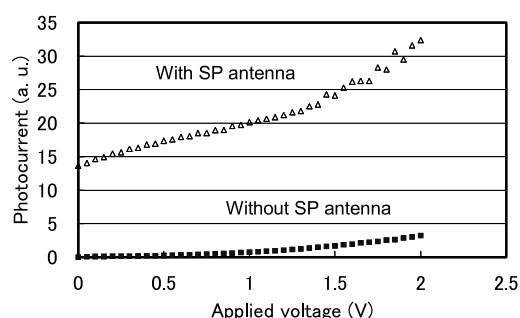


図5 プラズモンアンテナがある場合とない場合のフォトカレントの逆バイアス電圧依存。

効屈折率は約1.50と見積もられる¹⁰⁾。

$$n_{\text{eff}} = (\epsilon_m \cdot \epsilon_d / \epsilon_m + \epsilon_d)^{1/2} \quad (1)$$

ここで、 n_{eff} は実効屈折率、 ϵ_m は金属の誘電率、 ϵ_d は金属に隣接する誘電体の誘電率である。

したがって、560 nmの周期のグレーティングを用いた場合、表面プラズモンの共鳴波長は約840 nmである。

次に、上記構造のナノフォトダイオードの光応答特性を紹介する。図5は波長840 nm、強度1 mWの光を2~3 μmに絞って照射したときのフォトカレントの逆バイアス電圧依存を、表面プラズモンアンテナがある場合とない場合について比較したものである。プラズモンアンテナを利用することによって、出力電流が数十倍にまで増強されていることがわかる。これは表面プラズモンによって増強された近接場光が、Si中で生成されるフォトキャリアを大幅に増加させていることを示している。また、低バイアスな電圧においても大きなフォトカレントが得られており、電極近傍の局所領域に閉じ込められた近接場光を利用することで、低電圧での動作が可能な高感度なナノフォトダイオードが得られることが確認された。

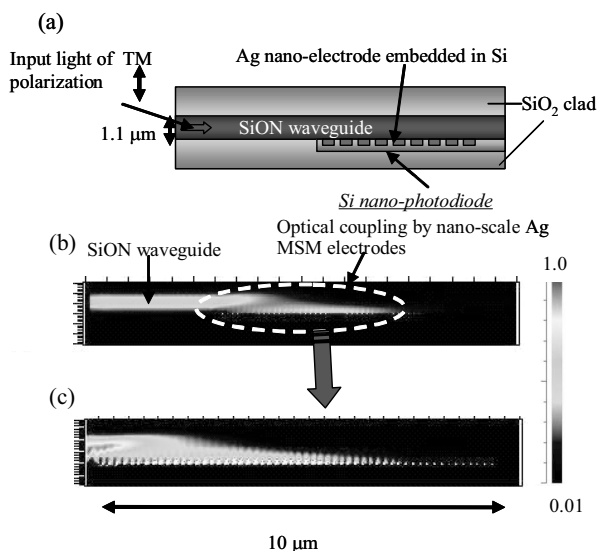


図6 (a) 導波路結合 Si ナノフォトダイオード断面図, (b) (c) 850 nm 波長の TM 波を SiON 導波路に入力したときの光パワー分布および電場分布¹⁴⁾.

上記に示した素子に関しては、光吸収領域の直径は 300 nm で、空乏層の厚さは 200 nm 程度である。したがって、ショットキー接合容量は 0.1 fF 以下であると見積もられる。一方、フォトキャリアのドリフト速度を 10^7 cm/s と考えると、空乏層を走行するのに必要な時間は数 ps となり、周波数応答として 80 GHz 程度が予測される。

3. 導波路結合型フォトダイオード¹⁴⁾

LSI 上での光配線を実現するためには、光導波路と高効率に光結合する導波路結合タイプのフォトダイオードを開発する必要がある。また、高集積化のためには、小型でありかつ低消費電力である必要がある。

LSI 上での光配線として低損失な SiON 光導波路を開発し¹⁵⁻¹⁸⁾、これと高効率に光結合する Si ナノフォトダイオードについて検討した。導波路結合型 Si ナノフォトダイオードの断面図を図 6 (a) に示す。Ag からなるナノスケールの MSM (metal-semiconductor-metal) 電極構造に関して、FDTD 法による電磁界シミュレーションおよび実験により検討した。240 nm 厚の Si 吸収層表面に幅 90 nm、厚さ 30 nm の Ag 電極からなる周期構造を埋め込んで形成し、これを SiON 導波路と Si 光吸収層との界面に配置した。850 nm 波長の TM 波を SiON 導波路に入力したときの光パワー分布および電場分布を光導波方向の断面図として示す (図 6 (b), (c))。SiON 導波路コアと Si 吸収層界面に挿入した周期的な Ag-MSM 電極により、SiON 導波路中を伝播する光が効率的に回折され、表面プラズモンの共鳴モードである vertical mode および horizontal mode が励起

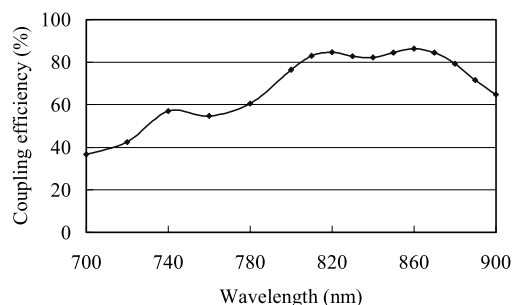


図7 導波路結合型 Si ナノフォトダイオードの光結合効率の入射光波長依存性¹⁴⁾.

されている。これにより約 85% の光パワーが 240 nm と非常に薄い Si 光吸収層中に光結合される計算結果を得ている。

図7は導波路結合型 Si ナノフォトダイオードの光結合効率の入射光波長依存性である。Si ナノフォトダイオードは比較的広い波長範囲において受信感度を有しており、これは Si 光吸収層に埋め込んで形成された Ag ナノ電極による表面プラズモン共鳴ピークが Si による光吸収により広がっているためであると考えられる。780~900 nm の比較的広い波長範囲において、60% 以上の光結合効率が得られている。

実際に作製した導波路結合型 Si ナノフォトダイオードの光学顕微鏡写真および Ag-MSM 電極の SEM 写真を図 8 (a) および (b) に示す。Si ナノフォトダイオードは n-type の SOI (silicon-on-insulator) 基板上に形成され、光結合長が 10 μm 程度となるように LOCOS (local oxidation of silicon) プロセスにより Si メサ構造が形成されている。さらに、EB (electron beam) リソグラフィによるレジストマスクを利用して Ag-MSM 電極を形成した。さらに、この上に低温プロセスにより SiON コアおよび SiO₂ からなる上クラッド層を形成した。

図 8 (c) は作製した Si ナノフォトダイオードの光応答特性である。850 nm 波長、1.6 mW のレーザー光を SiON 導波路端面から入射させることにより、約 10% の量子効率を得られ、TE 波に比較して 2~3 倍のフォトカレントが得られている。すなわち、表面プラズモン共鳴により SiON 導波路と Si 光吸収層との間の近接場光結合がエンハンスされていると考えられる。また、10 μm の光結合長はデバイスの電気容量として 4 fF に相当し、従来のフォトダイオードに比較して 1 桁程度小さい値となっている。これにより、光源パワーの大幅な削減も可能であると考えられる⁶⁾。

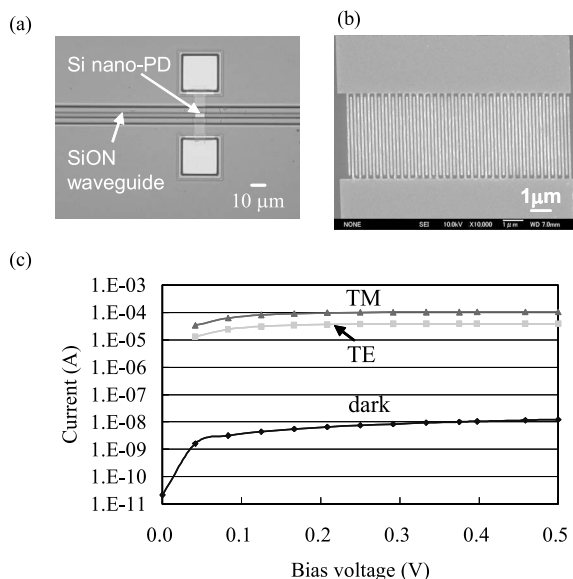


図8 (a) 導波路結合型 Si ナノフォトダイオードの光学顕微鏡写真, (b) Ag-MSM 電極の SEM 写真, (c) 光応答特性¹⁴⁾.

4. オンチップ光配線への応用¹⁴⁾

次に Si ナノフォトダイオードのオンチップ光配線への適用例を紹介する. 図9 (a) に光クロック配信用に作製した光チップの写真を示す. 入力光パワーは 1×2 MMI (multi-mode interference) の2段カスケードにより4つの出力ポートに分配され, 末端に配置された4つの Si ナノフォトダイオードに光結合されている. 図9 (b) および (c) に, Si ナノフォトダイオードに 1 V の dc バイアスを印加したときの過渡応答出力波形と出力半値幅の dc バイアス電圧依存性を示す. この実験において, 780 nm 波長のチタンサファイアレーザにより半値幅 2 ps 以下の光クロック信号を入射して, 65 GHz バンド幅のサンプリングオシロスコープにより, Si ナノフォトダイオードからの出力波形をモニターした. 出力半値幅は 1 V バイアスのとき 17 ps であり, dc バイアスの上昇により検出器の限界である 15 ps 程度に飽和した. すなわち, Si ナノフォトダイオードは, CMOS 回路と整合可能な比較的低いバイアス電圧の場合でも高速に動作することがわかる.

最後にオンチップ光クロック配信の実証実験に関して紹介する. 図10 (a) および (b) に作製した LSI 上光クロック実証チップの写真と接続構造の断面 SEM 写真を示す. 光チップは LSI と電気的に接続されており, 光チップに形成された Cu ビアおよび半田バンプを介して LSI とチップ積層されている. 図10 (c) はオンチップクロック配信のトランスインピーダンスアンプの回路図である. Si ナノフォトダイオードからのフォトカレントは, この TIA (trans-impedance amplifier) 回路により電圧信号に変換さ

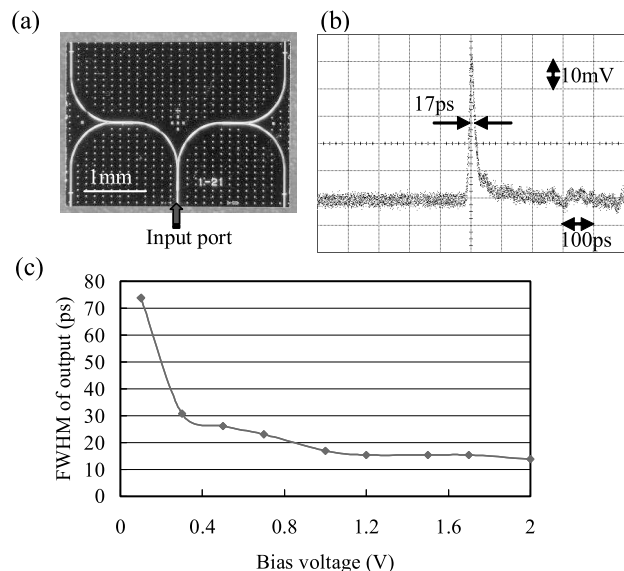


図9 (a) 光クロック配信用に作製した光チップの写真, (b) 1 V の dc バイアスを印加したときの過渡応答出力波形, (c) 出力半値幅の dc バイアス電圧依存性¹⁴⁾.

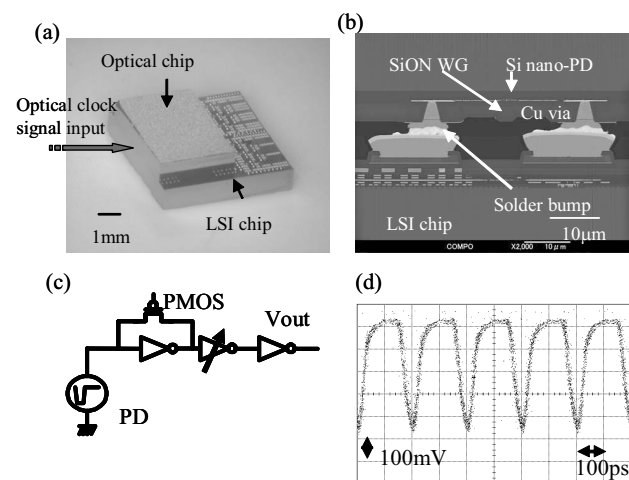


図10 (a) LSI 上光クロック実証チップの写真, (b) 接続構造の断面 SEM 写真, (c) トランスインピーダンスアンプの回路図, (d) 5 GHz の光信号を導入したときの LSI からの出力波形¹⁴⁾.

れて出力されることになる. 図10 (d) は 5 GHz の光信号を上記光クロック実証チップに導入したときの LSI からの出力波形である. 光信号は 850 nm 波長, 4 mW 出力の CW 光源からの光をニオブ酸リチウムからなる外部光変調器により変調した, 5 GHz の出力信号は 4 分岐構造を有する LSI オンチップ光クロック配線構造において得られており, 将来のオンチップ光インターコネクタへの適用が期待される.

VLSI において基本となる Si-CMOS 技術と融合した Si フォトニクス概念をさらに発展させた, 新しいコンセプト

トからなる Si ナノフォトダイオードに関して紹介した。表面プラズモンアンテナを利用して波長以下のサイズに光エネルギーを閉じ込め、これを近接場光として Si 中に導入することにより、従来困難とされた Si フォトダイオードの高速化および高効率化の両立が実現可能なことを示した。さらに、増強された近接場光の Si 中への浸入長はきわめて小さく、非常に低いバイアス電圧により高速に光電変換が可能となることが明らかとなった。また、LSI 上の光配線と集積化可能な導波路結合型 Si ナノフォトダイオードを開発し、その小型・高速動作を実証するとともに、TIA 回路を内蔵した LSI とチップ接続することにより、光クロック配信への応用を実証した。本デバイスにより、近接場光を利用したナノフォトニクスが将来 LSI に新しい機能性をもたらす先駆けとなることを期待するとともに、さらなる高性能化とエレクトロニクスとの融合について検討していく予定である。

本研究遂行にあたり、ナノフォトダイオードに関しては、NEC 石勉、岡本大典、牧田紀久夫、馬場寿夫、野瀬浩一、西研一、牛田淳、NTT 土澤泰、渡辺俊文、山田浩治、板橋聖一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、多大なご支援をいただいた田原修一、中村隆宏、渡辺久恒、廣瀬全孝の各氏に深く感謝いたします。

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) 和田一実, ライオネル・キマリング: “Si-LSIs とマイクロフォトニクス”, 応用物理, **68** (1999) 1034-1037.
- 2) K. Wada, H.-C. Luan, D. R. C. Lim and L. C. Kimerling: “On-chip interconnection beyond semiconductor roadmap: Silicon microphotronics,” *Proc. SPIE*, **4870** (2002) 437-443.
- 3) G. T. Reed and A. P. Knights: *Si Photonics* (John Wiley & Sons, Chichester, 2004).
- 4) D. A. B. Miller, A. Bhatnagar, S. Palermo, A. Emami-Neyestanak and M. A. Horowitz: “Opportunities for optics in integrated circuits applications,” *International Solid-State Circuits Conference (ISSCC) Digest of Technical Papers* (2005) 86-87.
- 5) J.-F. Zheng, F. H. Robertson, E. Mohammed, I. Young, D. Ahn, K. Wada, J. Michel and L. C. Kimerling: “On-chip optical clock signal distribution,” *Tech. Dig. OSA Topical Meeting on Optics in Computing* (2003) p. 20.
- 6) 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-photonics,” *International Solid-State Circuits Conference (ISSCC) Digest of Technical Papers* (2006) 1686-1695.
- 7) 吉國裕三: “発受光素子用光半導体総論”, 応用物理, **74** (2005) 766-770.
- 8) S. Donati: *Photodetectors* (Prentice Hall PTR, New Jersey, 1999).
- 9) T. W. Ebbesen, H. J. Lezec, H. F. Ghaemi, T. Thio and P. A. Wolf: “Extraordinary optical transmission through sub-wavelength hole arrays,” *Nature*, **391** (1998) 667-669.
- 10) H. Rather: *Surface Plasmons on Smooth and Rough Surfaces and on Gratings* (Springer-Verlag, Berlin, 1988).
- 11) R. W. Wood: “Anomalous diffraction gratings,” *Phys. Rev.*, **48** (1935) 928-936.
- 12) R. Sambles: “Photonics: More than transparent,” *Nature*, **391** (1998) 641-642.
- 13) 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.
- 14) J. Fujikata, K. Nose, J. Ushida, K. Nishi, M. Kinoshita, T. Shimizu, T. Ueno, D. Okamoto, A. Gomyo, M. Mizuno, T. Tsuchizawa, T. Watanabe, K. Yamada, S. Itabashi and K. Ohashi: “Waveguide-integrated Si nano-photodiode with surface-plasmon antenna and its application to on-chip optical clock distribution,” *Appl. Phys. Express*, **1** (2008) 022001.
- 15) A. Gomyo, J. Ushida, J. Fujikata, D. Okamoto, K. Nishi, K. Ohashi, T. Tsuchizawa, T. Watanabe, K. Yamada and S. Itabashi: “Low optical propagation-loss SiON/SiO₂ waveguides around 800-nm wavelength,” *Ext. Abst. Jpn. Soc. Appl. Phys.* (2007) 7p-R-2.
- 16) T. Tsuchizawa, K. Yamada, H. Fukuda, T. Watanabe, J. Takahashi, M. Takahashi, T. Shoji, E. Tamechika, S. Itabashi and H. Morita: “Microphotonic devices based on silicon micro-fabrication technology,” *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **11** (2005) 232-240.
- 17) J. Ushida, A. Gomyo, J. Fujikata, D. Okamoto, K. Nishi, K. Ohashi, T. Watanabe, T. Tsuchizawa, K. Yamada and S. Itabashi: “A study on the design and properties of an SiON/SiO₂ waveguide: The effect of the substrate on propagation loss,” *Ext. Abstr. Solid State Devices and Materials* (2007) p. 278.
- 18) T. Tsuchizawa, K. Yamada, T. Watanabe, H. Fukuda, S. Itabashi, J. Ushida, A. Gomyo, J. Fujikata, D. Okamoto, K. Nishi and K. Ohashi: “Low-loss silicon oxynitride waveguides and branches for the 850-nm-wavelength region,” *13th Micro-optics Conf. Proc.* (2007) p. 60.

(2010 年 9 月 27 日受理)