表面プラズモンを用いたシリコンフォトダイオード

大橋 啓之^{1,2}

¹日本電気(株) ナノエレクトロニクス研究所 (〒305-8501 茨城県つくば市御幸が丘34番地)

²(株)半導体先端テクノロジーズ (〒305-8501 茨城県つくば市御幸が丘34番地)

Silicon Photo-Diode Using Surface-Plasmon Resonance

Keishi OHASHI^{1,2}

¹NEC Corporation, Nano Electronics Research Labs, 34 Miyukigaoka, Tsukuba, Ibaraki 305-8501

²Semiconductor Leading Edge Technologies, Inc. 34 Miyukigaoka, Tsukuba, Ibaraki 305-8501

(Received May 9, 2007)

The concept of nano-photodiode, employing surface-plasmon antenna to create sub-wavelength size near-field, is described in relation to silicon photonics. Response time of the prototype silicon nano-photodiode was much shorter (~ 20 ps) than that of conventional silicon photodiodes (> 1 ns). There are two reasons for the high-speed response: short distance between electrodes (~ 100 nm) and small electrode area ($< 1 \mu\text{m}^2$). The former is realized by lapping near-field region over depletion region (Schottky barrier) in silicon thereby eliminating time-consuming carrier diffusion process. The latter results in small electrode capacitance and thus reducing response time of the photodiode circuit. This nano-photodiode technology can be applied to other semiconductor materials such as germanium and ternary compound semiconductors.

Key Words: Photodiode, Surface-Plasmons, Near-field, Silicon photonics, Optical interconnect

1. シリコンフォトンクスと光素子

シリコンフォトンクスは、大規模半導体集積回路(LSI)に適した量産性の優れた製造プロセスにより高度な光集積回路を低コストに実現することを目標としている^{1,2)}。ここで必要とされる基本素子は、光源、光導波路およびそれを用いた各種光回路、電気光変換(変調器)と光電気変換素子(受光器)およびそれらの周辺回路である。光導波路の材料は光の吸収が少ない低損失材料でなければならない。一方、光電変換は光を速やかに吸収し効率よく電流に変える材料を必要とする。Siのバンドギャップは1.12 eVであり、可視光および波長850 nm以下の短波長近赤外に対してSiは光の吸収体として働く。一方、光通信等で利用される波長1300-1550 nm付近およびそれより長い波長の光に対しては、Siは吸収が少なく透明である。このようなSiの光物性から、シリコンフォトンクス実現に当たってはFig. 1に示すような次の二つのアプローチが考えられる。一つは、光源の波長を1300-1550 nmとして光導波路にSiを用い、受光器にはGeや化合物半導体を用いる長波長型である。もう一つは、光源の波長を700-850 nmとして光導波路にその波長で透明なSiO₂やSiONなどを用い、受光器にはSiを用いる短波長型である。具体的なシリコンフォトンクス実現方法としては、市販のSOI基板(Si基板上に絶縁層のSiO₂、さらにその上にSi層を持つSilicon-On-Insula-

tor基板)を用いてシリコン導波路を形成するのが一般的である。長波長型でGe受光器を導入する場合は基板を部分的にGOI(SOIの上部Si層をGeにしたもの)にする必要がある。短波長型では導波路をSiONのデポジションなどにより形成する必要がある³⁾。

光源の種類として、現在得られるシリコン光源は発光効率が低いため、実用的には化合物半導体を用いた外部光源が考えられている。電子回路が外部電源を用いるのと同様に外部光源からの光を電気信号で変調する。長波長型の変調器としては、Si-CMOSプロセスで製造可能なキャリアプラズマ型(光導波路の一部であるSi内のキャリア濃度を電圧制御で変化させて屈折率を変える)の開発に力が入れている⁴⁾。短波長型では電気光学材料を用いた変調器の開発が必要となる。Si基板上に電気光学材料を製膜するために、Si上でのエピタキシャル成長が可能なものおよびエピタキシャル成長不要な電気光学ポリマーあるいは結晶配向がランダムなナノ結晶セラミクスなどが検討されている。後者の例として著者らはエアロゾルデポジション法を用いたPLZT(ランタンドープチタン酸ジルコン酸鉛)膜を開発している⁵⁾。

IEEEではこの分野においてGroup IV Photonics会議を2004年から開催している。Group IVは周期律表の第IV族(IUPACの表記では14族)のことで、SiだけでなくGe(やC)も念頭に置いたフォトンクスという意味でGroup IV

Fig. 1 (a) Optical device materials for long wavelength region and (b) for short wavelength region.

Photonicsと呼ばれる。今年度のこの学会GFP 2007は9月に東京で開催されている。

2. 受光材料としてのSiとGe

Siは光の吸収係数が低い。これは吸収時における電子の状態遷移が間接的でありフォノンによる運動量の変化を伴うため吸収に時間がかかることと結びついている。Geも運動量変化を伴う間接遷移型半導体に分類されているが、バンド構造がSiとは少し異なり直接遷移型半導体とほとんど同じ高速な状態遷移が可能になっている。このことから、高速受光素子材料としてGeはSiよりも優れていると言えることができる。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困難を伴う。例えば、Ge表面にできる酸化物は化学的にも熱力学的にも不安定であり、さらに界面に多数の貫通転位が存在しリーク電流の原因となっている。Geのバンドギャップは0.8 eV近辺にあり、Siの光導波路と組み合わせて近赤外の受光材料として用いることができる。特に、Si上に形成されたGeは大きな歪を持ち、バンドギャップが縮むことにより光通信の波長帯域に十分対応する1600 nm近辺までの応答が可能となり長波長型に対応させることができる。

一方、Siを光電変換に用いる際には、低い吸収係数を補うため光を吸収する長さを十分大きく(10 mm以上)とる必

要がある。その結果、Siフォトダイオードの動作速度は通常1 GHz程度までであった。動作速度を制限する要因は、電極間隔(発生した電荷キャリアのドリフト時間に比例)と、接合容量(光電流が電圧を作り出すのに要する時間に比例)である。前者に関しては、ブラッグ反射による光の閉じ込めを利用することが行われており、特定の共鳴波長で有効であるが、温度依存性が大きいという問題がある。後者については、レンズによる集光で受光面積を小さくしてフォトダイオードの接合容量を減らすことなどが行われている。

3. 近接場光と表面プラズモン

通常、光を一点に集めようとしてもそのスポットは回折現象によって波長程度の広がりを持つ。光をこの回折限界より小さく絞る方法として、屈折率の高い材料からのエバネッセント場や、微小な穴や散乱体からの近接場を利用する方法などがある⁶⁾。特に後者は、穴の径や散乱体の曲率半径程度の広がりを持つ近接場が比較的自由に得られることから、極微細光素子の実現に有効な手段となる。近接場光は一般には微弱であるが、表面プラズモンを利用することで使いやすいレベルに強めることができる。

3.1 格子状の穴の配列を通りぬける光

英科学誌ネイチャーの1998年2月12日号に「透明以上」というタイトルの解説記事がでた。この記事は、波長より小さな穴を光が通り抜けるというT. W. Ebbesenらの論文⁷⁾を紹介したものである。これは、金属膜に波長より小さな穴を周期的に開けた時に、特定の波長の光が穴一個の場合の何十倍も強く透過する、という現象の発見についての論文である。この時、穴の面積で規格化した透過光強度は入射光強度よりも強くなる場合があり、従来の常識と異なるように見えることから人々の興味を惹いた。Ebbesenらは、透過光の増強現象が起こる周波数が穴の周期から予想される表面プラズモンの共鳴周波数とほぼ一致することから、表面プラズモンが透過光を増強していると考えた。

この現象を、シミュレートした結果⁸⁾をFig. 2に示す。この図では、穴を配列した厚さ300 nmのAg膜の下側から光を入射している。穴の直径は200 nm、ピッチは600 nmで正方配列されている。ここでは特定の瞬間における反射光と透過光およびAg膜近傍の近接場の電界強度が示されており入射光は描かれていない。(a)は入射光の波長が700 nmの場合、(b)は637 nmの場合である。通常は(a)に示すように光はほとんど透過しない。ところが波長637 nm付近の光については(b)の図のように大部分が透過する。これがEbbesenの発見した現象である。右側の図において穴から縦に伸びた縞は近接場に対応するもので伝播成分ではない。上方向に出る横縞が透過光に対応する。右側では金属表面からわずかに光が侵入しているのが見える。これが金属表面電荷と光が結合した状態である表面プラズモンに対応している。

Fig. 2 (a) Intensity of light around a perforated silver film calculated using 3-D finite-difference time-domain (FDTD) method when the wavelength of the incident light is 700 nm, and (b) when it is 637 nm.⁸⁾

3.2 単一穴と周期的な凹凸

透過光の増強は、格子状に配列した穴だけでなく、単一の穴でも可能である⁹⁾。たとえば、波長より小さな穴の周りに同心円状の凹凸を設けた構造がその例である (Fig. 3)。この構造における透過光増強の効果を調べるため、Ag膜に直径200 nmの穴を開けた試料について、周囲に同心円状の共鳴機構がある場合とない場合とを比較した¹⁰⁾。Ag膜の厚さは溝の部分でも光が透過しないように300 nmとし、溝の周期は750 nmとした。

Fig. 4に示すような金属膜表面を伝播する表面プラズモンの分散式は次式で表される¹¹⁾：

$$k_{sp} = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\epsilon_m \epsilon_d}{\epsilon_m + \epsilon_d}} \quad (1)$$

ここに、 k_{sp} は表面プラズモンの波数ベクトル、 ω は入射光の振動数、 c は真空中の光速、 ϵ_m は金属の誘電率、 ϵ_d は誘電体(または空気)の誘電率を表す。真空中の波数 ω/c と比較することにより表面プラズモンの等価屈折率は $(\epsilon_m \epsilon_d / (\epsilon_m + \epsilon_d))^{1/2}$ と考えることができる。したがって、上記溝の

Fig. 3 Plasmon antenna with concentric-ring-type structure on silver film.

Fig. 4 The electric charges and the electromagnetic field of surface plasmons propagating on a surface.

周期とから予想される表面プラズモンの共鳴波長は790 nmとなる。

波長以下の単一穴を透過する光の強度を測定した結果をFig. 5(穴のみ)とFig. 6(穴の周囲に同心円状の凹凸)に示す。図の縦軸は透過光の強度を表す。穴の直径は同じ200 nmであるが、穴の周囲にリング状の凹凸による表面プラズモン共鳴機構(以下プラズモンアンテナと呼ぶ)を設けることにより穴を透過する光の強度は大幅に増加し、この場合はプラズモンアンテナのない場合に比べ平均125倍の

Fig. 5 Intensity spectra of light transmitted from a single hole with no enhancement structure. The solid line shows the average value of the data from six samples. The dashed lines show the maximum and the minimum of the data.

Fig. 6 Intensity spectra of light transmitted from a hole with an enhancement structure. The solid line shows the average value of the data from five samples. The dashed lines show the maximum and the minimum of the data. Note that the measurement scale is not the same as that of Fig. 5.

増強が見られる。増強の程度はプラズモンアンテナの形状や構造により大きく変化する。

4. ナノフォトダイオード

超小型で広帯域動作が可能な光電変換素子として著者らはシリコンナノフォトダイオードを開発した^{12,13)}。このフォトダイオードは、*BritePoint*TMと呼ばれる表面プラズモン共鳴を用いた近接場光増強技術を利用している (Fig. 7)。吸収係数の小さいシリコンを用いたフォトダイオードを高速化するために、ブラッグ反射層を設けて電極間隔を小さくすることが試みられている¹⁴⁾。これに対し、シリコンナノフォトダイオードでは、前項で述べたプラズモンアンテナを設けることでシリコン内に発生させた近接場光を利用する。プラズモンアンテナと電極は同一部材にするかまたは一体化した構造にされている。これにより、表面プラズモンが減衰する前にキャリア空乏層 (この場合シリコンが電極に接した箇所に生ずるショットキー領域) のみで効率良くフォトキャリアを発生させることで光電流を得ることが可能になる。この時、高速化の妨げとなる拡散電流の寄与は極めて小さくまたはゼロにすることが可能である。近接場のサイズは表面プラズモン共鳴機構の穴と同程度にできることから、レンズで絞ることでは実現不可能な100 nmのオーダーにまでシリコンのサイズを小さくすることができる。したがって、ナノフォトダイオードにおいては、電極間隔だけでなく電極面積も極めて小さなものにすることが可能である。以上の効果により、シリコンナノフォトダイオードの応答速度は極めて速いものにできる。実際、試作したシリコンナノフォトダイオードで50 GHz以上という極めて高速な応答が可能になることが確認されている¹⁵⁾。また、電極間をほとんどショットキー領域にできることから、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ポテンシャル勾配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ことが報告されている¹⁵⁾。

ナノフォトダイオードが低電気容量であることは、フォトダイオードの動作に必要な光源の電力を大幅に低減することも可能にする。Fig. 8に示すフォトダイオードの回路において、フォトダイオードの動作に必要な光源の電力は次式で与えられる¹⁶⁾：

Fig. 7 Small near-field light (*BritePoint*TM) enhanced by surface-plasmon resonance.¹⁶⁾

Fig. 8 Concept of nano-photodiode and equivalent photo-diode circuit.¹⁶⁾

$$P = \frac{hc}{\lambda \eta e \Delta t} (C_{PD} + C_L) V_{dd} \quad (2)$$

ここに、 C_{PD} はフォトダイオードの電気容量、 C_L は負荷容量 (後段CMOSの入力容量)、 λ は入射光の波長、 η は外部量子効率、 V_{dd} は電源電圧を表す。この式を用いてフォトダイオードの電気容量と必要な光源電力の関係を見積もった例¹⁶⁾をFig. 9に示す。フォトダイオードが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ナノフォトダイオードの低電気容量が有効であることがわかる。低電気容量であることはフォトダイオードの高性能化にとって本質的に重要であり、これにより高速応答、低消費電力化を大幅に進めることができる。さらに、接合面積が小さいことは、暗電流の低減にもつながることから、ナノフォトダイオードはシリコンフォトリソグラフィがエレクトロニクスにおける光配線に導入されるに当たり重要な技術になることが期待される。

シリコンフォトリソグラフィあるいはシリコンナノフォトリソグラフィとして微細な光配線と電子回路をつなぐためには、光導波路とナノフォトダイオードを結合する構造が必要となる。そのような構造の一例として、MSM (金属-半導体-金属) 型電極構造にプラズモンアンテナ機能を持たせた光導波路型のシリコンナノフォトダイオードなどが検討されている¹⁷⁾。

Fig. 9 Effect of capacitance of photodiode on light power required for the operation.¹⁶⁾

ナノフォトダイオード技術はフォトダイオードの電極間隔および電極面積を小さくするために、表面プラズモン共鳴を用いて発生させた近接場光を利用している。ここでは、周期的な凹凸によるグレーティング結合¹⁸⁾を用いているが、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す試みを報告されている¹⁹⁾。これらの技術は吸収係数の小さなSiを活用できることからシリコンフォトニクスにおける低コスト化、量産/集積化に適していると考えられる。また、フォトダイオードの小型化は高速応答、低消費電力化につながるだけでなく、暗電流の低減やバイアス電圧の低減など数多くのメリットがある。ナノフォトダイオードの概念はシリコンフォトダイオードに限定されるものではなく、より吸収効率の高い材料であるGeや各種III-V化合物半導体に適用して効果をあげることもできると考えられる²⁰⁾。プラズモンアンテナは可視光や近赤外光だけでなくテラヘルツ波などより長い波長に対しても有効であることが報告されており²¹⁾、今後の幅広い応用展開が期待される。

謝 辞

本研究遂行にあたり、特に表面プラズモンに関しては、阪口 光人、T. Ebbesen, T. Thio, R. Linke, 石原 邦彦の各氏に、またナノフォトダイオードに関しては石 勉、藤方潤一、牧田 紀久夫、馬場 寿夫、野瀬 浩一、西 研一、岡本 大典の各氏にお世話になったことを深く感謝します。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。

- 1) 和田 一実, ライオネル C. キマリング: 応用物理 **76** (2007) 141.
- 2) R. A. Soref and B. R. Bennett: IEEE J. Quantum Electron. **23** (1987) 123.
- 3) 渡辺 俊文, 土澤 泰, 山田 浩治, 板橋 聖一, 牛田 淳, 五明 明子, 西 研一, 大橋 啓之: 電子情報通信学会総合大会 (2007, 春) C-3-76.
- 4) Q. Xu, B. Schmidt, S. Pradhan, and M. Lipson: Nature **435** (2005) 325.
- 5) M. Nakada, H. Tsuda, K. Ohashi, and J. Aakedo: IEICE Trans. Electronics **E90-C** (2007) 36.
- 6) 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, 東京, 2002).
- 7) T. Ebbesen, H. J. Lezec, H. F. Ghaemi, T. Thio, and P. A. Wolf: Nature **391** (1998) 667.
- 8) 大橋 啓之, 藤方潤一, 石 勉, 石原 邦彦, 柳沢 雅広, 中田 正文, 横田 均: 日本応用磁気学会誌, **28** (2004) p. 774.
- 9) 藤方潤一, 石 勉, 柳沢 雅広, 大橋 啓之: レーザー研究 **34** (2006) 353.
- 10) A. Nahata, R. A. Linke, T. Ishi, and K. Ohashi: Optics Letters **28** (2003) 423.
- 11) H. Raether: *Surface Plasmons on Smooth and Rough Surfaces and on Gratings* (Springer-Verlag, Berlin, 1988) p. 5.
- 12) T. Ishi, J. Fujikata, K. Makita, T. Baba, and K. Ohashi: Jpn. J. Appl. Phys. **44** (2005) L364.
- 13) 大橋 啓之, 藤方潤一, 石 勉, 西 研一, 馬場 寿夫: 応用物理 **74** (2005) 1453.
- 14) J. D. Schaub, R. Li, C. L. Schow, J. C. Campbell, G. W. Neudeck, and J. Denton: IEEE Photon. Technol. Lett. **11** (1999) 1647.
- 15) J. Fujikata, T. Ishi, K. Makita, T. Baba, and K. Ohashi: *Proc. SSDM*, Kobe, September 2005, E-3-3.
- 16) 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: *Digest of Technical Papers and Visual Supplement of ISSCC*, San Francisco, February, 2006, #23.5.
- 17) 藤方潤一, 石 勉, 岡本 大典, 西 研一, 大橋 啓之: 応用物理学関係連合講演会 (2007, 春) 27a-ZW-4.
- 18) 福井 満壽夫, 大津 元一: 光ナノテクノロジーの基礎 (オーム社, 東京, 2003) p. 35.
- 19) D. M. Schaadt, B. Feng, and E. T. Yu: Appl. Phys. Lett. **86** (2005) 063106.
- 20) 岡本 大典, 藤方潤一, 西 研一, 大橋 啓之: 応用物理学関係連合講演会 (2007, 春) 27a-ZW-5.
- 21) K. Ishihara, K. Ohashi, T. Ikari, H. Minamide, H. Yokoyama, J. Shikata, and H. Ito: Appl. Phys. Lett. **89** (2006) 201120.

レーザーワード

プラズモン (plasmon)

光に対する金属中の自由電子気体の運動は、入射光の電界に対して180°位相がずれた振動になる。その結果、金属の多くは光周波数で負の誘電率を持つ。このような電子の運動によりプラズモンと呼ばれる電荷密度振動の維持が可能になる。特に、金属や半導体に光を入射した場合にその表面に誘起されたプラズモンを表面プラズモンと呼ぶ。表面プラズモンは表面近くに閉じ込められた近接場光を伴っている。波長以下のスケールの微粒子や

尖った形状の金属においては、正に荷電した格子に対する電子全体の変位による復元力が形状に対応したプラズモン共鳴を生ずることで強い近接場を発生させることができる。この時の近接場のサイズは粒子や突起と同程度の大きさになる。なお、物質特性は周波数に対し単純にスケールできないため、マイクロ波領域では金属表面付近に電磁波を閉じ込めることは困難で、表面電流は存在するが表面プラズモンは誘起されない。(大橋 啓之)