

Si を増倍層とするアバランシフォトダイオード

神戸 宏

高知工科大学工学部
〒 782-8502 高知県香美郡土佐山田町宮ノ口 185

E-mail : kanbe.hiroshi@kochi-tech.ac.jp

要約 : 光ファイバ通信用アバランシフォトダイオードの新しい構造を提案する。この構造では p-n 接合を有する Si でなだれ増倍を起こし、GaSb、あるいは Ge を光吸収層とするヘテロ接合を有する。光吸収層で発生した電子はヘテロ接合から p-Si に注入される。ヘテロ接合の形成はウェハボンディングの手法を用いて実現する。ここではこのような構造の設計指針とウェハボンディングについて報告する。

Abstract : A new structure of avalanche photodiode (APD) is proposed. The structure has a Si p-n junction separated from optical absorption region by a hetero-junction. Avalanche multiplication takes place in the p-Si layer initiated by the carriers injected from the absorption region. Possible materials for the absorption region are GaSb or Ge. These materials can be bonded to Si by wafer-bonding technique. The APD is designed for optical fiber communication systems with high performance.

1 はじめに

情報通信の急激な需要の増加に対応するため、光ファイバ通信システムの構築が進められており、より伝送容量の大きな通信線（ブロードバンド化）として、各家庭にまで光ファイバが敷設されつつある（FTTH：ファイバツーザホームと呼ばれている）[1]。このような数 Gb/s 以下のビットレートのシステムにおける受光素子として、内部電流増幅機構を有するアバランシフォトダイオード（APD）を用いることにより、EDFA（Er ドープファイバ増幅器）のような比較的高価な装置を用いて光を増幅することなしに、高感度なシステムを構成することができる。

現在石英光ファイバで用いられる波長帯

(1.3 ~ 1.6 μm) に対する APD は、光吸収層を InGaAs とし、なだれ増倍層を InP とする、InGaAs/InP SAM-APD である。ここで SAM とは、Separated Absorption and Multiplication Regions の略で、分離接合型とも呼ばれている。この構造は、ヘテロ接合を利用した APD の提案 [2] に続き、なだれ増倍領域を完全に分離した構造として提案された [3]-[5]。

本論文では新しい材料の組み合わせで構成する光通信用 SAM-APD 構造を提案する。なだれ増倍層を InP に代えて Si とする。これにより増倍雑音を InP よりも低くすることができる。光吸収層として GaSb、あるいは Ge を用いる。これにより石英光ファイバに使われる光信号に対応できる。ここではこの構造の APD の特性

を予測し、さらにこの構造の APD の実現方法について述べる。

2. SAM-APD 構造と増倍雑音

提案する APD の構造を図 1 に示す [6]。Si-APD は低増倍雑音の受光素子であるが、波長 $1.1 \mu\text{m}$ 以上では感度が低い。このため、バンドギャップのより小さな半導体を光吸収層とする必要がある。ここでは光吸収層の半導体として、光ファイバの損失が最低になる波長 $1.55 \mu\text{m}$ 帯の光を吸収できる、GaSb、または Ge を提案する。これらの半導体の 1 つを p-Si と接合しヘテロ接合を作る。なお光吸収層として、InGaAs を用いた構造は既に実現したという報告があり [7][8]、またわれわれも作製を試みた [9]。InGaAs はエピタキシャル成長でしか実現できていないが、GaSb や Ge はバルク結晶として比較的安価に入手できるという特徴がある。いずれの半導体のエネルギーバンドギャップも光の波長に換算すると $1.6 \sim 1.7 \mu\text{m}$ 付近にあり、石英光ファイバで使う光に対して十分応答することができる。

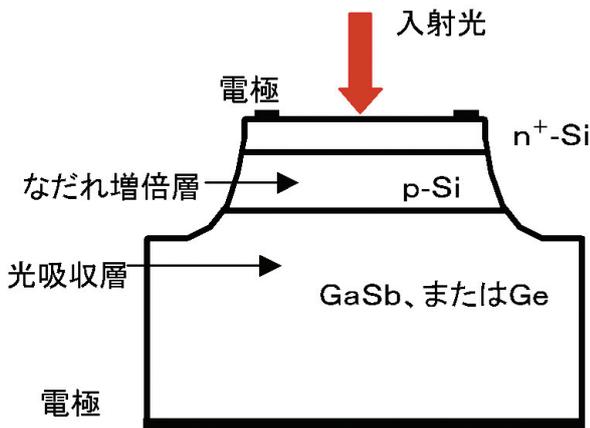


図1 提案する SAM-APD 構造

なお、最近光素子用半導体として注目されている $\beta\text{-FeSi}_2$ についても、光吸収層として使える可能性がある。Si を組成元素として含み、Si 結晶との相性も良いと考えられる [10][11]。

図1の構造において、入射した光は吸収層で

吸収され、生成された電子はヘテロ接合を越えて p-Si に注入される。Si のイオン化係数は電子の方が大きい。したがって、注入するキャリアを電子とする必要がある。ヘテロ界面における伝導帯および価電子帯に生じるバンド不連続量は、いずれの半導体の組み合わせについてもまだ正確には知られていない。電子注入のためには、伝導帯に作られるポテンシャル障壁を電子が乗り越える必要があるが、これは逆方向のバイアス電圧を高くして、p-Si の空乏層がヘテロ接合を越えて吸収層に入り込むまで伸ばすようにし、電子を空乏層電界で加速するようにすることで実現する。より性能を高めるためには、徐々にバンドギャップを変えるような構造も必要になるであろう。いずれにしろ、ヘテロ界面でのバンド構造の解明が必要であり、これも今後の研究課題である。

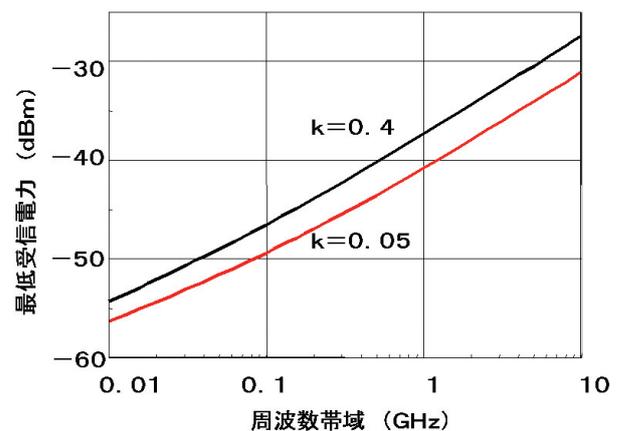


図2 イオン化率比による最低受信電力

さて、なだれ増倍層が InP の場合と Si の場合とでの増倍雑音を比較してみる。過剰雑音指数を McIntyre の式で表し [12]、InP のイオン化係数比を $k=0.4$ [5]、Si のそれを $k=0.05$ とし [13]、ビットレート (ここでは周波数帯域幅) に対する最低の受信光電力を求めた。図2はその結果である。符号誤り率を 10^9 とした。いずれの周波数帯域でも、なだれ増倍層を InP ($k=0.4$) から Si ($k=0.05$) にすることにより、最低受信電力は 3 dB 程度改善できることがわかる。こ

これは光ファイバの損失を 0.3 dB/km とすると、10km の長さに相当し、InP に代わり Si をなだれ増倍層とする APD を用いれば、伝送距離を 10km 程度伸ばすことができることがわかる [6]。

3. SAM構造の設計

上述したように、SAM-APD の動作では、空乏層がヘテロ界面を乗り越えて吸収層に入り込みその状態でなだれ増倍が起こるのに十分な電界が p-Si に印加されていることが必要である。このことから、p-Si 層の不純物濃度と厚さ、および光吸収層の不純物濃度を設計する必要がある。これらの値を決めると、動作電圧が決まることになる。

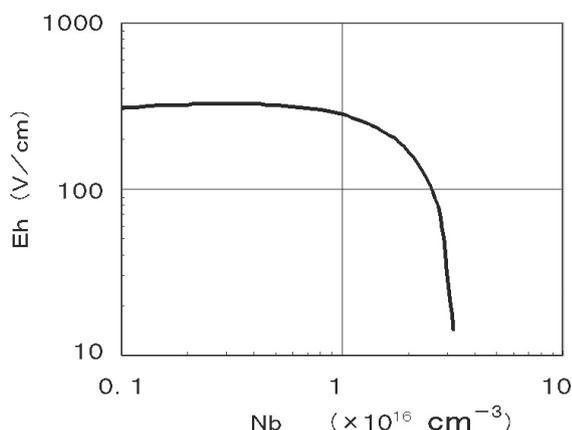


図3 不純物濃度に対するヘテロ接合電界

設計の流れはつぎのようになる。p-n⁺接合は階段接合であると仮定し、簡単な実験式 [14] を用いて、p 層の不純物濃度 N_b に対するなだれ降伏電圧 V_b を求めることができる。電界分布は三角形で近似し、最大電界 E_m 、および空乏層幅を決める。ここで E_g として Si のバンドギャップ 1.12eV を用いる。簡単のために、p 層の幅 w_m を一定値 $1 \mu\text{m}$ に固定する。ヘテロ界面での電界の大きさ E_h が有限の値であれば、 E_h と光吸収層の不純物濃度で決まる幅 w_a の空乏層が伸びることになる。この幅は光電変換効率を高めるために、光吸収係数の逆数 (吸収長) 以上となる必要がある。なだれ降伏時のヘ

テロ界面での電界の大きさ E_h を、不純物濃度 N_b に対して求めると図3のようになる。この図から分かるように、 $3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ で電界は 0 となり、この値以上になると空乏層はヘテロ界面に達せず、光吸収層にまで伸びることができない。光吸収層にも十分な幅の空乏層が伸びるためには $N_b \leq 1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ であることが望ましい。このとき光吸収層の不純物濃度を $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ とすると、空乏層幅はおよそ $2 \mu\text{m}$ となることが計算から求められる。なお以上の計算の範囲では、なだれ降伏が起きるときの最大電界は約 400kV/cm である。

4. ウェハボンディングによるヘテロ接合の形成

GaSb、または Ge では、それらの格子定数が Si の格子定数と大きく異なるため、一般に結晶成長によるヘテロ接合の形成は難しいと考えられる。このため、いわゆるウェハボンディングの手法 [15] を用いてこれらのヘテロ接合の実現を図っている。

ウェハボンディングは、図4に示すように、まずボンディングする半導体の表面を清浄化した後、軽いエッチングなどにより表面を活性化する。活性化した半導体表面を親水性にした後、純水中で接触する。空気中に取り出し、水分を飛ばすと、ファンデアワールス力で密着させることができる。その後適当な圧力をかけながら

- 1) 表面清浄化
- 2) フッ酸処理
- 3) 表面の親水性化
- 4) 密着 (純水中)
- 5) 真空中放置
- 6) 水素中熱処理

図4 ウェハボンディングの流れ

水素雰囲気中で熱処理してボンディングを完成する。われわれは密着した試料を真空チャンバに入れ、 $10^{-5} \sim 10^{-6}$ Pa 程度まで真空にした後、1 Pa 程度の圧力の水素雰囲気中で熱処理を行っている。熱処理の温度は $300 \sim 600^{\circ}\text{C}$ 、処理時間は3時間程度である。

ウェハボンディングのプロセスの内、最も重要と思われるのは、接合する半導体表面の親水性化である。親水性にするためには半導体に応じて薬品を変える必要がある。Si や Ge に対しては硫酸系の薬品が有効であり、また GaSb に対しては様々な試みの後、アンモニア系のエッチャントが有効であることが分かった。

これまで、Si と Si とのボンディングの手法を基礎として、Si と InP、Si と GaSb[16]、また Si と Ge[17] のボンディングを試み、100%の成功率にはなっていないが、ある程度の確率でボンディングに成功している。図5は p-GaSb と pn-Si とをボンディングし、それぞれの表面に Al および Au 電極を形成して測定した電流 - 電圧特性である。順方向電流の立ち上がり電圧は 3V 程度とやや高いが、明確に pn-Si を反映した方向性が確認できている。逆方向電圧も 10V 程度まで印加でき、暗電流も小さい。短波長の光に対しては光電流が流れるが、残念ながら、 $1.55 \mu\text{m}$ の光に対する応答はまだ観測できていない。空乏層が十分に広がってヘテロ界面を越えていないためと考えられる。今後改良する予定である。

ボンディング後、素子の形にするために、結晶を研磨する必要があるが、これに耐えられる機械的に強固なボンディングが要求される。上述の処理条件を最適にするため、現在さまざまな条件でボンディングを検討している。

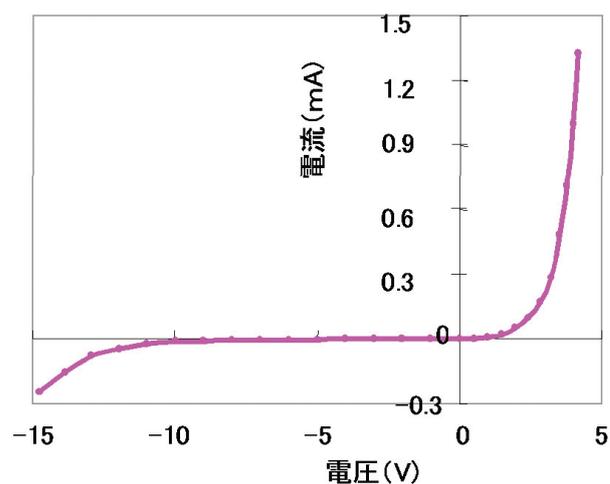


図5 pGaSb-pnSi ヘテロ接合の電流 - 電圧特性

5. 結び

光ファイバ通信用アバランシフォトダイオードとして、なだれ増倍層を Si とし、光吸収層を GaSb、あるいは Ge のいずれかの半導体とする新しい構造を提案した。 $\beta\text{-FeSi}_2$ についても可能性を述べた。光吸収層となる半導体はウェハボンディングにより Si と接合し、ヘテロ接合の形成が可能であると考えられる。提案した素子構造についてはまだ最終の APD 構造まで実現していないが、GaSb や Ge と Si とのボンディングの検討を進め、ヘテロ接合の形成に成功している。

ここで提案した構造において、最も大きな問題はヘテロ界面に形成されるエネルギー障壁の大きさ（伝導帯、価電子帯のバンド不連続量に関係する）である。この障壁によりキャリアはトラップされ、光で励起された電子が、光吸収層からなだれ増倍層へスムーズに流れることができず、光電変換効率や応答速度の劣化をもたらすことになる。現在実用化されている InGaAs/InP-SAM-APD で採用されているように、バンドギャップを徐々に変化させこの障壁を緩和するような構造が必要になるであろう。いずれにしろ、新しい半導体同士の組み合わせによるヘテロ界面特性の解明が重要になる。また、実用化には素子表面のパッシベーションも必要であ

り、そのためにはプレーナ化も検討しなければならない。ヘテロ界面の電気的特性や光学的測定は、まだ開始した段階であり、今後ヘテロ接合の実現を図りながら、ヘテロ界面を乗り越えてフォトキャリアが流れるのを確認したい。さらに素子の実現とともにヘテロ接合の解明を進めたいと考えている。

いくつかの問題はあるが、ここで提案したSiを基板としたAPDは、光ファイバ通信用として高性能なAPDとなり得る可能性があるものと考えている。

研究を進める上でお世話になる本学原央前学科長はじめ電子・光システム工学科の皆様、ウェーハボンディングの研究を進めた加瀬川 亮、大西建一、大橋律男、坂本誠、木本薫宏の皆様にご感謝します。本研究は「ハイテク・リサーチ・センター整備事業」の補助により行われたものである。

文献

- [1] 例えば、江崎、レーザー研究、**29**, 488, 2001
- [2] K.Nishida, T.Taguchi, and Y.Matsumoto, Appl. Phys. Lett., **35**, pp.251-253, Aug.1979
- [3] H.Kanbe, N.Susa, H.Nakagome, and H.Ando, Electron. Lett., **16**, pp.163-165, Feb.1980
- [4] N.Susa, H.Nakagome, O.Mikami, H.Ando, and H.Kanbe, IEEE J. Quantum Electron., **QE-16**, pp.864-870, Aug.1980
- [5] N.Susa, H.Nakagome, H.Ando, and H.Kanbe, IEEE J. Quantum Electron., **QE-17**, pp.243-250, Feb.1981
- [6] 神戸、「Siを基板とした光通信用アバランシフォトダイオード」、レーザー学会第294回研究会報告、**RTM-02-57**、2001年12月
- [7] A.R.Hawkins, W.Wu, P.Abraham, K.Streubel, and J.E.Bowers, Appl. Phys. Lett., **70**, pp.303-305, Jan.1997
- [8] W.Wu, A.R.Hawkins, and J.E.Bowers, SPIE, **3006**, pp.38-47, 1997
- [9] 神戸、加瀬川、「Siをなだれ増倍層とするInGaAs/Si-APDの提案」、平成12年度電気関係学会四国支部連合大会、**11-11**、2000年10月
- [10] 例えば「シリサイド環境半導体の現状と可能性－次世代の光エレクトロニクスをめざして」、第46回応物関係連合講演会シンポジウム、1999
- [11] T.Suemasu, Y.Negishi, K.Takakura, and F.Hasegawa, Jpn. J. Appl. Phys., **39**, pp.L1013-L1015, Oct.2000
- [12] R.J.McIntyre, IEEE Trans. Electron Devices, **ED-13**, pp.164-168, Jan.1966
- [13] H.Kanbe, T.Kimura, Y.Mizushima, and K.Kajiyama, IEEE Trans. Electron Devices, **ED-23**, pp.1337-1343, Dec.1976
- [14] S.M.Sze, 'Physics of Semiconductor Devices, 2nd ed.', John Wiley & Son, New York, 1981
- [15] 例 え ば Q.Y.Tong and U.Gosele, 'Semiconductor Wafer Bonding,' John Wiley & Sons, New York, 1999
- [16] 大橋、神戸、「ウェーハボンディングによるGaSb/Si-PD」、第49回応物関連講演会、**27a-ZG-3**、2002年3月
- [17] 大西、坂元、神戸、「Ge/Siヘテロ接合PDの作製」、平成14年度電気関係学会四国支部連合大会、**12-5**、2002年10月