

ウェハボンディングによる Ge/Si ヘテロ接合形成と フォトダイオード特性

神戸 宏* 宮地正之 廣瀬真美

高知工科大学 工学部
〒782-8502 高知県香美市土佐山田町宮の口 185

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

要約: 光ファイバ通信用受光素子として、Ge/Si ヘテロ接合フォトダイオードを提案し、その特性を実験により明らかにした。この構造は p-Ge と、pn 接合を有する Si とで形成したヘテロ接合を有し、Ge 光吸収層で光により生成した電子はヘテロ接合から p-Si 層に注入され光電流として寄与する。p-Si 層に高電界が印加できればアバランシフォトダイオードとして動作する構造である。ヘテロ接合はウェハボンディングにより形成し、これを用いてメサ型素子を作製した。作製した素子の暗電流は通常の pn-Si に比べて数桁大きく改善の必要があるが、波長 1.0 μm から 1.55 μm の領域で光電流を観測し、量子効率 は 40%以上であった。C-V 特性との比較から、pn 接合から伸びる空乏層がヘテロ界面に達すると、光キャリア(電子)がヘテロ界面を越えて流れることを確認した。透過電子顕微鏡によるヘテロ界面の結晶評価や元素分布も調べた。

1. はじめに

インターネットや携帯電話の普及により、情報通信の需要が急激に増加している。これに応じて幹線系光ファイバ通信システムの大容量化とともに、各家庭にまで高速通信が可能な光ファイバの敷設がされつつあり (FTTH:ファイバツザホームと呼ばれている)、今後光ファイバ通信によるネットワークが発展することが予想されている^[1]。FTTH をより普及させ、またさらなる大容量化を図るためには、システムの低価格化と高性能化が望まれている。

現在石英光ファイバで用いられる波長帯 (1.3 ~ 1.6 μm) で動作する受光素子は、InGaAs/InP pin フォトダイオード (PD) やアバランシフォトダイオード (APD) であり、いずれも InP 基板上にエピタキシャル成長した InGaAs、すなわち InGaAs/InP ヘテロ接合が用いられている。光吸収層である InGaAs 中で発生した光キャリアを InP 層に注入し光電流として外部回路に取り出す。ここで InP に高電界を印加しなだれ増倍により電流を増倍すると APD として動作する^[2]。電流増倍に伴う増倍雑音は APD の受光感度を定める重要な要因である^[3]。増倍雑音特性は用いる半導体で決まり、これを低減し、より高感度にするために、InP に換わり Si をなだれ増倍層とする InGaAs/Si

APD が提案され^[4]、既にその低雑音特性の報告もある^[5]。

われわれは、なだれ増倍層を Si とし、波長 1.7 μm までの光を受光できる Ge を光吸収層とした Ge/Si-APD の構造を提案し^[6]、その実現を図ってきた^{[7]-[16]}。Si 基板上にエピタキシャル成長した Ge を用いた、Ge/Si ヘテロ接合 PD が既に作られているが^[17]、波長 1.6 μm 以上では吸収係数が小さくなるため、Ge 層は μm オーダの厚さであることが望ましい。このような厚いエピタキシャル結晶は Ge と Si の格子定数が約 4.2% 異なるため、良質の結晶を得るのが困難になる。このため、われわれは、Si とバルク結晶として入手できる Ge 結晶とをウェハボンディングの手法で接合し、Ge/Si ヘテロ接合の形成を試みてきた。ウェハボンディングは高価なエピタキシャル結晶成長装置を必要とせずに、比較的容易にヘテロ接合の形成ができる^[18]。

これまでウェハボンディングによる Ge と Si との接合形成条件を検討した結果、比較的安定に Ge/Si ヘテロ接合を実現できるようになり^{[11]-[13]}、これを用いてメサ構造の Ge/Si ヘテロ接合 PD を作製し、その特性測定行ってきた^{[14]-[16]}。

本報告では作製した Ge/Si-PD の測定結果を述

べる。Ge で発生したキャリアがヘテロ界面を越えて Si に注入され光電流が流れること、また高い量子効率率が得られることを報告する。さらに分光感度特性、パルス応答特性、ヘテロ界面の透過電子顕微鏡観察の結果についても述べる。

2. Ge/Si ヘテロ接合 PD

作製したメサ形 Ge/Si ヘテロ接合 PD の構造を図 1 に示す。pn 接合は Si 中に設け、Si 側より入射した光は Si を透過して Ge で吸収される。この構造は InGaAs/InP-APD と原理的に同じ構造であり、高いバイアス電界を印加して、Si 中でなだれ増倍する条件を満たせば、Ge/Si-APD となる。

Si における電子のイオン化係数はホールのもより大きいため、なだれ増倍層として用いる場合、注入するキャリアは電子とすることにより低雑音特性となる^[3]。このことから、Ge で励起された電子とホールの内、電子注入とすること、Ge 光吸収層と Si なだれ増倍層を p 型としている。

p-Ge/pn-Si ヘテロ接合の熱平衡状態で予想されるエネルギーバンド構造を図 2 (a) に示す。この図ではヘテロ界面での界面準位を考慮していない。伝導帯と価電子帯に生じるバンド不連続量 ΔE_c 、 ΔE_v は、素子特性を決める重要なパラメータとなる。 $\Delta E_c = \Delta E_v$ とするとこれらの値は $(E_{g_{Si}} - E_{g_{Ge}})/2 = 0.23 \text{ eV}$ となり、報告されている実測値に近い^[19]。Ge と Si は格子定数が異なる (Ge: 5.66 \AA , Si: 5.43 \AA) ため、 10^{14} cm^{-2} 台以上の密度で存在するダングリングボンドによって界面準位が生じ、また結晶歪みなどの影響によってエネルギーバンド構造が変化するなど、図 2 (a) のような理想的なバンド構造とはならないと考えられる。バンド不連続量の値などを含め、ヘテロ界面の特性解明を進め、界面準位密度を下げるなど特性を向上させるためのプロセスや構造を検討する必要があるが、今後の検討課題である。

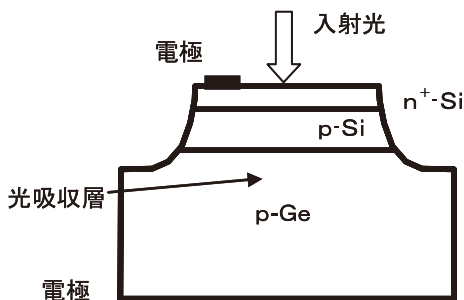


図 1 メサ構造 Ge/Si ヘテロ接合 PD の構造

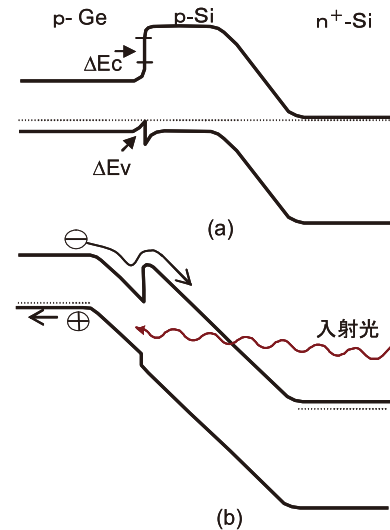


図 2 Ge/Si ヘテロ接合のエネルギーバンド構造 (a)熱平衡状態、(b)逆方向バイアス電圧印加時。

逆バイアス印加時のエネルギーバンド構造を図 2 (b) に示す。なだれ増倍層である p-Si 層に電子が注入されるには、光吸収層で発生した電子がヘテロ界面に存在するエネルギー障壁を乗り越える必要がある。このため、pn 接合から伸びる空乏層がヘテロ界面を越えて光吸収層へ入り込むように逆バイアス電圧を印加し、空乏層電界で電子を加速する必要がある。この条件を満たすように p-Si 層の不純物濃度と厚さを設計した^[6]。

3. Ge/Si ヘテロ接合 PD の作製工程

ウェハボンディングに用いた Si、Ge の特性を表 1 に示す。基板の面方位はいずれも (100) である。

Ge は p 型で、キャリア濃度を測定していないが、比抵抗値から 10^{15} cm^{-3} 程度と考えられる。p-Si は n⁺-Si 基板の上にエピタキシャル成長したもので、表 1 の比抵抗や厚さは設計値に基づいている。

ウェハボンディングの工程は大きく次の 5 つである。

- 1) 基板洗浄
- 2) 酸化膜除去
- 3) 表面親水性化
- 4) 基板同士を密着
- 5) 乾燥後、熱処理

この工程において、ボンディングの正否を左右するのは、基板洗浄、親水性化処理、および熱処理の条件である。まず、基板を有機溶剤によって洗浄し、フッ酸で表面の酸化膜除去と軽いエッチングを行う。次に表面を OH 基で終端し、親水性化させるために、

Si に対しては $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{H}_2\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$ の混合液、Ge に対しては $\text{HCl}/\text{H}_2\text{O}$ の混合液にそれぞれ浸漬する^[11]。その後、基板同士を純水中で密着させ、空気中で周辺の水をとばすと、基板同士はファンデルワールス力によって密着する。この密着させた基板を熱処理することで、原子同士結合した Ge/Si ヘテロ接合を形成できる。熱処理は水素雰囲気中（圧力 50Pa）、温度 880°C で 2 時間、荷重 1~10MPa を加えながら行った。

ヘテロ接合を形成した後、 $\text{n}^+\text{-Si}$ 層と p-Ge 層をそれぞれ研磨によって所定の厚さ ($\text{n}^+\text{-Si}$: 20 μm 程度、 p-Ge : 200 μm) まで薄くし、鏡面にした後、表面に電極を形成した。電極の材料は $\text{n}^+\text{-Si}$ 側に Au、 p-Ge 側に Al を用いた。電極を形成した後、メサ型にエッチングを行い、図 1 に示す構造を作製した。

表 1. 使用した基板の仕様

結晶	ドーパント	比抵抗	キャリア濃度	厚さ
$\text{n}^+\text{-Si}$	Sb	0.018	$\sim 10^{18}$	525
p-Si	B	1.02	$\sim 10^{16}$	0.95
p-Ge	non	4	$\sim 10^{15}$	400
		Ωcm	cm^{-3}	μm

4. 測定結果

4.1 暗電流特性

作製した素子について暗電流-電圧特性の測定例を図 3 に示す。異なる3個の素子の結果を示しているが、いずれの暗電流も通常の pn-Si で期待できる逆方向電流に比べて数桁大きい。図に示す素子の内、試料Aは 10V 以下で、試料Bは 20V 以下で暗電流は 1mA 以上となる。比較的良好な特性の素子（試料C）では、30V の印加電圧で暗電流は 1mA であった。いずれの素子もなだれ降伏を起こす電圧まで印加することができなかった。試料Cの暗電流が 20V 付近から増加しているが、ヘテロ界面あるいは Ge 層での発生-再結合電流によるものと考えられる。しかし全ての素子で同様の特性になっているわけではなく、作製した素子毎に特性のばらつきが大きい。

接合部の面積が小さくなるにしたがって暗電流が減少する傾向にあるため、暗電流特性を向上させるには接合面積を小さくすることが望ましい^[11]。しかし、暗電流は必ずしも接合面積や直径に比例しておらず、電流密

度は素子毎に大きく異なっている。また、素子を冷却しても暗電流は通常の pn 接合から予想できる程減少することはなかった。これらの原因は明らかになっていないが、接合端面での大きなリーク電流のためと考えられ、さらなる原因の解明、素子作製工程の改善、および接合端面のパッシベーションなどの検討により低減する必要がある。

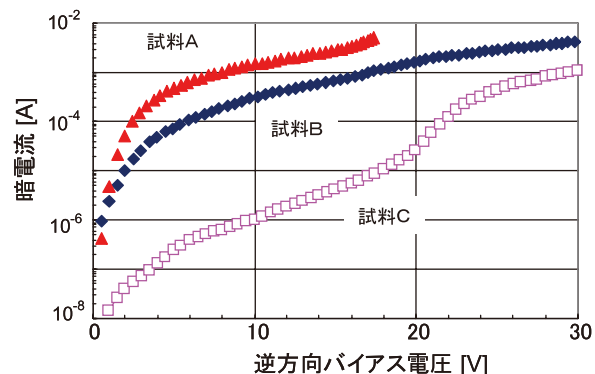


図 3 いくつかの素子の暗電流-電圧特性

4.2 光電流-電圧特性

作製した素子に図 1 に示すように $\text{n}^+\text{-Si}$ 側から波長 0.85 μm 、1.31 μm 、1.55 μm のレーザー光を照射し、光電流特性-電圧を測定した。その例を図 4 に示す。暗電流が大きいため、チョップした光を入射し、ロックインアンプを用いて光電流を測定した。いずれの波長の光に対しても、2V 付近から光電流が立ち上がり、10V 付近で飽和する。波長 0.85 μm の光では 2V 以下でも光電流が流れる。これは Si での吸収係数が 10^3cm^{-1} 以下であるため、かなりの光が $\text{n}^+\text{-Si}$ 層を透過して p-Si 層に達したためである。電圧を高くすると Ge 層で吸収され、生成された電子がヘテロ界面を越えて流れるため光電流は増加する。波長 1.31 μm 、1.55 μm の光は Ge でのみ吸収されるので、空乏層がヘテロ界面を越えて Ge に入り込む電圧以上で光電流が観測されることになる。このことは図 2 に示したバンド構造から理解できる。印加電圧に対する光電流の変化の仕方はヘテロ界面特性に影響されると考えられる^[14]。市販の InGaAs/InP ヘテロ接合 PD の測定結果では 1V 以下の電圧幅で急峻に立ち上がり飽和するのに対して、今回作製した Ge/Si-PD ではなだらかに変化する素子が多かった。これはヘテロ界面の急峻性と関連しているものと考えられる。

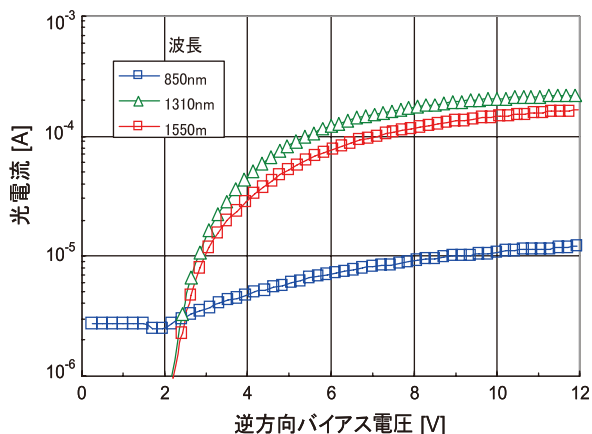


図 4 光電流特性

4.3 光電流の立ち上がり特性

入射光電力を変化させた時の光電流-電圧特性を比較した結果を図 5 に示す[11]。この素子は図 4 の結果を得た素子とは異なる。波長は $1.31 \mu\text{m}$ 、光電流は 8V 時の光電流値で規格化している。低光入力電力では立ち上がりが急峻であるが、光電力が大きくなるにしたがって、光電流の立ち上がりが高電圧側にシフトするとともに、なだらかになり、さらに飽和する電圧も高くなる。これはヘテロ界面に存在するエネルギー障壁によってキャリアが蓄積されることによるものと考えられ、InGaAs/InP ヘテロ接合 PD でも同様の特性が見られる。このような特性とヘテロ界面を考慮した解析との比較から、エネルギー不連続量を推定することができるが[20]、今後の課題である。

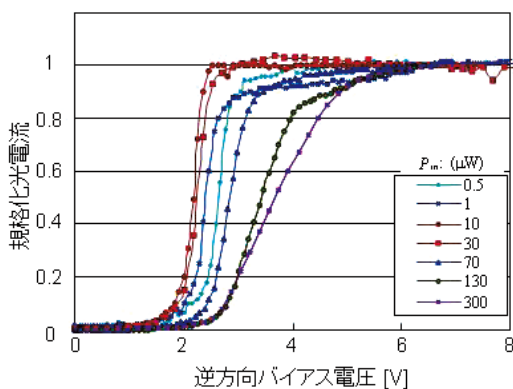


図 5 入力光電力を変えた時、8V の光電流で規格化した光電流

4.4 C-V 特性と不純物濃度

次に空乏層の広がりや光電流変化との関係を明らかにするため、図 4 の測定に用いた素子について、静電容量電圧(C-V)特性を測定した。図 6 に示すように、静電容量は 3V 付近で大きく減少していることがわかる。この電圧は図 4 に示す光電流が立ち上がる電圧と対応し

ていることから、逆方向電圧約 3V で空乏層がヘテロ界面に達したものと考えられ、Ge 層で光により励起された電子がヘテロ界面を乗り越えて光電流として流れたことを示している。

この素子の接合面積が正確に測定できなかったので、キャリア濃度に比例する $dV/d(1/C^2)$ を図 6 に重ねて示している。この図から分かるように、静電容量が急激に減少する電圧付近でキャリア濃度はピークを持ち、その電圧以下は p-Si 層の不純物濃度を、それ以上では空乏層がヘテロ界面を乗り越えるので Ge 層の不純物濃度を示している。ヘテロ界面でこのようなピークが現れることは InGaAs/InP ヘテロ接合 PD でも見られる。これはヘテロ界面での界面準位やエネルギー不連続によりキャリアが存在するためと考えられる。

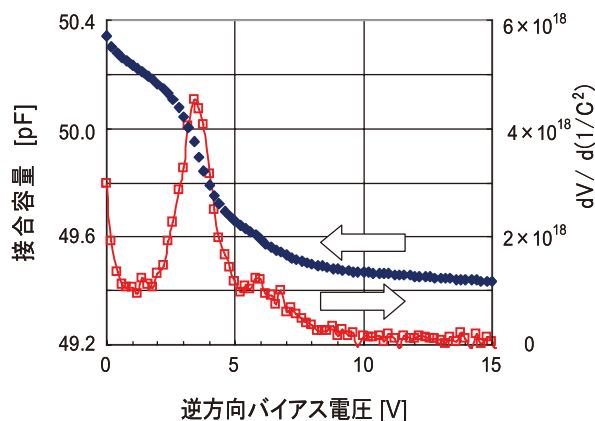


図 6 C-V 特性と $dV/d(1/C^2)$

4.5 分光感度特性

タンガステンハロゲンランプを光源として、分光器で分光した光を、作製した Ge/Si-PD に入射して、分光感度特性を測定した。その結果の例を図 7 に示す[16]。量子効率の値は $1.31 \mu\text{m}$ 、および $1.55 \mu\text{m}$ のレーザ光入射時の値で校正している。バイアス電圧は 15V である。

長波長側のカットオフ波長は Ge の吸収端であり、短波長側のカットオフ波長は Si の吸収によるものである。試料 D では、波長 $1.1 \mu\text{m}$ から $1.55 \mu\text{m}$ の波長域でほぼ平坦な感度(量子効率 40%以上)を示していることが分かる。これに対して試料 E では波長 $1.6 \mu\text{m}$ 付近にピークが見られ、短波長側での量子効率は 20%程度である。これは界面に何らかのキャリア捕獲準位が存在しているためと考えられる[16]。

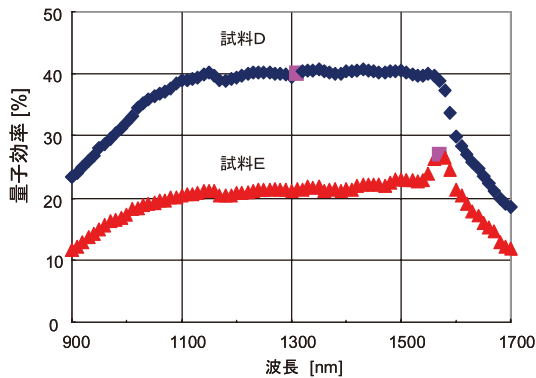


図 7 分光感度特性

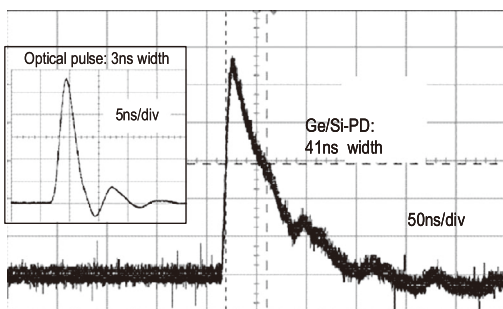


図 8 パルス応答特性

4.6 パルス応答

図 8 はパルス応答波形を示したものである^[15]。光パルスは $1.31 \mu\text{m}$ のレーザをパルス駆動して得た。その波形は図 8 の左側に示しており、パルス幅は 3ns である。このパルスに対して、作製した Ge/Si-PD の応答パルスの立ち上がりは 5ns、パルス幅は 41ns である。この立ち上がり時間は素子の静電容量で決まっている。応答波形には 150ns の長いすそ引きが観測される。InGaAs/InP ヘテロ APD で知られているように、このすそ引きは、ヘテロ界面に形成されるエネルギー障壁により、キャリアが蓄積されるためであると考えられる。InGaAs/InP APD ではエネルギー障壁を小さくするかあるいは緩やかに変化させるため、バンドギャップが InGaAs と InP の中間の大きさの InGaAsP 層を挿入しているが、Ge/Si においても応答速度を向上するために、そのような層の挿入が必要であると考えられる。また、メサ型の外側の、表面に露出した Ge でも受光感度があることから、その部分からのキャリアが拡散していることもすそ引きの原因と考えられる。

4.7 ヘテロ界面の TEM 観察

Ge/Si ヘテロ接合における界面での組成の急峻性や面内の均一性、および界面近傍の結晶特性、そしてそれらにより発生すると考えられる界面準位などは、図 4、5 に示した光電流の印加電圧依存性や、図 7 に示した

分光感度特性などの素子特性と関連していることが考えられる。

このような素子特性との関連を明確にすることを目指して、透過電子顕微鏡(TEM) によりヘテロ界面を直接観察した^{[21]-[24]}。高分解写真の一例を図 9 に示す。図 9 は(110)面から観測したヘテロ界面の TEM 写真である。ここで Ge/Si 界面は幅 2nm 程度の白く見える帯であり、乱れた格子像が観測される。界面の両側にはそれぞれ Ge と Si との格子像が見られ、面方位はほぼ一致している。界面から 40nm 程度の領域では格子の不規則な並び(転移や欠陥)が観測される部分が存在し^[23]、ここでの格子定数が本来の Ge や Si の格子定数より大きくなっている^[21]。電気的特性との詳細な関連については今後解析を進める。

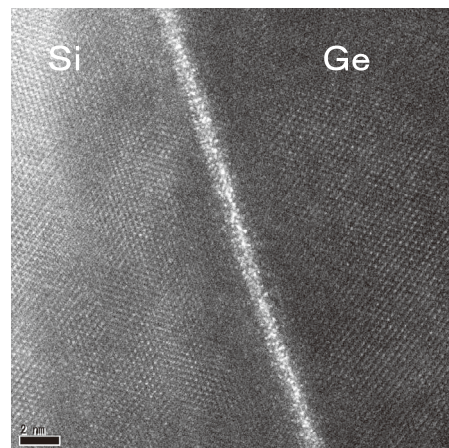


図 9 ヘテロ界面の TEM 写真

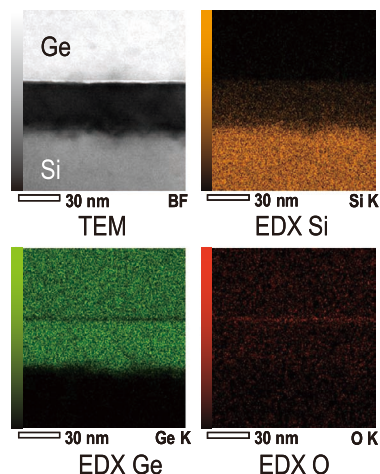


図 10 ヘテロ界面の元素分布

エネルギー分散 X 線分光(EDX)による面内元素分布の観測結果を図 10 に示す^[22]。TEM 写真では界面から Si 側 40nm 程度に渡って暗く見えている領域があり、そ

こには多くの Ge が混入していることが分かる。また、界面層の領域に酸素が蓄積されていることが示されている。同様な酸素の蓄積はウェハボンディングによる Si/Si ホモ接合の界面でも見られている^[25]。ウェハ表面に OH 基を付けて親水化し、この OH 基が結合するというボンディングの機構を考えると^[18]、熱処理中に大きな拡散係数の水素が拡散する一方、界面に酸素が残留するということが考えられる。

これらの TEM 観察から、ヘテロ界面について、次のようなことが分かった。(1)ヘテロ界面に 2nm 程度のアモルファスのような層が形成される。(2)その領域には酸素が蓄積されている。(3)ヘテロ界面から両側に 40nm 程度の領域の格子定数は大きくなり、そのため転移や欠陥が生じる。(4)また Si 側のその領域には Ge が大量に混入している。

5. 結び

光ファイバ通信用受光素子として、増倍雑音の低減が期待できるアバランシフォトダイオード(APD)構造として、Geを光吸収層、Siをなだれ増倍層としたGe/Siヘテロ接合フォトダイオードを提案し、その実現に向けて作製した素子の特性について述べた。Ge/Siヘテロ接合はウェハボンディングによって形成した。親水性化処理、熱処理条件などのボンディングプロセスを検討し、最適条件を見だし、比較的高い歩留まりでGe/Siヘテロ接合の形成に成功した。

メサ形とした素子の電流-電圧特性、静電容量-電圧特性の測定結果から、空乏層がヘテロ界面に達すると、入射光によって Ge 層で発生した電子がヘテロ界面を乗り越え、光電流として流れることを確認した。素子の量子効率_{0.5}は波長 1.31 μm 、1.55 μm の光に対して約 40%以上であった。また、初期段階であるが、分光感度特性、パルス応答特性についても示した。さらに、ヘテロ界面の透過電子顕微鏡による観察結果および元素分析結果から、結晶学的にもヘテロ接合が形成されていることを確認した。

現在のところ、暗電流が大きくなだれ降伏電圧まで印加できていない。また作製した素子によって特性のばらつきが大きいという問題もある。素子特性を向上させる構造や素子作製プロセスの改善を検討する必要がある。またヘテロ界面に生じると考えられる界面準位について明らかにする必要がある。いずれにせよ、さらなるヘテロ界面特性の解明が必要である。

ウェハボンディングにおける熱処理工程では

880 $^{\circ}\text{C}$ と比較的高温であるため、GeとSiの熱膨張率の違いによるものと思われる基板のクラックも見られる。熱膨張による応力の緩和や基板の劣化を抑えるために熱処理温度の低温化^[26]などプロセスの改良も今後の検討課題である。

研究を進める上でお世話になる本学成沢忠学科長はじめ電子・光システム工学科の皆様、ヘテロ界面結晶評価について共同研究者であり多くの助言をいただいた本学谷脇雅文教授、神戸大学新田紀子博士、そして、ウェハボンディングの研究を共に進めた川西正、中村永志、松岡亮次、石川慎吾、公文幹宏、伊藤達也の皆様^[27]に感謝する。本研究は文部科学省「平成13~17年度ハイテクリサーチセンター整備事業」、および、日本私立学校振興・共済事業団「私立大学等経常費補助金の特別補助」により一部援助を受けたものである。

文献

- [1] 佐藤、「光ネットワーク技術の進展」、電子情報通信学会通信ソサイエティマガジン、no. 1, pp. 76-88, 2007
- [2] N.Susa, H.Nakagome, O.Mikami, H.Ando, and H.Kanbe, "New InGaAs/InP avalanche photodiode structure for the 1.0-1.6 μm wavelength region," IEEE J. Quantum Electron., **QE-16**, pp.864-870, Aug.1980
- [3] R.J.McIntyre, "Multiplication noise in uniform avalanche diodes," IEEE Trans. Electron Devices, **ED-13**, pp.164-168, Jan.1966
- [4] A.R.Hawkins, W.Wu, P.Abraham, K.Streubel, and J.E.Bowers, "High gain-bandwidth-product silicon heterointerface photo-detector," Appl. Phys. Lett., **70**, pp.303-305, Jan.1997
- [5] Y. Kang, P. Mages, A.R. Clawson, P.K.L. Yu, M.Bitter, Z. Pan, A. Pauchard, S. Hummenl, and Y.H. Lo, "Fused InGaAs-Si avalanche photo-diodes with low-noise performances," IEEE Photon. Tech. Lett., **14**, pp.1593-1595, 2002
- [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] 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
- [8] 小松、渡邊、川西、神戸、「ウェハボンディングによるGe/Siヘテロ接合」、平成15年度電気関

- 係学会四国支部連合大会、**11-24**、2003年10月
- [9] 神戸、中村、小松、川西、「ウェハボンディングによる Ge/Si-PD の作製」、第 66 回応物学術講演会、**7p-B-1**、2005年9月
- [10] 小松、宮地、神戸、「Ge/Si ヘテロ接合フォトダイオード」、平成 17 年度電気関係学会四国支部連合大会、**11-4**、2005年9月
- [11] 小松、宮地、神戸、「Ge/Si ヘテロ接合フォトダイオード」、集積光デバイス技術時限研究専門委員会第 3 回研究会、**IPD05-37**、2006年2月
- [12] 神戸、小松、宮地、「ウェハボンディングによる Ge/Si-PD の特性」、第 53 回応物関係連合講演会、**26a-D-3**、2006年3月
- [13] H.Kanbe, M.Komatsu, and M.Miyaji, "Ge/Si heterojunction photodiodes fabricated by wafer bonding," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **45**, no.25, pp.L644-L646, 2006
- [14] 宮地、神戸、「Ge/Si-ヘテロ接合フォトダイオードの光電流特性」、第 67 回応物学術講演会、**31a-ZT-6**、2006年8月
- [15] H.Kanbe, "Ge/Si heterojunction photodiodes by wafer bonding (invited)," *The 19th Ann. Meet. IEEE LEOS*, **ThQ3**, Montreal, Nov. 2006
- [16] 宮地、神戸、「Ge/Si-ヘテロ接合フォトダイオードの分光感度特性」、第 68 回応物学術講演会、**6a-Q-8**、2007年9月
- [17] M.Morse, O.Dosunmu, G.Sarid, and Y.Chetrit, "Performance of Ge-on-Si p-i-n photodetectors for standard receiver modules," *IEEE Photonics Tech. Lett.*, **18**, pp.2442-2444, 2006
- [18] Q.Y.Tong and U.Gösele, 'Semi-conductor Wafer Bonding,' John Wiley & Sons, New York, 1999
- [19] A.G. Milnes and D.L. Feucht, "Hetero- junctions and Metal-Semiconductor Junctions," Academic Press, New York, 1972
- [20] K.Yokoyama, M.Tomizawa, H.Kanbe, and T.Sudo, "A numerical analysis of a heterostructure InP/InGaAs photodiode," *IEEE Trans. Electron Devices*, **30**, pp.1283-1288, 1983
- [21] 廣瀬、宮地、新田、谷脇、神戸、「ウェハボンディングで形成した Ge/Si ヘテロ接合界面の TEM 観察」、第 54 回応物関係連合講演会、**29p-SG-6**、2007年3月
- [22] 廣瀬、宮地、新田、谷脇、神戸、「ウェハボンディングによる Ge/Si ヘテロ接合界面の元素分析」、日本材料科学会四国支部第 16 回講演大会、**9**、2007年6月
- [23] H.Kanbe, M.Miyaji, M.Hirose, N.Nitta, and M.Taniwaki, "Analysis of a Wafer Bonded Ge/Si Heterojunction by Transmission Electron Microscopy," *Appl. Phys. Lett.*, **91**, pp.142119(1-3), Oct. 2007
- [24] 廣瀬、宮地、谷脇、神戸、「TEM 観察によるウェハボンディングで形成した Ge/Si ヘテロ接合界面の分析」、第 55 回応物関係連合講演会、**29p-SG-6**、2008年3月
- [25] 廣瀬、宮地、新田、谷脇、神戸、「ウェハボンディングで形成した結晶界面の TEM 観察」、平成 18 年度電気関係学会四国支部連合大会、**11-4**、2006年9月
- [26] 伊藤、宮地、神戸、「ウェハボンディングにおける熱処理温度の低温化と Ge/Si ヘテロ接合 PD の特性」、第 55 回応物関係連合講演会、**29p-SG-5**、2008年3月

Properties of Ge/Si Photodiodes having Heterojunction fabricated by Wafer Bonding

Hiroshi Kanbe*, Masayuki Miyaji and Mami Hirose

Faculty of Engineering, Kochi University of Technology
185 Miyanokuchi, Tosayamada, Kami-city, Kochi 782-8502 JAPAN

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

Abstract : A new structure of heterojunction photodiode (PD) having a Si pn junction separated from Ge optical absorption region by a Ge/Si heterojunction is proposed. Photocurrent is observed when the photo-excited electrons in the Ge layer are injected over the heterojunction into the p-Si layer. If a sufficient electric field is applied to the p-Si, avalanche multiplication takes place. This paper describes measured properties of mesa-structure PD's having Ge/Si heterojunction fabricated by wafer bonding. Although dark currents of the fabricated PD's were too large to realize avalanche breakdown, photocurrents were observed in the wavelength region from 1.0 to 1.55 μ m with quantum efficiencies higher than 40%. Capacitance-voltage characteristic shows that the photocurrent starts to flow when the depletion layer reaches the heterojunction with applying an enough reverse bias voltage. Transmission electron microscopy reveals the crystallographic property and atomic distribution around the heterojunction.