

卒業研究報告

題目

GaSb/Si ヘテロ接合 PD の実現に向けた

ウェハーボンディング技術

指導教員

神戸 宏 教授

報告者

学籍番号：1030187

氏名： 木本 薫宏

平成 15 年 2 月 10 日

高知工科大学 電子・光システム工学科

目次

第 1 章 序論	- 1 -
1 - 1 はじめに.....	- 1 -
1 - 2 目的.....	- 1 -
1 - 3 論文構成.....	- 2 -
第 2 章 フォトダイオード	- 3 -
2 - 1 フォトダイオード (PD).....	- 3 -
1 PIN フォトダイオード.....	- 5 -
2 アバランシフォトダイオード (APD).....	- 6 -
a . 雑音.....	- 7 -
b . イオン化率比.....	- 8 -
2 - 2 暗電流.....	- 9 -
2 - 3 ヘテロ接合.....	- 9 -
第 3 章 ウェハーボンディング	- 10 -
3 - 1 基板材料.....	- 10 -
3 - 2 p - GaSb/p-n - Si PD の構造.....	- 10 -
3 - 3 ウェハーボンディング.....	- 12 -
3 - 4 予備実験.....	- 12 -
3 - 5 GaSb/Si のウェハーボンディングプロセス.....	- 12 -
1 基板の切断.....	- 13 -
2 基板洗浄.....	- 13 -
3 活性化.....	- 13 -
4 接触、窒素プロー.....	- 14 -
5 加圧乾燥.....	- 14 -
6 アニール.....	- 14 -
3 - 6 実験結果.....	- 14 -
3 - 7 アニール温度と強度.....	- 15 -

第4章 研磨および電極付け	- 17 -
4 - 1 研磨.....	- 17 -
4 - 2 研磨手順.....	- 17 -
4 - 3 鏡面研磨.....	- 18 -
4 - 4 電極付け.....	- 18 -
4 - 5 真空蒸着.....	- 19 -
4 - 6 手順.....	- 20 -
4 - 7 アロイ.....	- 20 -
第5章 エッチング	- 21 -
5 - 1 エッチングと効果.....	- 21 -
5 - 2 エッチャント.....	- 21 -
1 自然酸化膜の除去.....	- 21 -
2 親水性化.....	- 21 -
3 メサ型エッチング.....	- 22 -
第6章 作製した素子の特性評価	- 23 -
6 - 1 測定用回路.....	- 23 -
6 - 2 電流 - 電圧特性.....	- 23 -
6 - 3 光起電力.....	- 24 -
第7章 結論と課題	- 26 -
7 - 1 結論.....	- 26 -
7 - 2 今後の課題.....	- 26 -
謝辞	- 27 -
参考文献	- 28 -

第 1 章 序論

1 - 1 はじめに

近年、インターネットの急速な普及に伴い、データ通信容量の増大化が進んでいる。これに対応するため、光ファイバ通信では波長多重 (Wavelength Division Multiplexing : WDM) 技術を用いた大容量光ファイバシステムの開発が進み、チャンネル当たりの伝送速度 10Gbit/s、光ファイバ 1 本当たりの総伝送容量 1Tbit/s 以上のテラビットシステムが実用化されつつある。さらに最近では、光ファイバをオフィスや各家庭にまで届ける FTTH (Fiber-To-The-Home) が導入され始めている。

現在の光ファイバ通信では、光ファイバの損失や分散が小さくなる $1.55 \mu\text{m}$ の波長帯が使用されており、この波長帯における受光素子として InGaAs を光吸収層とし、InP をなだれ増倍層とする分離接合型 InGaAs/InP APD が使われている。しかし、なだれ増倍層としてはイオン化率比が小さい Si が雑音特性と応答速度の点で優れている。このため、InGaAs を光吸収層とし、Si をなだれ増倍層とする分離接合型 InGaAs/Si APD が既の実現されている。^{1) 2)} これにより InGaAs/InP に比べて最低受信電力が 3dB 程度改善されることが予想される。光ファイバの損失を 0.3 dB/km とすると 10km の長さに相当する。言い換えると、InP に代わり Si をなだれ増倍層として用いることで伝送距離を 10km 程度伸ばすことができる。³⁾

本論文では、光ファイバ通信システムに必要な不可欠である受光素子を新しい材料の組み合わせでウェハーボンディング手法により作製したプロセスとその評価について述べる。

1 - 2 目的

本研究では光ファイバ通信用 APD として光吸収層を GaSb、なだれ増倍層を Si とする新しい組み合わせである GaSb/Si APD 構造を提案する。

現在、実現されている PD の光吸収層 InGaAs はエピタキシャル成長によって実現される非常に高価な半導体である。これに対して、GaSb はバルク結晶として成長でき、前者よりも安価で入手できる。また、光ファイバ通信に用いられる $1.55 \mu\text{m}$ 帯の光を吸収できることにより光吸収層として有効であると考えられる。しかし、GaSb と Si は格子定数が大幅に異なるため Si 上に GaSb をエピタキシャル成長させることは大変困難である。このため、異なる格子定数の半導体同士を接合することのできるウェハーボンディングという手法を用いる

。⁴⁾

本研究では GaSb/Si ヘテロ接合 PD、APD の実現を目指し、GaSb と Si のウェハーボンディングの手法を確立することを目的とする。本研究により初めて GaSb/Si のヘテロ接合形成に成功した。ウェハーボンディングにより GaSb/Si ヘテロ接合を形成する試みはあったが、その手法は必ずしも確立されていなかった。⁵⁾

1 - 3 論文構成

以後、第 2 章で PD について述べ、第 3 章で作製試料の構造とボンディングプロセスを詳しく解説する。第 4 章で測定を行うための研磨および電極付けの意義とそのプロセス、第 5 章でエッチングにおける効果とエCHANT について、第 6 章で作製試料の特性評価の結果、第 7 章で本研究の結論を述べる。

第2章 フォトダイオード

本章では、フォトダイオードの基礎と特性およびアバランシフォトダイオードにおける雑音特性とイオン化率の関係について述べ、Si をなだれ増倍層とする意義を明らかにする。

2 - 1 フォトダイオード (PD)

半導体に光が入射すると、価電子帯にある電子は光を吸収し、エネルギーを得て伝導帯へと遷移する。生成された電子と正孔を電流として取り出すために、フォトダイオード (Photo diode ; PD) では pn 接合を用いた構造が用いられる。pn 接合は、ほとんどすべての半導体デバイスの基本構成要素である。pn 接合の一般的な電流 - 電圧特性を図 2.1 に示す。⁶⁾ 印加されるバイアス電圧の大きさによって図 2.1 に示すように太陽電池モード、フォトダイオードモード、アバランシフォトダイオードモードに大別される。フォトダイオードとアバランシフォトダイオードについては下記で述べる。

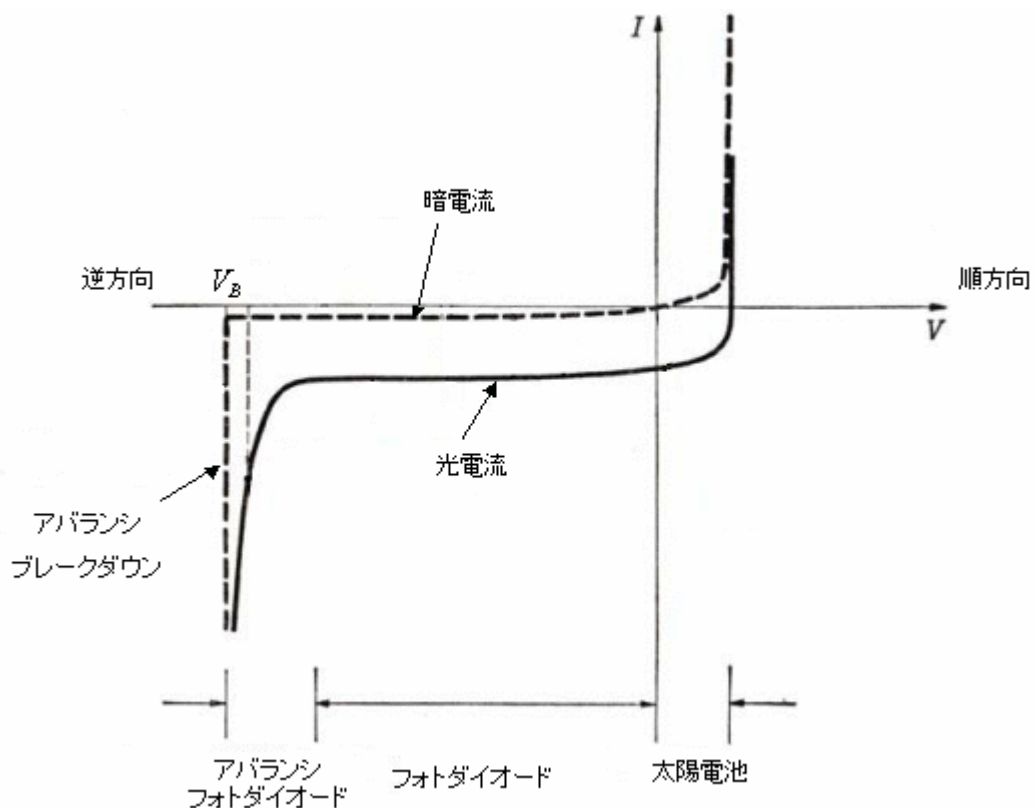


図 2.1 pn 接合の I-V 特性⁶⁾

図 2.2 は、pn 接合に逆方向バイアスを印加した時のエネルギーバンド構造を示したものである。⁶⁾ 接合面近傍では電子と正孔が不在となり電界が発生する。この領域は空乏層と呼ばれ、この空乏層に光が入射して生成された電子は n 形領域へ、正孔は p 形領域へとドリフトする。これが光電流 (図 2.1) となり外部の負荷回路を流れて電気エネルギーとして取り出せる。このようにして逆方向バイアス電圧を印加した状態で光信号を電気信号に変換することを利用したものがフォトダイオード (PD) である。PD には PIN フォトダイオードとアバランシフォトダイオードがある。同じ半導体結晶材料を用いて、いずれの受光素子も作ることができるが構造と機能は異なる。また、材料によって伝導帯と価電子帯のエネルギー差、すなわち禁止帯幅 (バンドギャップ) が異なるため、それに応じて受光できる波長帯も変わってくる。図 2.3 にいくつかの半導体の光吸収係数を示す。³⁾ 現在の光ファイバ通信では光ファイバの損失や分散が小さくなる $1.55\ \mu\text{m}$ の波長帯が使用されているため、それにあった半導体材料 (Ge、InGaAs が広く使われている) を使用することが必要である。

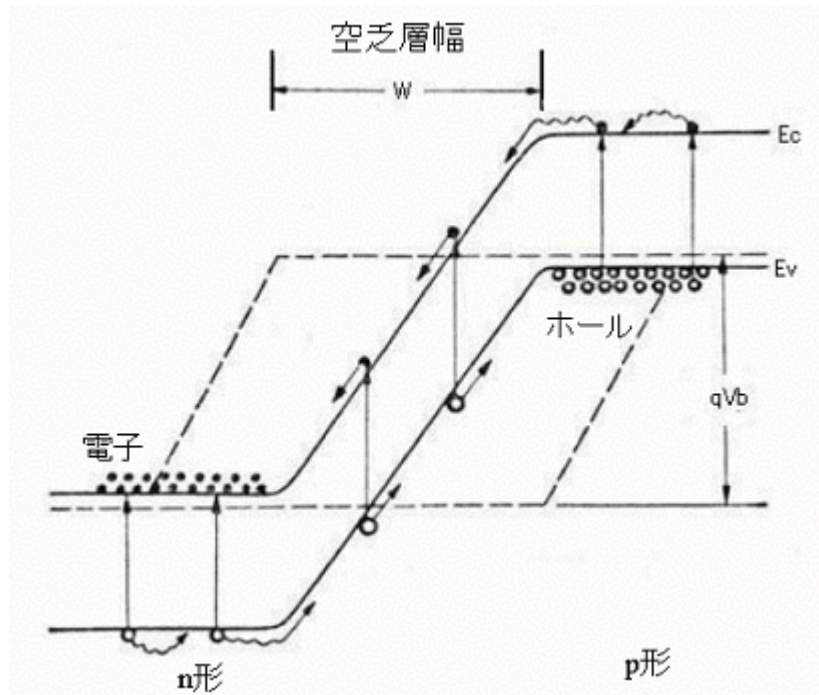


図 2.2 PD のエネルギーバンド構造⁶⁾

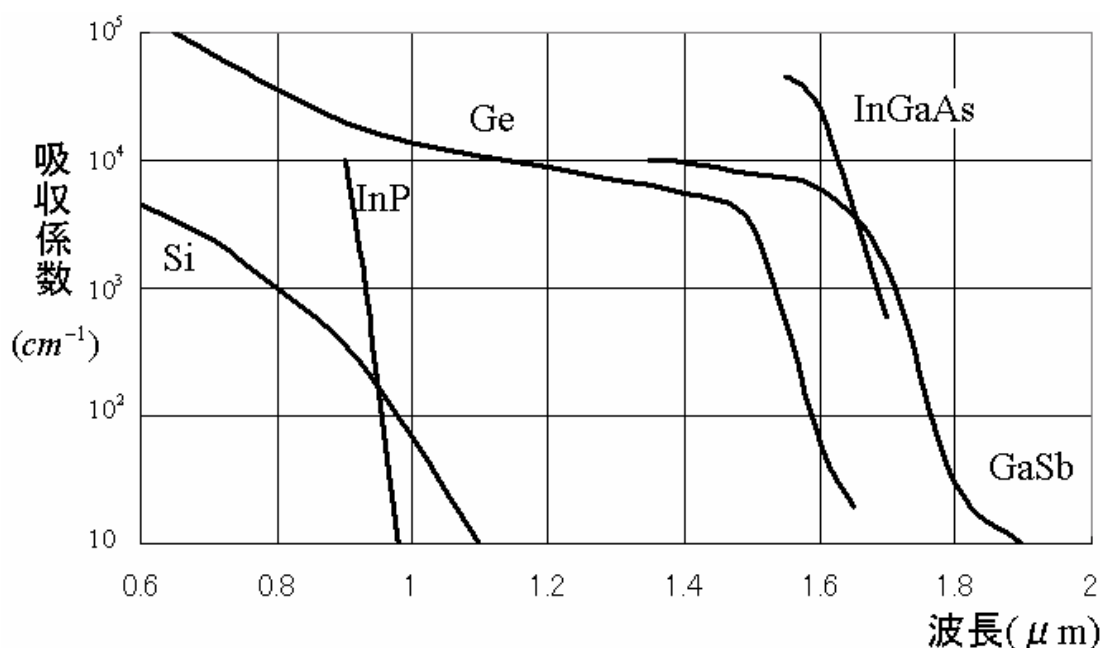


図 2.3 半導体の光吸収係数³⁾

受光素子を使用するにあたり下記の条件が求められる。

- 1 . 光源の波長に対して高感度であること
- 2 . 温度などの外部条件に対し特性が変化しない
- 3 . 応答速度が速い
- 4 . 雑音が低い

その他にも、小型で長寿命、安価などの条件も合わせて求められる。

次に PIN - フォトダイオード、および APD について説明する。

1 PIN フォトダイオード

PIN フォトダイオードは、空乏層の幅を広げて量子効率と応答速度を向上するために、n 形領域と p 形領域の間に真性半導体層(層)を設けた PIN 構造をしている PD である。電流増倍作用はないが高い量子効率持ち、雑音と動作電圧が低く使いやすいという特徴がある。この構造では、光子の吸収による電子と正孔の発生がほとんど 層で行われ、その中の電界の作用により、効率よく光電流を取り出すことができる。現在の光ファイバ通信における受光素子として広く用いられている。

2 アバランシフォトダイオード (APD)

PIN フォトダイオードよりも感度を上げた受光素子としてアバランシフォトダイオード (APD) がある。APD では、逆方向電圧を増していくと急激に逆方向電流が流れ出す (図 2.1 参照)。これは、電界強度を増していくと電子やホールが加速され、運動エネルギーを得て原子に衝突し新たな電子 - ホール対を生成する。これを衝突電離 (衝突イオン化) という。これによって発生した電子 - ホール対がさらに電界からエネルギーを受けてイオン化を繰り返す連鎖反応を引き起こし、急激に電流が増加することになる。これが雪崩 (アバランシ) 降伏現象であり、このときの電圧をブレイクダウン電圧と呼ぶ。図 2.4 にアバランシ現象が起こるときのエネルギーバンド構造を示す。⁶⁾ この現象により光電流を増倍することができる。

APD の電流増倍率 M は、逆バイアス電圧を V とすると経験により

$$M = \frac{1}{1 - (V/V_B)^n} \quad (n = 3 \sim 6) \quad [cm^{-1}] \quad (2.1)$$

で表される。⁷⁾

ここで、ブレイクダウン電圧 V_B は増倍率 M を無限大、電界強度を E_{max} 定義し、空乏層幅 W 、あるいは不純物濃度 N_B により次の経験式で表される。ここで E_g はバンドギャップである。⁶⁾

$$V_B = \frac{E_{max} W}{2} = \frac{k e_0 E_{max}^2}{2q N_B} \cong 60 \left(\frac{E_g}{1.1} \right)^2 \left(\frac{1 \times 10^{16}}{N_B} \right)^{\frac{3}{4}} \quad (2.2)$$

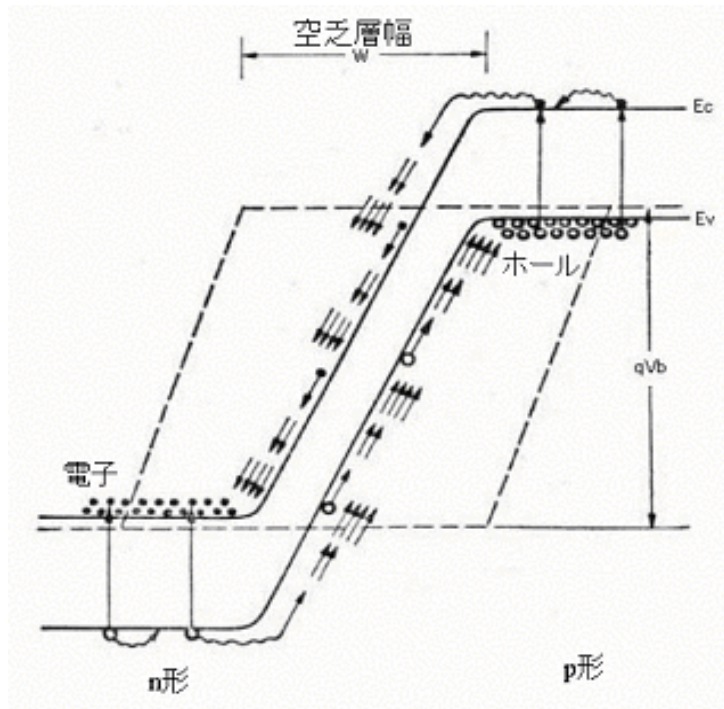


図 2.4 APD のエネルギーバンド構造⁶⁾

a . 雑音

アバランシ現象が起こる際、同時に過剰の雑音も発生する。微弱な光信号を検出する受光素子の特性の良否は、基本的に信号対雑音比で表される。

APD の S/N 比はピーク値で

$$\frac{S}{N} = \frac{I_p^2 M^2}{2e(I_p + I_d)M^2 F + 2eBI_p + 4kTB/R_e} \quad (2.3)$$

e : 電荷
 B : 帯域幅
 T : 温度
 Ip : 初期光電流

となり、ここで F は過剰雑音指数といわれ

$$F = M \left\{ 1 - (1 - k) \frac{(M - 1)^2}{M^2} \right\} \quad (2.4)$$

で表される。⁷⁾

k はイオン化率比であり詳しいことは次に述べる。

b . イオン化率比

衝突電離において、1 個の電子とホールが単位距離進行したときに生成する電子 - ホール対の数がイオン化率、 $[cm^{-1}]$ で表わされ、電界強度 E の増加とともに指数関数的に大きくなる。図 2.5 に Si と InP のイオン化率を示す。⁶⁾ 一般に α と β の値は異なり、APD の雑音の低減には式 (2.4) から k と α の差が大きいことが望ましい。

両者の比

$$k = \frac{\beta}{\alpha} \quad , \quad < \quad k = \frac{\alpha}{\beta} \quad , \quad < \quad (2.5)$$

はイオン化率比といわれ、結晶材料固有の過剰雑音を示すパラメータになる。このイオン化率比が雑音に関係しており、小さければ小さいほど雑音が少なくなる。ここで Si のイオン化率係数は InP に比べて非常に小さいことがわかる。このため、なだれ増倍層に Si を用いることは非常に有効であるといえる。

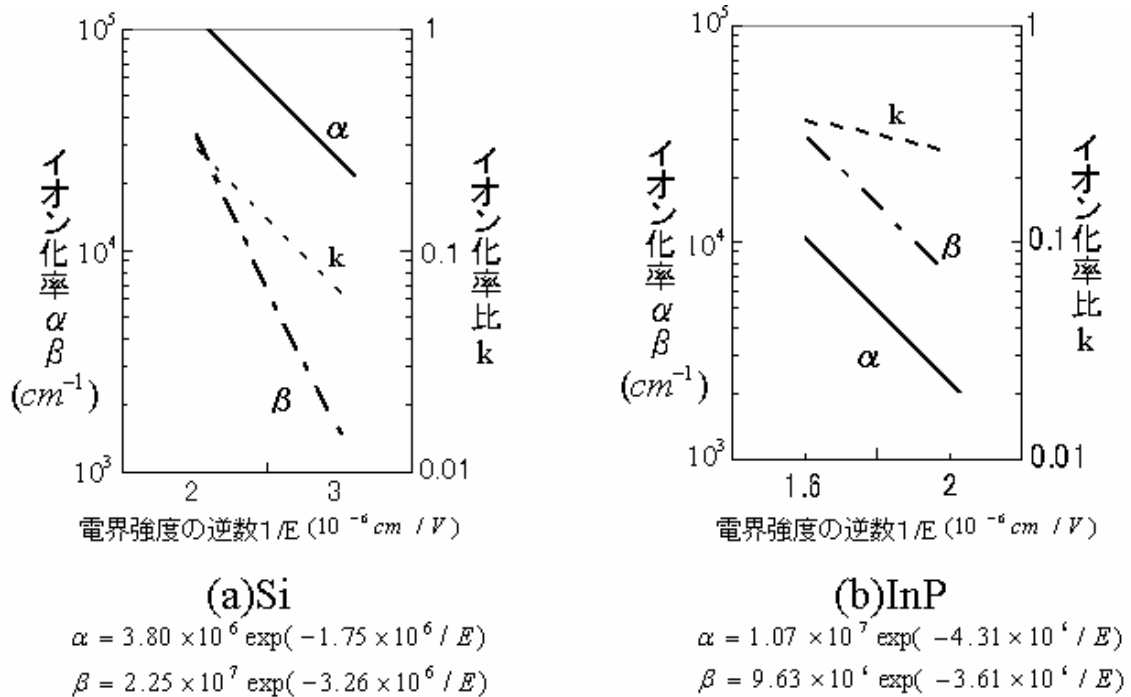


図 2.5 半導体結晶材料のイオン化率⁶⁾

2 - 2 暗電流

光が未入射時の逆バイアスで流れる電流を、暗電流 (dark current) I_d と言う。PDの暗電流は信号対雑音比からも小さいほど望ましく、拡散電流に基づく逆方向飽和電流のみが理想的である。しかし、発生電流や表面リーク電流等、幾つかの要因により飽和電流より大きな暗電流が流れる。

表面リーク電流については、メサ型エッチングで抑えることができる。エッチングについては5章で述べる。

2 - 3 ヘテロ接合

2種類の異なる半導体から成る接合を異種接合(ヘテロ接合: hetero junction) という。本研究では、GaSbとSiのウェハーボンディングを行いGaSb/Siヘテロ接合PDを実現する。熱平衡状態での予想されるp-GaSb/p-n-Siヘテロ接合のエネルギーバンド構造を図2.6に示す。³⁾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、まだ知られていないため正確なバンド構造ではない。p-Si(なだれ増倍層となる)への電子注入のためには、伝導体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、電子をその電界で加速することで実現すると考えられる。

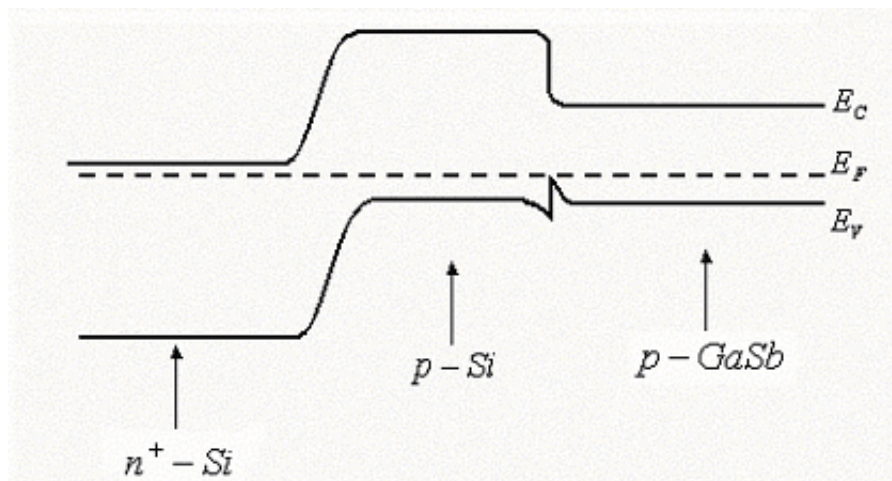


図 2.6 熱平衡状態でのエネルギーバンド構造 (予想図)³⁾

第3章 ウェハーボンディング

本章では、ウェハーボンディングの手法について検討した結果を詳しく述べる。まず、使用した半導体基板材料および作製する試料の構造について述べる。GaSbとSiのウェハーボンディングのプロセスについては既に報告があるが、⁵⁾ それを基に行った予備実験の結果との比較により、本研究によって初めて成功したp-GaSb/p-n-Siウェハーボンディングのプロセス条件を明らかにし、PD構造の作製結果を述べる。

3-1 基板材料

GaSbとSiとのウェハーボンディングの手法はこれまで確立されておらず、歩留りは非常に低かった。そのため、目的としている構造であるp-GaSb/p-n-Siとのボンディングに先立ち、p-GaSbとn⁺-GaSb、およびp-GaSbとp⁺-Siとのボンディングを試みた。用いた半導体基板の特性を表3.1にまとめる。

表 3.1 半導体基板材料

半導体基板	特性	厚さ
p-GaSb	ノドープ キャリア濃度;(1~2)E16	460 μm
n ⁺ -GaSb	Teをドープ キャリア濃度;(1~2)E17	460 μm
p ⁺ -Si	不明	400 μm
p-n ⁺ Si	Sbドープのn ⁺ -SiにBドープのp-Siを約1 μmエピタキシャル成長	400 μm

3-2 p-GaSb/p-n-Si PDの構造

実現を目指すp-GaSb/p-n-Si PDの層構造を図3.1(a)に、メサエッチング後のPD構造を図3.1(b)に示す。Siではバンドギャップが大きいことため光通信に用いられる波長1.55 μmを透過する。Si側から入射し、これを透過した波長1.55 μmの光はGaSbで吸収されることになる。電極はGaSb面にAu-Zn合金、Si面にはAuを蒸着し、合金化する。図3.1(a)において、ウェハーの大きさに差があるのは試験的な工程で行われるpn接合のエッチングを行いやすくするためである。エッチングは、電極をつけた後に電極による界面の接触やリーク電流を抑えるために行う。しかし、現段階ではSiの深いエッチングを行うためのエッチャントを検討中であり、簡単なエッチングで表面を処理するだけのプロセスとなる。

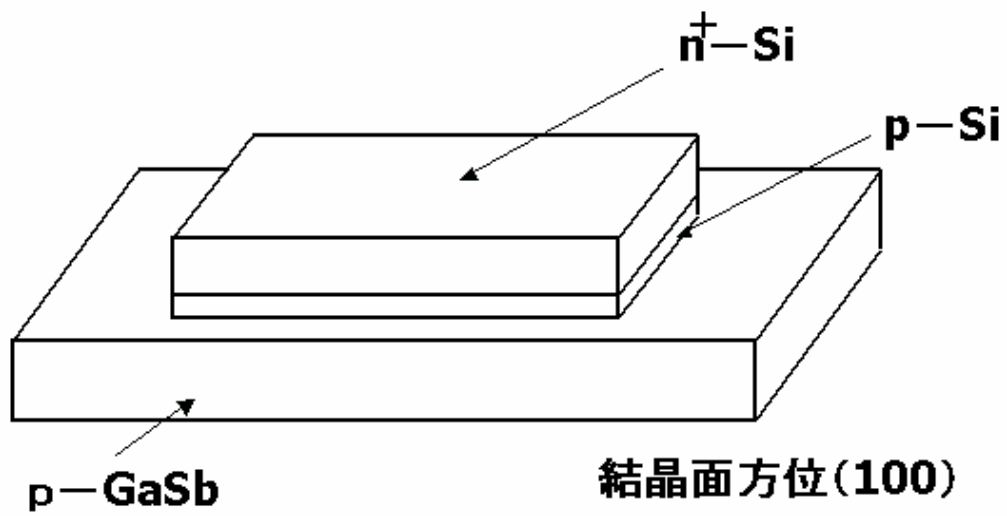


図 3.1(a) 層構造

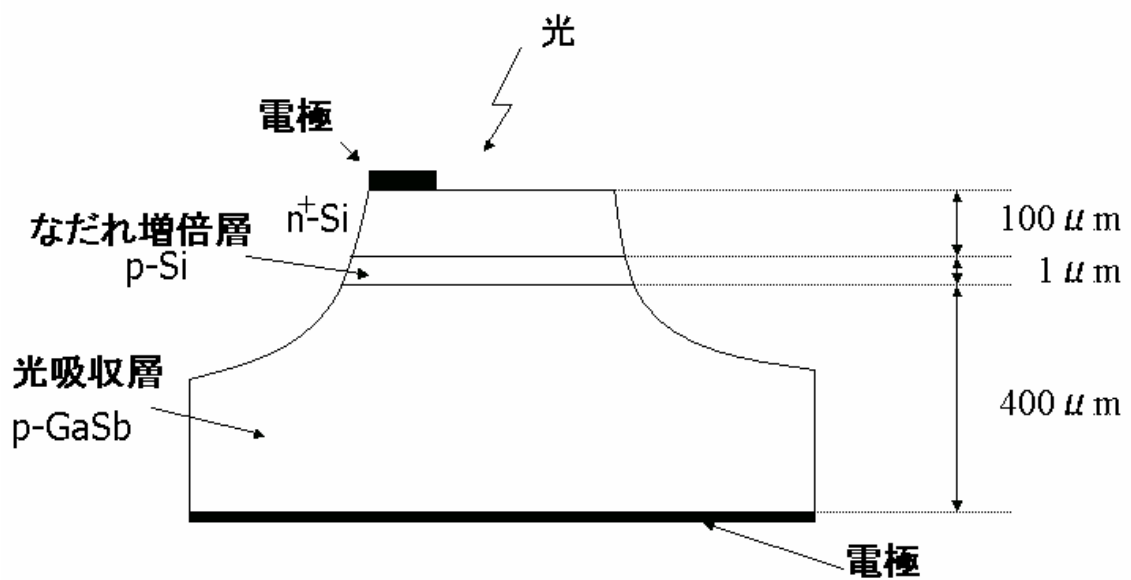


図 3.1(b) 実現を目指す PD の構造

3 - 3 ウェハーボンディング

GaSb と Si の格子定数は大きく異なっている。(格子定数 GaSb : 6.094 Si : 5.431)このようなウェハー同士をエピタキシャル成長させることは大変困難である。そこで格子定数が異なっても半導体同士を接着させることのできるウェハーボンディング手法を用いて GaSb/ Si ヘテロ接合を実現する。

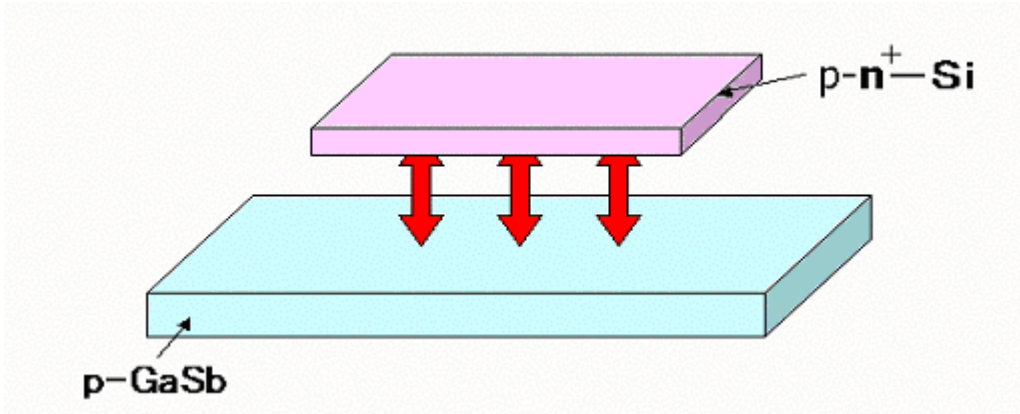


図 3.2 ウェハーボンディングのイメージ図

3 - 4 予備実験

p - GaSb/p - n - Si のウェハーボンディングを行う前に、まず成功例が知られている Si/Si のウェハーボンディングを行い接着できることを確認した。次に、以前の文献データ⁵⁾を基に p - GaSb 同士と p - GaSb/n - GaSb のウェハーボンディングを行ったが、再現性がなかった。そのため、以下に述べるように表面処理に用いる薬品と熱処理の温度を検討し、GaSb のウェハーボンディングにおいて、現段階で最適と思われる手順を決定した。このデータに基づいて p - GaSb/p - n - Si のウェハーボンディングを行った。

3 - 5 GaSb/Si のウェハーボンディングプロセス

GaSb/Si のボンディングプロセスは

- 1 . ウェハーの切断
- 2 . 基板洗浄
- 3 . 表面活性化
- 4 . 接触、ブロー
- 5 . 加圧乾燥
- 6 . 加圧アニール

である。以下に詳細を述べる。

1 基板の切断

ウェハースクライバを使用し GaSb と Si ウェハーを細かく切断する。スクライバの写真を図 3.1 に示す。

GaSb : 5 mm × 5 mm Si : 4 mm × 4 mm

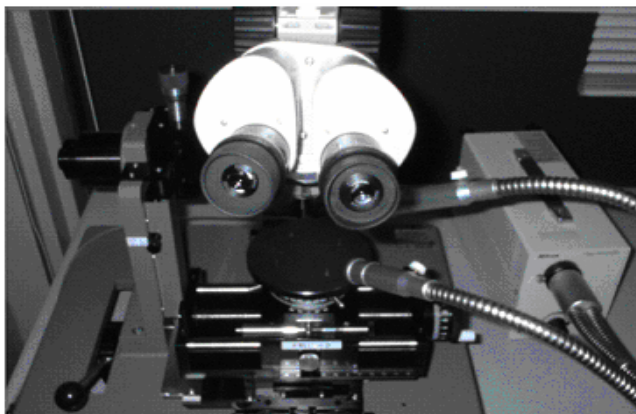


図 3.3 ウェハースクライバ

2 基板洗浄

基板洗浄はアセトン、メタノール、純水で行う。アセトンをビーカーに適量とり、GaSb と Si を浸け 10 分程度超音波洗浄する。次にメタノールをビーカーにとり同様に 5 分程度洗浄する。最後にアセトン、メタノールを落とすために純水に浸ける。この作業により基板の表面についた小さなほこりや油分を取り去る。

3 活性化

表面の活性化は Si と GaSb とでは異なった処理を行った。Si はバッファードフッ酸に 5 分間浸け表面にできた自然酸化膜を除去した。その後、弗化水素酸と純水 (1 : 1) の混合液に 3 分間浸け、軽くエッチングする。この時点で Si 基板の表面は弗化水素酸によって疎水性になっていると考えられる。GaSb は半導体洗浄液セミコクリーン 23 に 30 分間浸ける。エッチングや表面処理については第 5 章で詳しく述べる。

ボンディングを行う際は、親水性にすることで成功率が高くなるため、アンモニア水、過酸化水素、純水 (1 : 1 : 1) の混合液に Si、GaSb 共に 10 分間程度浸け親水性にする。なお、GaSb はセミコクリーンの時点で親水性になっているが、そのままではボンディングに成功しなかったため、上記アンモニア系の混合液を用いた。

4 接触、窒素ブロー

表面活性化の後、ウェハーを純水で洗浄し十分に薬品を落としてから、純水中で鏡面同士を接触させる。接触後にウェハーが外れないようにピンセットで固定し、大気中で窒素ブローにより余計な水分を吹き飛ばす。ウェハーに傷がつかないように注意する。

この時点で、かなり強固に接着しており、ピンセットで触った程度では剥がれることはない。

5 加圧乾燥

次に、ホットプレート上で温度を 160℃ まで上げ 1 時間加熱し、乾燥させる。このとき、ウェハー間の水分の膨張で弾け飛ばないように重りを乗せる。本研究では 160 g の重りを使用した。

6 アニール

次に、真空装置を用いて水素雰囲気中で荷重を加え、加熱処理する。

アニール条件は、

- ・ 水素流量 50ccm
- ・ 装置内圧力 約 30 ?
- ・ 加熱温度 300 ~ 600
- ・ 加熱時間 3 時間
- ・ 重り 約 700 g

とした。加熱温度の違いについては下記で述べる。

3 - 6 実験結果

これまでに行った実験結果をまとめ、表 3.2 に示す。硫酸を用いた以前の方法⁵⁾では GaSb/Si、GaSb/GaSb のウェハーボンディングは 1 度も成功することがなかった。この理由は不明であるが、本研究により、アンモニア系の活性化処理により大幅に成功率が高くなることを明らかにした。

表 3.2 ボンディング結果

組み合わせ(面1/面2)	前処理		活性化(薬品/処理時間)		結果
	面1	面2	面1	面2	
Si/Si	フッ酸系	フッ酸系	A/5min	A/5min	○
p-GaSb/p-GaSb p-GaSb/n-GaSb	フッ酸系	フッ酸系	A/5min	A/5min	×
	フッ酸系	フッ酸系	B/5min	B/5min	×
	フッ酸系	フッ酸系	C/3min	C/3min	○
	セミコクリーン23	セミコクリーン23	C/3min	C/3min	○
p-GaSb/p-Si p-GaSb/p-n-Si	セミコクリーン23	フッ酸系	C/3min	A/5min	×
	セミコクリーン23	フッ酸系	C/3min	B/5min	×
	セミコクリーン23	セミコクリーン23	C/3min	C/3min	×
	セミコクリーン23	フッ酸系	C/3min	C/10min	○

○: 接着に成功
×: 接着せず

フッ酸系: B-HF, HF
A: $H_2SO_4 + H_2O_2 + H_2O$
B: H_2SO_4
C: $NH_4OH + H_2O_2 + H_2O$

表に示すように、アンモニア系の活性化処理により、いくつかの成功例があった。しかし、薬品の処理時間やアニール温度など条件が同じ場合でも 100% 成功するわけではなく、できるだけ歩留りを高めるためにも今後の検討が必要である。

ここでのウェハーボンディングの成功は、アニール終了時でウェハー同士が剥がれていない状態を示している。しかし、この時点でボンディングに成功していても研磨で剥がれることもある。

3 - 7 アニール温度と強度

水素雰囲気中で荷重をかけアニールを行うが、このときのアニール温度が本研究により大変重要であることが明らかになった。表 3.3 に示すように、加熱温度を 300 ~ 600 まで 100 単位で変化させてアニールした後に研磨を行った。その結果、300 の場合はアニール後には接着していたものの研磨途中でウェハーが剥がれてしまった。400・500 の場合はアニール後、研磨後共に接着していた。この結果から、温度によって接着強度が変化すると考えられる。また、600 でアニールを行った場合はこれまで一度も成功していない。強固な接着を行うには、高温加熱を行う必要があるといわれている。しかし、GaAs と InP

のように熱膨張係数の差が約 30%と大きく違う半導体同士では、熱膨張により接触界面で歪みが発生し剥離などが起こると報告されている。⁸⁾ 本研究で用いる GaSb と Si の熱膨張係数の差は約 60%である。高温でのアニールの成功がないのは熱膨張の影響が大きく関係していると考えられる。

表 3.3 温度と強度

温度(°C) \	アニール	研磨
300	○	×
400	○	○
500	○	○
600	×	—

○:成功
×:不成功

$$\text{GaSb} \quad \alpha = 6.7 \times 10^{-6} / K$$

$$\text{Si} \quad \alpha = 2.6 \times 10^{-6} / K$$

$$\text{Ge} \quad \alpha = 5.8 \times 10^{-6} / K$$

$$\text{GaAs} \quad \alpha = 6.86 \times 10^{-6} / K$$

半導体の熱膨張係数 ^{9) 10)}

第4章 研磨および電極付け

本章では、研磨および電極付けの役割と手順に述べる。

4 - 1 研磨

ウェハー表面の保護膜や酸化膜の除去および各層、特に n^+ - Si 層の厚さを数十 μm ~ 百 μm 以下にするために表面研磨を行う。適当な厚さにした後、ウェハー表面での光の拡散を抑えるために鏡面研磨を行う。

4 - 2 研磨手順

研磨を行うために、まずジグの上にサンプルを固定する。ホットプレートでジグを加熱してワックスを溶かし、その上へボンディングしたサンプルを乗せ固定する。このとき、研磨中にボンディングした接触面へ負荷がかからないようワックスをサンプルの上からも覆い被さるようにしっかりと塗り固定する。次に、研磨剤(酸化アルミニウムの粉末)を粒子の粗いものから使用し研磨を行う。本研究では粒子の大きさが違う 2 種類の研磨剤 (#800、#1500) を使用したが、はじめから粒子の小さい研磨剤を使用しても問題はない。また、研磨剤の粒子の大きさや、水分量の違いで研磨の速さが大きく変化するので削りすぎないようにまめに厚さを測定する必要がある。片面の研磨が終わるとジグを加熱してワックスを溶かし裏返して再び固定する。裏面も同様に研磨を行う。研磨後は、十分にワックスが溶けていることを確認し、素子をジグから外す。ジグから外した素子に付着しているワックスを落とすために、アセトンに浸けワックスが剥離されるまで超音波洗浄を行う。次にメタノール洗浄を行い、純水でリンスし、窒素ブローで水分を飛ばす。



図 4.1 研磨用ジグ

4 - 3 鏡面研磨

片面の表面研磨が終わったら、素子が付いているジグを純水で超音波洗浄し、鏡面研磨を行う。ここで、十分に研磨剤を落としていないと研磨中に傷が発生する。鏡面研磨には鏡面研磨用の研磨剤を用いて、鏡面が出るまで行う。鏡面研磨は表面を均一の状態にするもので、表面が削れる割合は非常に少なく、厚さはほとんど変化しない。

4 - 4 電極付け

電極付けは実際の素子の作製において、特性の測定をする際の大変重要なプロセスとなる。GaSb/Si サンプルは真空蒸着という技法を用いて p - GaSb 面には AuZn、 n^+ - Si 面には Au を電極として蒸着する。ここで、電極を付けているのと付けていないのでは特性が大きく異なってくる。図 4.2 に順方向の電流 - 電圧特性の変化を示す。電極のある試料（アロイ後）では、順方向電流は 1 V 付近で立ち上がり Si の pn 接合の特性を示している。真空蒸着の原理と手順は以下に述べる。

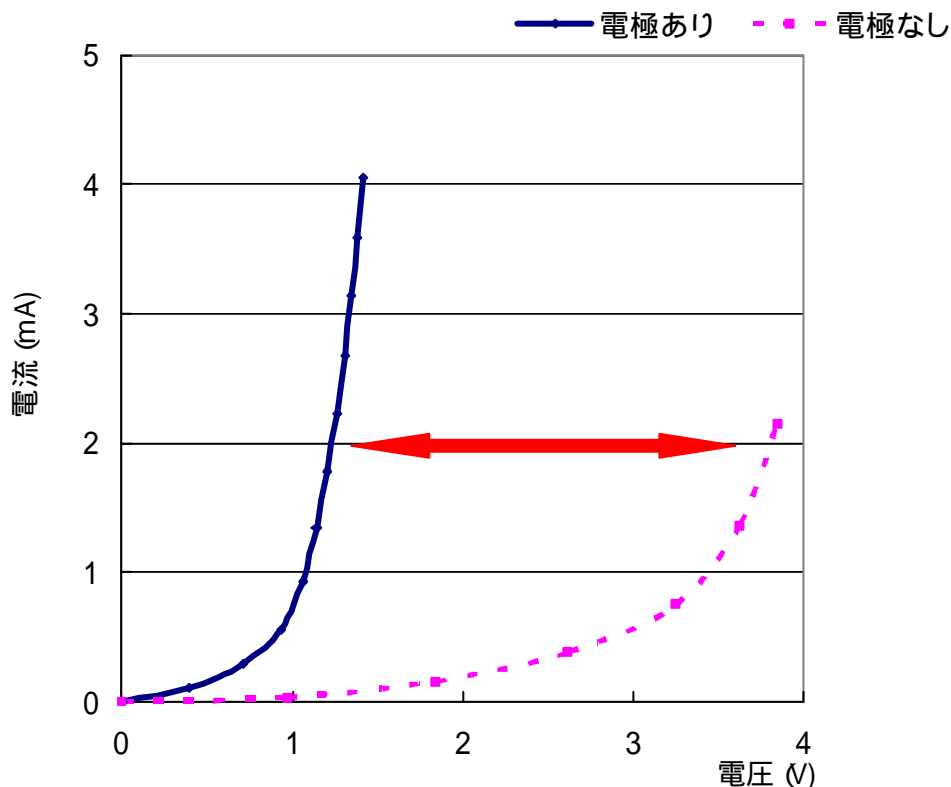


図 4.2 電極による特性の変化

4 - 5 真空蒸着

真空蒸着（図 4.3 に装置の写真を示す）は、真空中で蒸着金属を載せたタングステンボートに電流を流して加熱し、金属を融解して蒸気化させサンプルに付着させる。真空装置を用いるのは金属を空气中よりも蒸発させやすいためである。

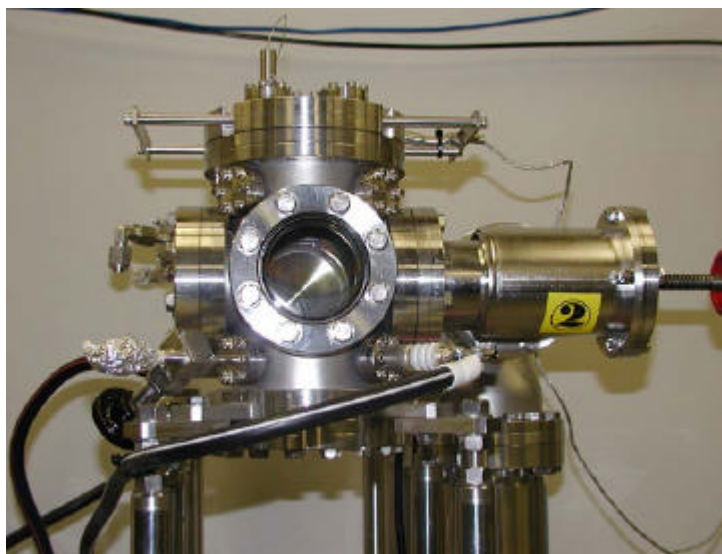


写真 4.3(a) 蒸着用チャンバー

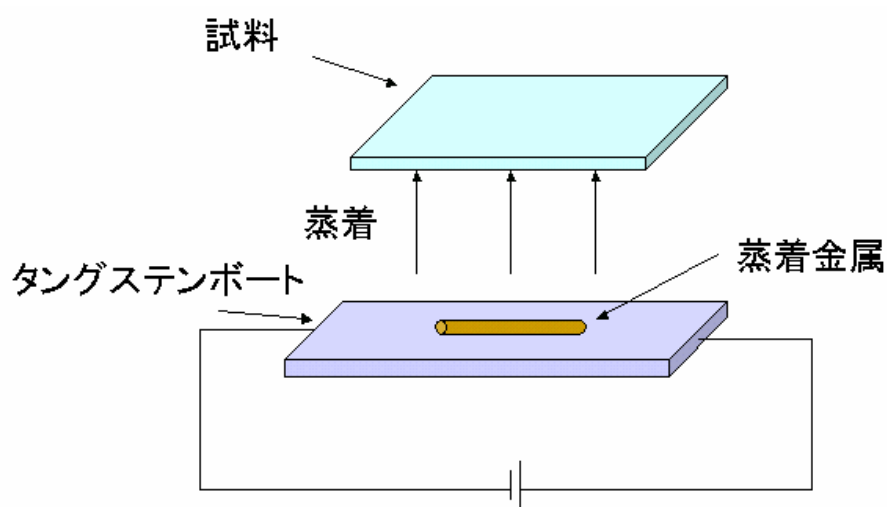


図 4.3(b) 蒸着原理

4 - 6 手順

電流を流すタングステンポートに蒸着金属を載せ、蒸着マスクをかぶせたサンプルを上部に置く。装置内を真空状態にしてから電流を流し、金属を蒸着させる。両面に電極を蒸着後、アロイ(合金化)を施す。

4 - 7 アロイ

アロイとは異種金属を高温で溶かし合わせ新しい性質の金属をすることである。アロイを施すことによって、電極の剥がれや電極と半導体基板間の接触抵抗を抑える。

処理条件は

- ・ 真空蒸着装置内 10^{-4} ? 程度
- ・ 温度：400
- ・ 処理時間：1min

である。

第5章 エッチング

これまでで述べてきたように、本研究では何度かのエッチング工程がある。本章では、GaSb/Si PDの作製工程で行ったエッチングと使用したエッチャントについてまとめる。

5 - 1 エッチングと効果

本研究で用いたエッチングは大きく2つに分けられる。ボンディング工程でのエッチングは、基板表面の性質や状態を変化させるためのもので、このことを表面活性化と呼ぶ。使用する薬品によって性質が異なるが、ここでは活性化を行うことで表面を親水性化し、半導体同士をファンデルワールス力で引き寄せることによって、ウェハーボンディングの成功確率を上げていると考えられる。一方、最終工程のメサ型エッチングは、空気中にさらされているpn接合の表面をエッチングで削ることで、電極蒸着により接触した部分の電極の除去やリーク電流を抑え、暗電流を小さくする効果がある。また、接合の面積を所定の大きさにすることにも利用できる。

5 - 2 エッチャント

1 自然酸化膜の除去

自然酸化膜は絶縁物であり、場合によっては大変よい保護膜になるが、ボンディングを行うためには除去しておく必要がある。

2 親水性化

Siの基板表面は、酸化膜の除去で使用したB-HFによって疎水性となっている。親水性にするためのエッチャントとして、以前のデータ文献⁵⁾では硫酸系のエッチャントを用いていた。しかし、予備実験の結果一度も成功しなかったため、エッチャントを変更し、ボンディングの歩留りを向上させた。(第3章参照)

表5.1に酸化膜の除去、および親水性化に使用したエッチャントとその割合を示す。

表 5.1 使用エッチャント

半導体基板	エッチャント	割合	内容	表面
GaSb	セミコクリーン23	1	酸化膜除去	親水性
Si	バッファードフッ酸	1	酸化膜除去	疎水性
GaSb・Si	アンモニア+過酸化水素+純水	1:1:1	親水性化	親水性

3 メサ型エッチング

メサ型エッチングは、図 5.1 に示す点線のような形状に削る。この場合 GaSb と Si をボンディングしており、同一のエッチャントに浸けることになる。そのため、Si には反応が早く GaSb には反応しない（又は、反応が遅い）エッチャントが必要となる。Si のエッチャントとしては弗化水素酸のみを用いる方法があるが、エッチングレートが低いためボンディングしたものを長時間薬品に浸けることになり剥離する原因となりうる。弗化水素酸、硝酸、酢酸の混合液（2 : 15 : 5）も有効であるが、これは GaSb の反応が著しく激しいため使用するの難しいと考えられる。薬品の割合を変更し試みたが最適な結果は得られていない。エッチャントについては現在、検討中である。

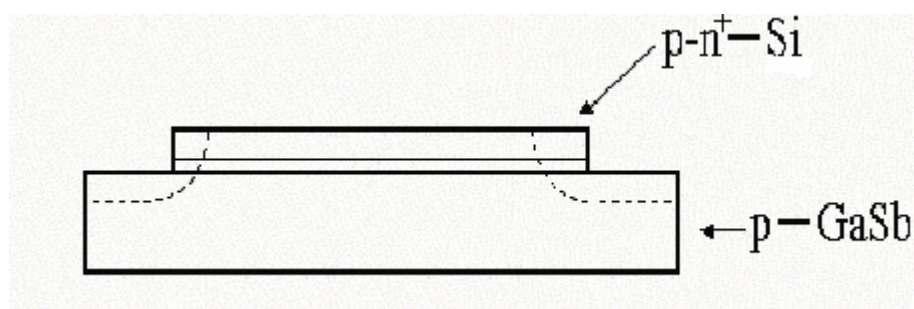


図 5.1 メサ型エッチング

第 6 章 作製した素子の特性評価

本章では作製したサンプルを評価するための測定回路を示し、測定によって得られた結果について述べる。

6 - 1 測定用回路

図 6.1 に電流 - 電圧特性評価で用いた測定回路を示す。PD に流れる逆方向電流が小さい場合 (nA ~ μ A 程度) 電流計では測定することができないため、回路中に 1k の抵抗を組み込み、電圧計を用いて電流を測定できるようにしている。光電流の測定のためチョップされた $1.55 \mu\text{m}$ の光を入射し、Lock in Amp を使用している。Lock in Amp を用いることで、入力した一定の参照信号と同期していない雑音や他の周波数の信号を取り除き、 $1.55 \mu\text{m}$ の光に対応する出力だけを取り出せるようにしている。

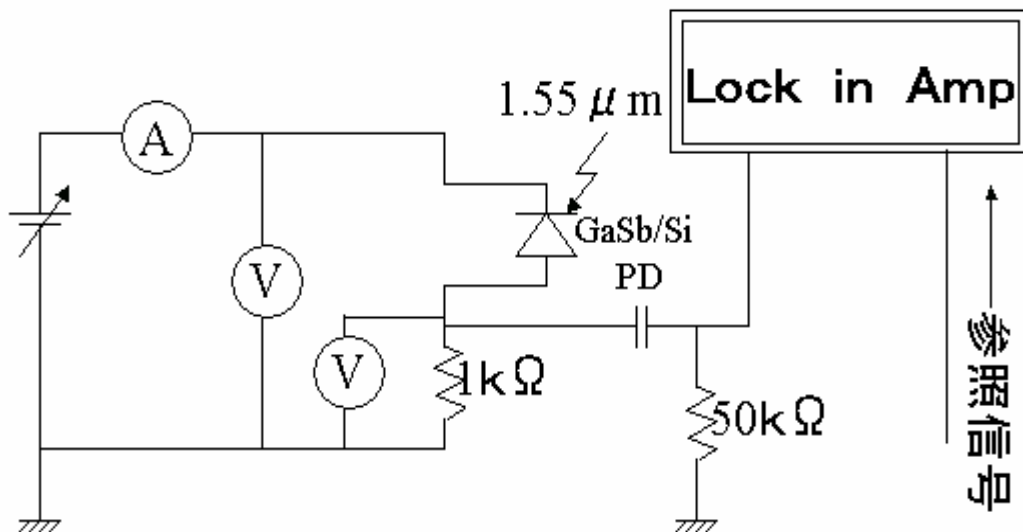


図 6.1 測定回路

6 - 2 電流 - 電圧特性

作製したサンプルの電流 - 電圧特性の一例を図 6.2 に示す。今回の測定では電極の形成やメサ型エッチングは行っていない。図 6.2 の結果から、順方向と逆方向の電流の流れ方が異なっているため明確な方向性が出ている(整流特性を示している)ことがわかる。順方向の電流の立ち上がりは 2~3V と高くなっているが、これは電極形成を注意して行えば下げることができる(図 4.2 参照)。また順方

向電流は p - GaSb と p-n - Si のヘテロ接合を流れており、多数キャリアに対してヘテロ接合は障壁になっていないと言える。逆方向電流は、逆方向バイアス電圧 10V で 14 μ A 以下であり、10V を越すと目に見えて増加している。これは pn 接合端部のリークのためと思われるが、はっきりとした理由は不明である。

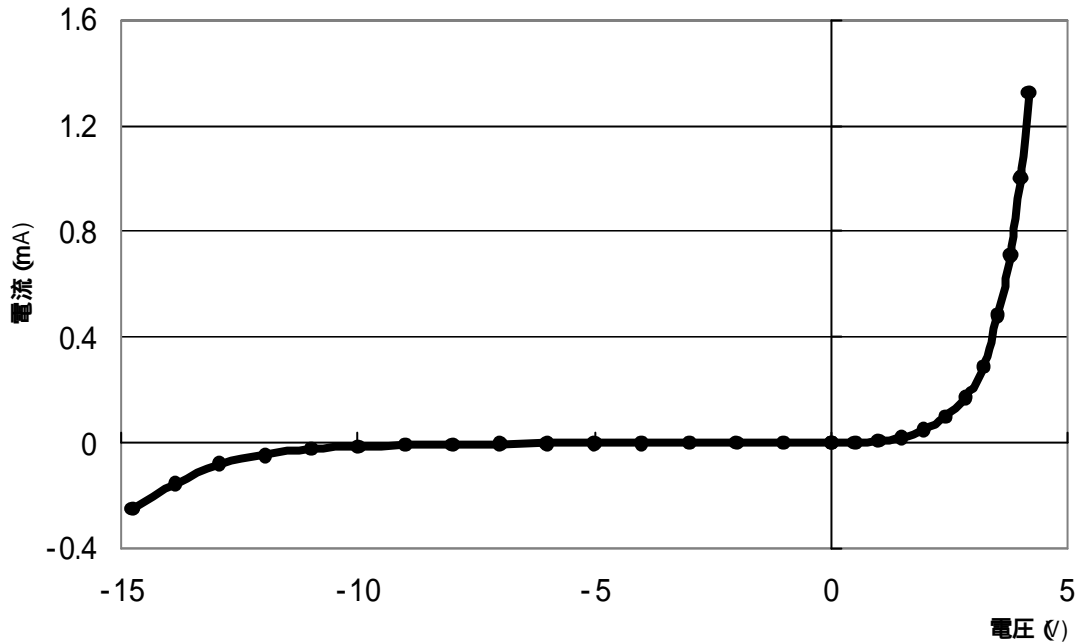


図 6.2 GaSb/Si の I-V 特性

6 - 3 光起電力

次に、上記で測定した素子に、光を入射して光電流の測定を試みた。

光の入射方法を図 6.3 に示す。ここでは、光源としてハロゲンランプを用いた。ランプから出てきた光を直接照射する場合と、Si ウェハ- とガラスフィルタ(カットオフ 800 nm) を同時に通して試料へ当てる場合について電流を測定した。後者の場合、Si で光吸収する(図 2.3 参照)ことを利用し、波長 1.1 μ m 以上の光のみを素子に照射できる。

図 6.4 に測定した逆方向電流 - 電圧特性を示す。ランプの光を直接当てた場合は PD として考えられる特性となっているが、これは短い波長の光も含まれているため p-n - Si で吸収したものと考えられる。フィルタを通し波長 1.1 μ m 以下の光をカットした場合、約 8 V あたりから光電流が大きくなっており、約 13V あたりから両光電流が同じ値を示している。このことから、ある一定以上の電圧を加えることで、GaSb で光吸収が起こっているのではないかと考えられる。

今回の実験で、光への反応があることがわかった。しかし、光ファイバ通信に用いられる波長 1.55 μ m の光(LD 光)での反応は確認できていない。

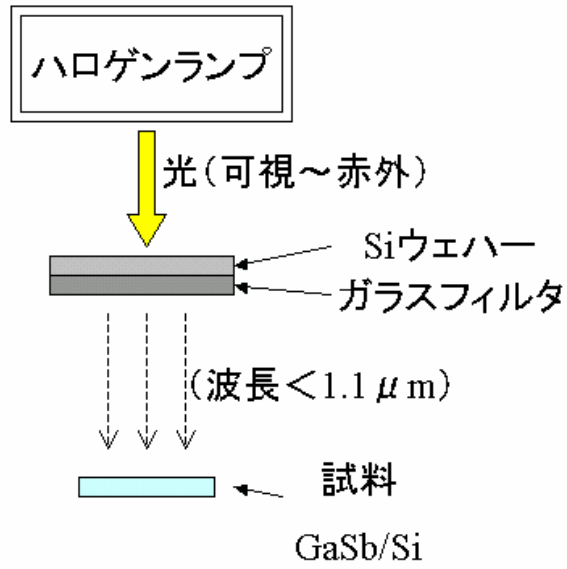


図 6.3 光の入射方法

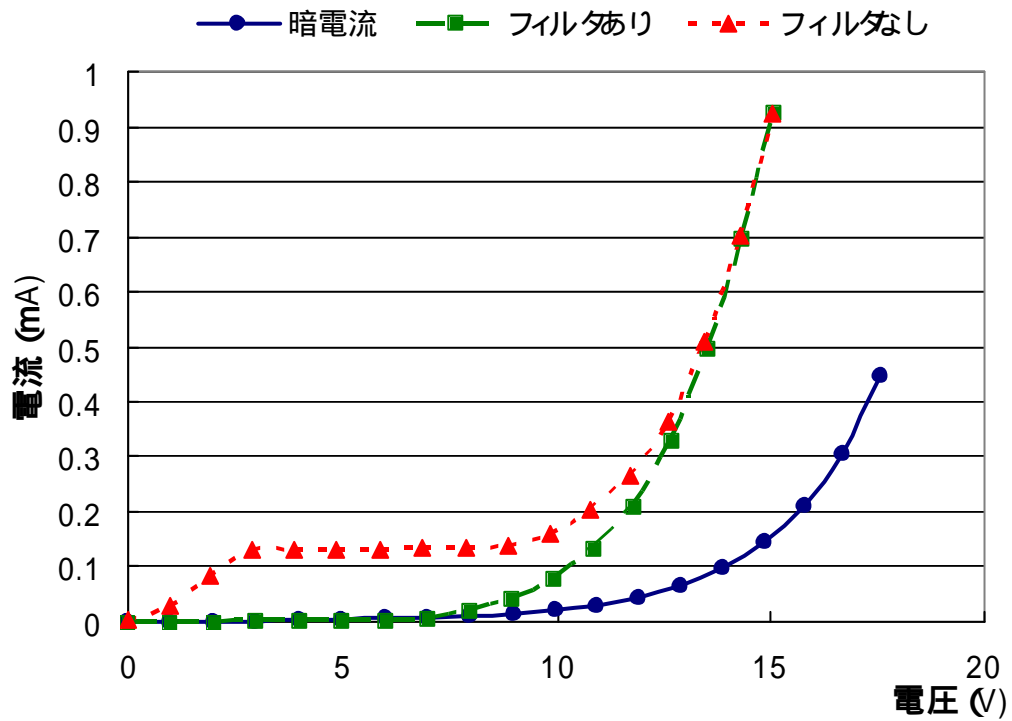


図 6.4 逆方向電流 電圧特性

第7章 結論と課題

本章では、本論文のまとめと今後の課題について述べる。

7 - 1 結論

- 1 . GaSb と Si の異種半導体同士を接着してヘテロ接合を形成するウェハーボンディングの手法を検討した。
- 2 . 表面処理に用いるいくつかのエッチャントを試み、またその処理方法の検討により、p - GaSb/p - GaSb、p - GaSb/n - GaSb、p - GaSb/p - Si、p - GaSb/p-n - Si のウェハーボンディングにおける最適条件を見出しそれぞれの組み合わせのウェハーボンディングに成功した。
- 3 . これにより、p - GaSb と p-n - Si のウェハーボンディングによるヘテロ接合の形成に初めて成功し、PD、APD 用の層構造を形成した。
- 4 . このような p - GaSb/ p-n - Si 構造にランプ光を入射し、光電流を観測した。PD および APD 実現の可能性のあることを明らかにした。

7 - 2 今後の課題

- 1 . Si と GaSb とが共存する場合、それぞれの半導体に対してエッチングレートが異なるためメサ型エッチングの条件が厳しい。今後このようなエッチングを行うためのエッチャントの検討が必要。
- 2 . 光通信に用いられる波長 $1.55\ \mu\text{m}$ の光を照射し光電流の測定、すなわちフォトダイオードとしての動作確認が必要である。

謝辞

本研究を行うにあたり、常に親身の御指導、御教授を賜りました神戸宏教授をはじめ、日頃からお世話になりました高知工科大学電子・光システム工学科の教職員の皆様に心から感謝致します。

また、データの提供や数々の助言を頂きました東京工業大学大学院の大橋律男氏に心から感謝致します。そして、日頃から共に研究に励む中、意見を交わしあい御協力頂いた前田康彦氏、大西健一氏、川内悠輔氏、坂本誠氏、山田和弘氏に感謝いたします。

参考文献

- 1) S.G.Hummel, A.Pauchard, M.Bitter, Z.Pan, Y.H.Lo, Y.Kang, P.Mages, K.L.Yu, " InGaAs-Si Avalanche Photodiodes " IEEE LEOS NEWSLETTER, 2002.6
- 2) Y.Kang, P.Mages, A.R.Clawson, P.K.L.Yu, M.Bitter, Z.Pan, A.Pauchard, S.Hummel, Y.H.Lo, " Fused InGaAs-Si Avalanche Photodiodes With Low-Noise Performances " IEEE Photonics Technology Letters, Vol.14, No.11, 2002.11
- 3) 神戸 宏, 『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, 2001
- 4) Y.H.Lo, Z.H.Zhu, Y.Qian, F.E.Ejeckam, G.L.Christenson, " Wafer Bonding Technology and its Optoelectronic Applications " SPIE Vol.3006, 2001
- 5) 大橋 律男, 『ウェハーボンディングによる GaSb/Si PD の作製と評価』, 高知工科大学卒業論文, 2002
- 6) 米津 宏雄, 『光通信素子工学 発光・受光素子』, 工学図書, 1984
- 7) 末松 安晴, 伊賀 健一, 『光ファイバ通信入門』, オーム社, 1989
- 8) 今田 昌宏, 小川 新平, 野田 進, 『異種材料における融着条件の検討』, 応用物理学会講演予稿集 25a-YA-2, 2002 秋
- 9) 日本産業技術振興会 新材料技術委員会編, 『化合物半導体デバイス, 付録 - 族化合物半導体基礎データ集』, 工業調査会, 1973
- 10) S.M.Sze, " Physics of Semiconductor Devices ", John Wiley & Sons, 1981