

卒業研究報告

題目

ウェハーボンディングによる
GaSb/Si PD の作製と評価

指導教員

神戸 宏 教授

報告者

大橋 律男

平成 14 年 2 月 5 日

目次

第1章	序論	
1.1	背景と目的	3
1.2	光ファイバ	3
1.3	光伝送通信で用いられる光源	5
1.4	光検出器	5
第2章	フォトダイオード	
2.1	フォトダイオード	6
2.2	アバランシフォトダイオード	8
2.3	イオン化率比	11
2.4	暗電流	12
2.5	ヘテロ接合	12
第3章	分離接合型 GaSb/Si および GaSb/p-nSi の構造と設計	
3.1	基板材料	14
3.2	GaSb/Si の構造	14
3.3	GaSb/p-nSi の構造	15
第4章	GaSb/Si のウェハーボンディング	
4.1	ウェハーボンディングを用いる理由	16
4.2	予備実験	16
4.3	GaSb/Si および GaSb/p-nSi の ウェハーボンディングプロセス	16
4.3.1	基板洗浄	16
4.3.2	活性化	17
4.3.3	接着	17
4.3.4	窒素ブロー	17
4.3.5	アニール	17
4.4	実験結果	18
4.4.1	結果	18
4.4.2	温度依存性、おもりによる変化および 水素の圧力について	19
4.4.3	素子にかかる圧力	20
4.4.4	エッチング液による成功・不成功の比較	20
4.5	Si/p-nSi の作製	20
第5章	研磨	
5.1	手順	21
5.2	研磨	21

5.3	鏡面研磨.....	22
第6章	エッチングおよび電極付け	
6.1	エッチングにおける効果.....	23
6.2	エッチャント.....	23
6.2.1	SiO ₂ エッチング.....	23
6.2.2	Si エッチング	23
6.2.3	GaSb エッチング.....	24
6.3	電極付け.....	25
6.4	真空蒸着.....	25
6.5	Alloy	26
6.6	メサエッチング.....	26
第7章	作製した素子の特性評価	
7.1	特性評価のための回路.....	27
7.2	電流 電圧特性.....	27
7.3	光起電効果.....	28
第8章	結論.....	29
	謝辞.....	30

第 1 章 序論

本章では現在の通信システムの状況を述べ、なぜ InGaAs の代わりに GaSb を用いるのか、GaSb を用いることでどうなるのかということ进行を述べる。

1.1 背景と目的

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波長帯である $1.3\ \mu\text{m}$ および $1.55\ \mu\text{m}$ が使われている。この波長帯における光検出器としては、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 が知られている。しかしながら、なだれ増倍層としては InP よりも Si のほうがイオン化率比が低いため雑音特性と応答速度の点で優れている。しかし、InGaAs と Si は格子定数が異なるため、Si の上に InGaAs をエピタキシャル成長させることは困難である。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出来る手法として Si と InGaAs をウェハーボンディングという手法を用いて接合させた、InGaAs を光吸収層とし、p-nSi をなだれ増倍層とする分離接合型 InGaAs/p-nSi APD が試みられている。これにより InGaAs/InP に比べて最低受信電力を 3dB 程度改善できることが期待できる。しかし 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るということと、光吸収波長 $1.55\ \mu\text{m}$ を十分カバーしていることにより、InGaAs よりも有効であると考えられる。本研究では GaSb/Si PD におけるウェハーボンディングの手法を確立し、InGaAs に代わって光吸収層になりうる GaSb を用いて GaSb/Si のヘテロ界面を作製して評価し、GaSb/Si APD の作製を試みる。

1.2 光ファイバ

伝送損失が最も少ない波長で通信することが光ファイバ通信システムにおいて適していることは明らかである。光ファイバの損失特性のグラフを図 1 に示す。現在の光ファイバは石英光ファイバであって、そのため $1.55\ \mu\text{m}$ の波長に合わせた受光素子を作製することが必要である。 $1.55\ \mu\text{m}$ の場合の損失は最低になり、 0.2dB/km である。よって 3dB 改善されるということは単純に伝送距離が伸びるということである。

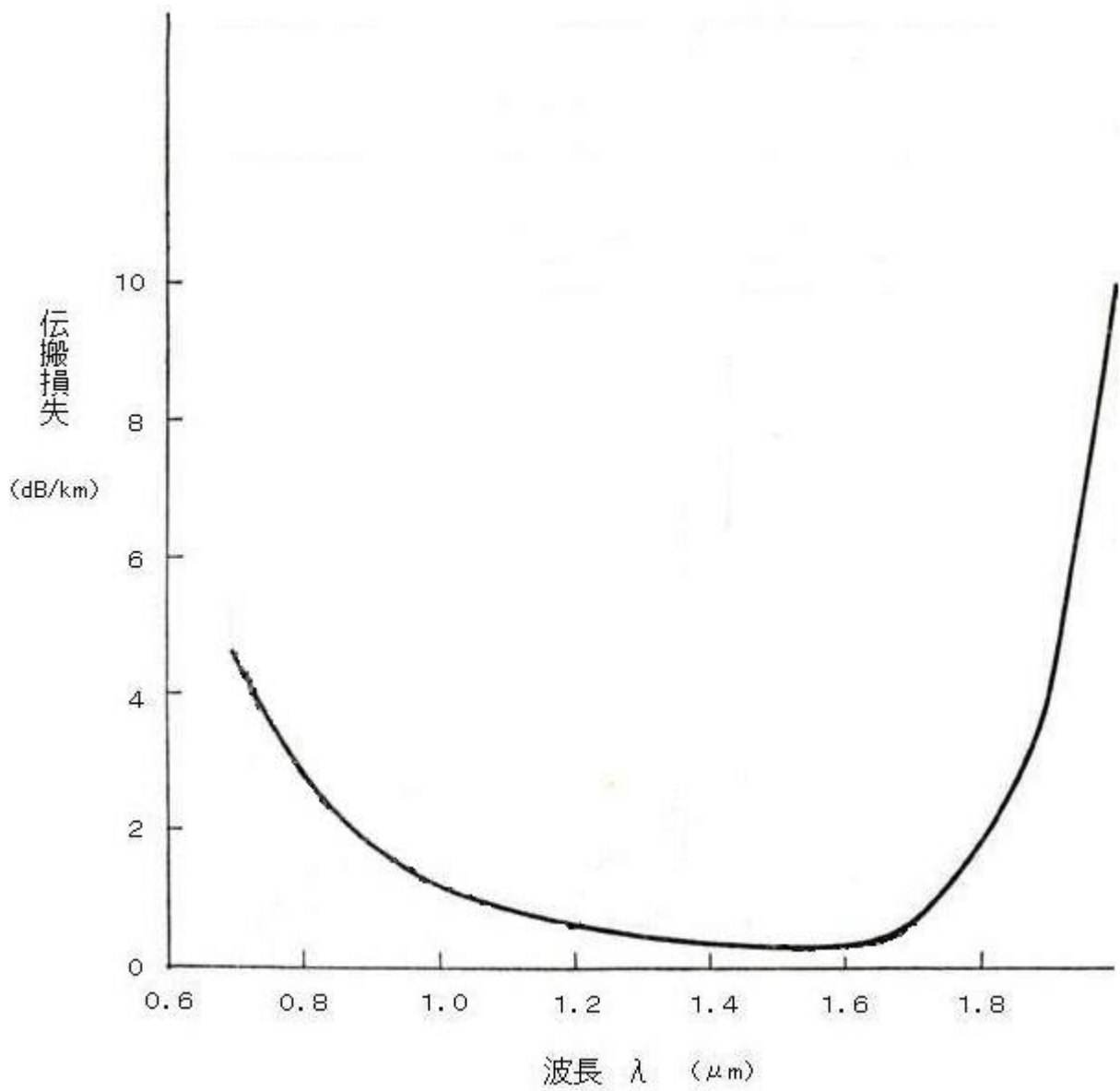


図 1 光ファイバの特性

1.3 光ファイバ通信で用いられる光源

光ファイバ通信で用いられる光源は、そのほとんどは異種の半導体を用いたダブルヘテロ構造の半導体レーザである。光ファイバの伝送損失が最も少ないことを考慮して、波長 $1.3\ \mu\text{m}$ または $1.55\ \mu\text{m}$ を出すことができる半導体レーザが用いられている。

この波長で使える半導体レーザには

- ・ InGaAs レーザ
- ・ AlGaAsSb レーザ
- ・ InGaAsP レーザ

がある。InGaAsP レーザが最も損失の少ない $1.55\ \mu\text{m}$ 帯をカバーしているのでよく用いられると考えられる。

1.4 光検出器

光検出には光起電力効果、光導電効果、光電子放出効果（光電効果）、焦電効果、フォトンドラッグ効果などの原理が用いられる。

受光素子（光検出素子）に要求される一般的条件として、

- (1) 検出光の波長に対し、高感度であること
- (2) 応答速度が速い
- (3) 信号対雑音比（S/N 比）がよいこと
- (4) 利用条件に対し、特性が安定していること

などがある。これらの条件を満たすことの出来る素子は、半導体の光検出器である pin-PD やアバランシフォトダイオードである。よって本研究ではこのような条件を満たすことの出来る半導体 p-n 接合の PD の作製を行う。

この章における参考文献

光通信素子工学 発光・受光素子

米津 宏雄 1984

電子・情報工学講座 9 電子通信材料工学

澤木 宣彦 1995

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を述べ、アバランシ現象とは何かということと、フォトダイオードに対するイオン化率、暗電流による影響について、およびヘテロ接合について述べる。

2.1 フォトダイオード (PD)

PDの基本構造はp-n構造である。p-n接合の一般的な電流 - 電圧特性を図2に示す。このp-n接合に光を入射することにより発生したキャリア、すなわち電子-正孔対は接合を横切り、光電流となって負荷回路を流れる。このようにして光を電気信号に変換することを利用したものがPDであり、逆方向電圧を印加して使用する。一般的なPDのエネルギーバンド構造図を図3に示す。入射光子を効率よく吸収してできるだけ多くの電子-正孔対を発生させ、さらに光に対する応答を早くするためには空乏層領域が光子の大部分を吸収できるように十分な幅を持たせておく必要がある。空乏層をのばすために真性半導体(i層)に近いドーパ率のn型またはp型(これらをi型ということがある)半導体が使われる。これをpinフォトダイオード(pin-PD)と呼ぶ。このようなpin-PDは量子効率が高く、暗電流 I_d が小さく、動作電圧が低いため極めて使いやすい特徴がある。pin-PDに入射する光の周波数を ν とすると、1光子あたりのエネルギーは $h\nu$ であるから、入射光パワー P_i に対しては、毎秒 P_i/h 個の光子が入射していることになる。ここでPDの量子効率を η とすると、 m 個の光子が $m\eta$ 個の電子(キャリア)に変換されることになる。このことからpin-PDの光電流 I_p は

$$I_p = \frac{eP_i\eta}{h\nu}$$

と表せる。ここで e は電子の電荷、 h はプランク定数である。

PDの応答速度は以下の3要因によって支配されている。

1. 光生成した少数キャリアが表面より拡散して空乏層に至る拡散時間
2. 空乏層を走るドリフト時間
3. 空乏層容量 C と負荷 R による CR 時定数

1については、表面より空乏層までの距離を走行する時間を考えないといけないため無視できないのは明らかである。

2についても、高速応答時には、空乏層を伸ばしているため空乏層内をドリフトする時間が無視できなくなるのは明らかである。

3について、空乏層をキャパシターと考えると、外部抵抗との一つの回路として考えられるため、時定数を考えないといけない。低周波に対する電圧振幅比が $1/\sqrt{2}$ になる、すなわち電力が $1/2$ ($= -3\text{dB}$) になる遮断周波数 $f(CR)$ は

$$f(CR) = \frac{1}{2 CR}$$

で求めることが出来る。 CR 時定数を小さくすることによって、遮断周波数の値は大きくなるので、より高周波に应答することが出来る素子の作製が可能となる。

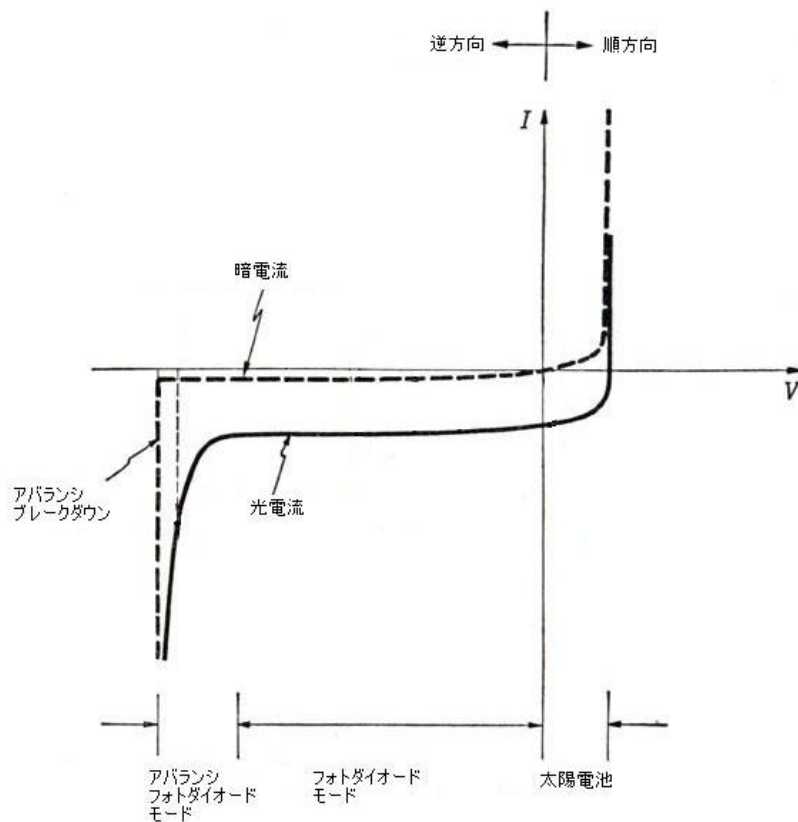


図 2 p-n 接合の I-V 特性

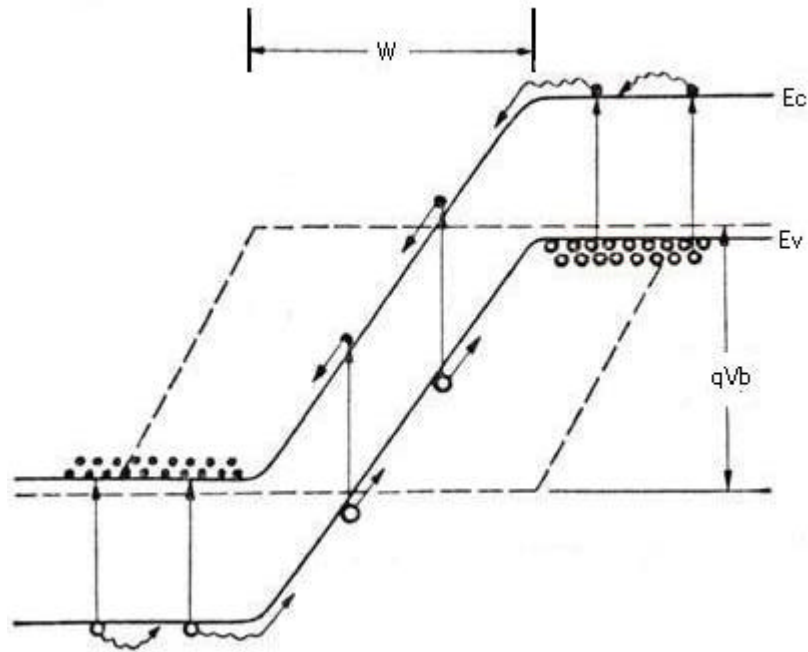


図 3 フォトダイオードのエネルギーバンド構造

2.2 アバランシフォトダイオード (APD)

p-n 接合に逆方向バイアス電圧を増加させるとキャリアが空乏層中で衝突電離によって別の電子-正孔対を発生する。さらに新しく発生したキャリアが電界で加速されてまた別の電子-正孔対を発生させる。このような過程を繰り返すことによってアバランシ現象を起こし、光電流を増倍させる PD が APD である。図 3 での逆方向バイアスのある電圧から急激に負の電流値が増えているが、そこがブレイクダウン電圧である。このブレイクダウン電圧は素子によって異なる。

図 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図を示す。

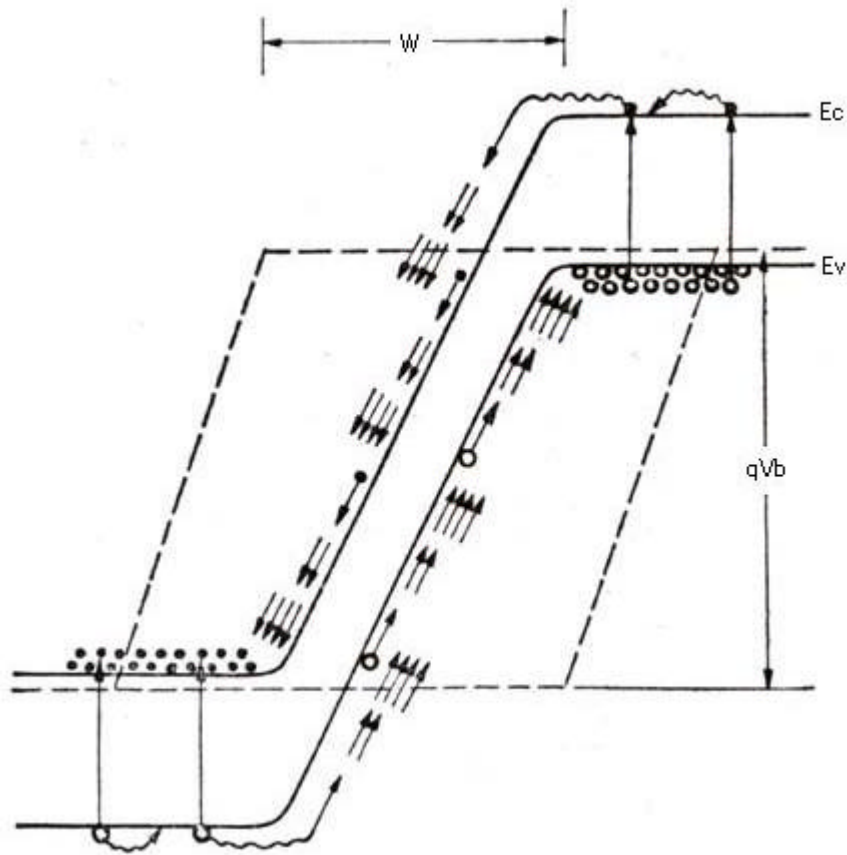


図 4 アバランシフォトダイオードのエネルギーバンド構造

今、PDに逆バイアス電圧を増加させていくと、ある特定の電圧において急激に電流が増する。これはキャリアが結晶格子に衝突し、イオン化によりキャリア数が急激に増殖されるため、それに比例して逆方向電流が増大するからである。一般にこの現象をアバランシブレイクダウンといい、このときの電圧をブレイクダウン電圧 V_B として表す。ブレイクダウン電圧 V_B においては、フィードバック効果によってイオン化が持続する。 V_B より低いバイアスを設定することによって安定に増幅された光電流が得られる。APDの増倍率 M はキャリアの衝突電離によるイオン化率によって表せる。つまり一個の電子が増倍領域 W を単位距離走行したときに発生する電子-ホール対の数が電子のイオン化率に等しい。同様にホールのイオン化率を n_h とし、キャリアのイオン化率が等しい($n_e = n_h$)の場合には最初に増幅領域へ入射したキャリアによって平均 n 個のキャリアが発生する。次に発生するキャリアの平均個数は n^2 になる。よって増倍率はこのような過程を繰り返すことにより

$$M = 1 + n + n^2 + n^3 + \dots = \frac{1}{1 - n}$$

と表せる。上式において n は逆バイアス電圧 V_b によって変化するため、次の式で与えられることが実験的に知られている。

$$M = \frac{I - I_{MD}}{I_p - I_D} = \frac{1}{1 - \left\{ \left(\frac{V_b - RI}{V_B} \right) \right\}^m} \quad m = \begin{cases} \text{Si: } 1.5 \sim 4 \\ \text{Ge: } 2.5 \sim 8 \end{cases}$$

ここで I は増倍電流、 I_{MD} は増倍暗電流、 I_p は光電流、 I_D は初期暗電流、 R は実効抵抗である。 $I_p \gg I_D$ の場合、 $V_b = V_B$ における最大の増倍率 M_{\max} は

$$M_{\max} = \left(\frac{V_B}{m I_p R} \right)^{1/2}$$

となり、逆に $I_p \ll I_D$ の場合、

$$M_{\max} = \left(\frac{V_B}{m I_D R} \right)^{1/2}$$

で表せる。したがって M は暗電流によって制限されることが分かるので、暗電流を十分押さえる必要がある。

APD のショット雑音は、増倍雑音が増倍されたキャリアによって発生し、ショット雑音電流の振幅の 2 乗平均値は

$$I_s^2 = 2e(I_p + I_d)M^2FB$$

と表される。

過剰雑音指数 F は電子注入の場合

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

$$k = -$$

で表される。 M は増倍率である。ホール注入の場合は $k \rightarrow \frac{1}{k}$ とすればよい。この k はイオン化率比であり詳しいことは次に述べる。

2.3 イオン化率比

イオン化比率とは結晶材料固有の雑音を示すパラメータである。 k の値は半導体結晶と素子の構造によって決められる係数である。このイオン化率比が小さいほど雑音が小さいので、小さければ小さいほど望ましい。ここでSiのイオン化係数はInPなどに比べて定量的に非常に小さいことが分かっている。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。各素子のイオン化率を示したグラフを図5に示す。

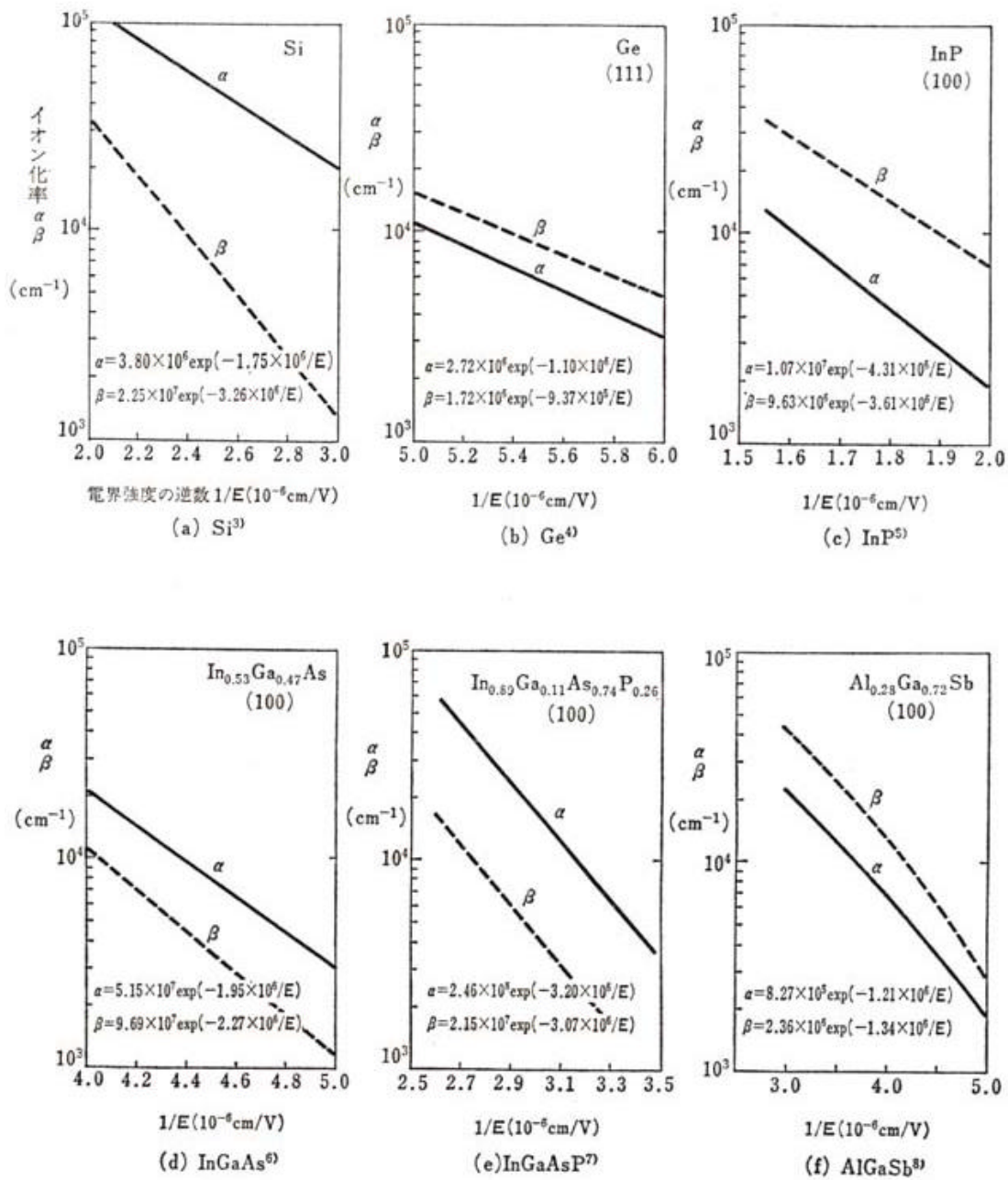


図 5 各半導体におけるイオン化率比

2.4 暗電流

PDの暗電流は小さいほど望ましい。この暗電流の原因としては

1. 飽和電流
2. 発生・再結合電流
3. トンネル電流
4. 表面リーク電流

の4つがあげられる。

まず、飽和電流についてであるが、飽和電流は p-n 接合やショットキー接合における逆方向飽和電流のことで、比較的バンドギャップの小さい Ge などの p-n 接合ではこれが暗電流の主因となる。

発生・再結合電流はバンドギャップの中央付近にある不純物準位から熱的に生成される電子・ホールによる電流で、飽和電流の小さい Si などの p-n 接合ではこれが主因となる。

トンネル電流は薄いポテンシャル障壁を挟んで左右に電子で占有されているエネルギー状態と電子で占有されていない空の同じエネルギー状態が存在すると、ある確率で電子が空のエネルギー状態に遷移するトンネル現象が生じることが分かっている。

表面リーク電流は結晶表面に露出する p-n 接合を介して流れる電流成分である。これについてはメサエッチングで詳しく述べる。

2.5 ヘテロ接合

GaSb/Si は異種の結晶同士をボンディングしているので、構造上はアンアイソタイプヘテロ接合になる。二つの格子定数の異なる半導体を接合すると、界面にダングリングボンドが発生して、界面準位が形成される。ダングリングボンドとは、図6に示すように、結合の手が余った部分のことである。図7に GaSb/Si のエネルギーバンド構造図を示す。

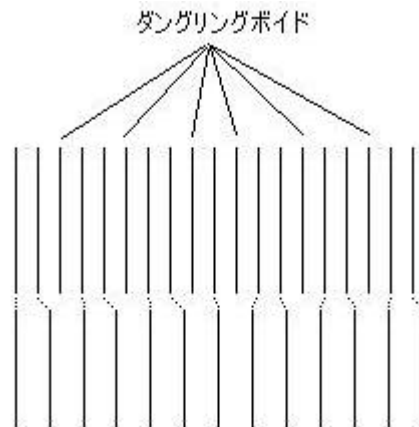


図 6 ダングリングボイド

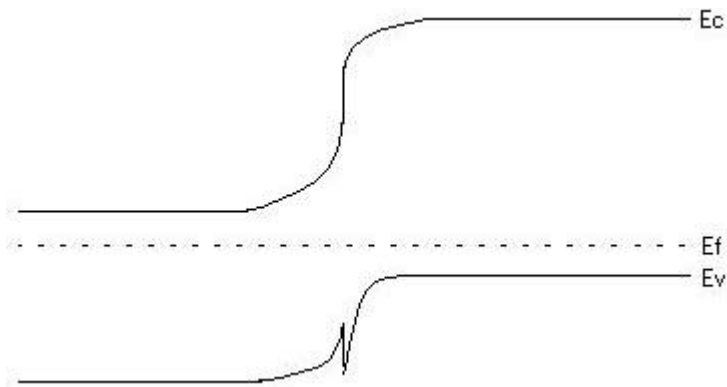


図 7 n-GaSb/p-Si のエネルギーバンド構造

この章における参考文献

光エレクトロニクスの基礎

宮尾 亘、平田 仁 1999

光通信素子工学 発光・受光素子

米津 宏雄 1984

森北電気工学シリーズ4 半導体工学(第2版) - 半導体物性の基礎

高橋 清 1993

電子・情報工学講座10 光エレクトロニクスデバイス

針生 尚 1994

基礎電気・電子工学シリーズ15 光エレクトロニクス

上林 利夫 1992

第3章 GaSb/Si および GaSb/p-nSi の構造と設計

本章では GaSb/Si の基板材料、構造について述べる。

3.1 基板材料

GaSb/Si の基板材料としては n^+ -GaSb と p^+ -Si を用いた。

GaSb/p-nSi の基板材料としては p-GaSb と p - n^+ Si を用いた。

n^+ -GaSb には Te をドーブした物を用いた。

p-GaSb には厚さ 400 μm 基板でノンドープの物を用いた。

p - n^+ Si には厚さ 400 μm で Sb ドープ基板の n^+ Si の上に B をドーブした p-Si を約 1 μm エピタキシャル成長させたものを用いた。

3.2 GaSb/Si PD の構造

GaSb/Si PD の層構造を図 8 に示す。Si ではバンドギャップが大きいため光通信に用いられる波長 1.55 μm の光は感受できないが、GaSb を光吸収層にする事により、光の波長 1.55 μm を感じる事が出来る。電極は GaSb 面にはアルミニウム、Si 面には Au-Ge 合金を蒸着することで電極とする。本来は電極を付けた後にエッチングを行いエッジブレイクダウンを押しさえるためのメサエッチングを施すべきであるが、今回は GaSb/Si PD に関してはヘテロ界面の検証を目的としたため、行っていない。GaSb が Si に比べて面積は小さい目にとつてあるが、これは経験的に上に乗せる素子の方を小さくすると、ボンディングが成功しやすいからである。

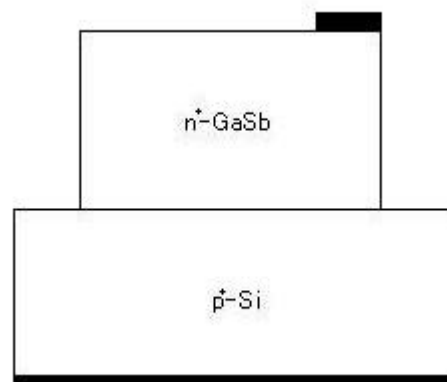


図 8 GaSb/Si の層構造

3.3 GaSb/p-nSi APD の構造

作製を試みようとしている GaSb/p-nSi APD の層構造を図 9 に示す。しかし、現状ではいまだ素子が出来ていないのでこれは最終的な完成された素子の形状を示す予定図である。メサ型エッチングを行っている理由としては、後の章で詳しく述べる。GaSb を受光部、p-nSi をなだれ増倍層としている。

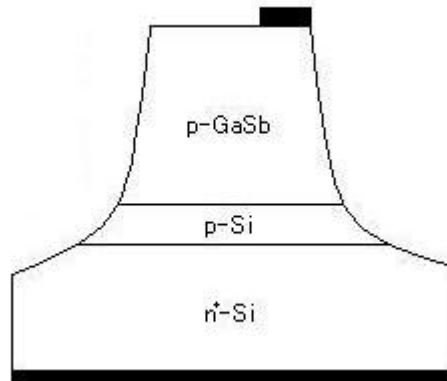


図 9 GaSb/p-nSi

第 4 章 GaSb/Si のウェハーボンディング

本章ではウェハーボンディングを用いる理由、そのために行った予備実験から得た情報により GaSb/Si ウェハーボンディングプロセスの確立、作製の条件を提示し、GaSb/Si、GaSb/p-nSi および Si/p-nSi の作製結果を示す。

4.1 ウェハーボンディングを用いる理由

GaSb と Si は格子定数が異なる (GaSb は 6.094、Si は 5.431) ため、Si の上に GaSb をエピタキシャル成長させることは困難である。そこで格子定数が異なっても素子同士を接着させ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て GaSb/Si を製作する。

4.2 予備実験

GaSb/Si のウェハーボンディングを行う前に、予備実験として現在成功例が知られている、格子定数が同じである Si/Si のウェハーボンディングと InP/Si のウェハーボンディングを行い、作製に成功した。この 2 種類のウェハーボンディングの結果に基づいて GaSb/Si のウェハーボンディングにおける手順の方針を決定している。

4.3 GaSb/Si のウェハーボンディングプロセス

ウェハーボンディングのプロセスは

- 1 基板洗浄
- 2 活性化
- 3 接触
- 4 窒素ブロー
- 5 アニール (熱処理)

である。以下に手順を詳細に述べる。

4.3.1 基板洗浄

基板洗浄は超音波洗浄をアセトン、純水によって行う。まず、アセトンをビーカーに適量を取り (およそ 20ml)、その中に小さく切った GaSb と Si の基板を入れ、そのあと、超音波洗浄機で超音波洗浄を行う。アセトンで 10 分行った後、純水をビーカーに適量を取り、超音波洗浄を 5 分行う。このことによって基板の表面についた小さなほこりや油などを取り去る。

4.3.2 活性化

活性化はまず弗化水素酸 5ml に水を 15ml 加えたエッチング液で行う。そのエッチング液に洗浄を行った基板を入れて、2 分間浸けることによって表面にできた自然酸化膜を除去する。この時点で基板の表面は弗化水素酸によって疎水性になっている。(OH 基よりも F の方が結合力が強いため) そのあと、GaSb と Si の表面を親水性にするため硫酸に 2 分間浸ける。表面に OH 基が付くことによってボンディングの確率が高くなる。

4.3.3 接触

純水中で鏡面同士を接触させる。接触させる際には鏡面を十分流水で洗い流す。ピンセットで表面に傷がつかないように十分気をつけながら接触させる。

4.3.4 窒素ブロー

接触させた後に窒素ブローによって余計な水分を吹き飛ばす。ファンデルワールス力でくっついていれば窒素ブロー程度でははがれない。

4.3.5 アニール(熱処理)

アニールは真空装置中の水素雰囲気中で行う。その時の条件は

- ・水素の流量は 30ccm
- ・加熱温度は 300 ~ 600
- ・水素の圧力は 0.6Pa および 1.8Pa
- ・加熱時間は 3 時間
- ・おもりは 900 グラムまたは 250 グラム(ジグの蓋の自重)

である。加熱用ヒーターに印加した電圧、流れた電流は、600 の場合で 6~12V、10~16A である。ここでの ccm という単位は一分間に何 cc 流れるかという単位である。アニールすると拡散して状態が均一になる。

アニールはアニール用ジグに素子を乗せて蓋をし、ジグの上におもりを乗せる。その際に使用したジグを図 10 に示す。

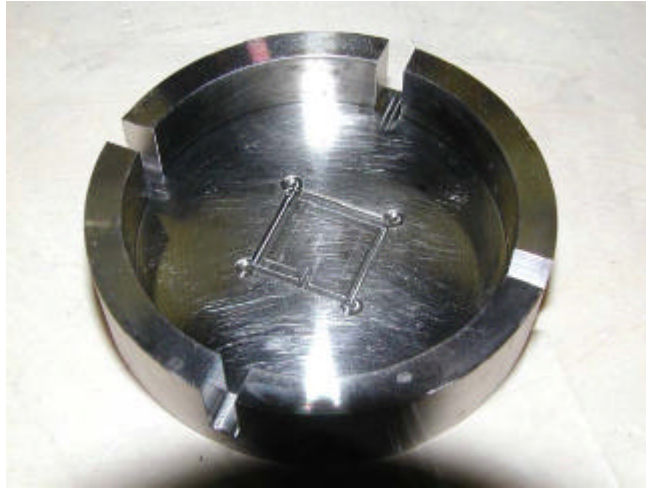


図 10 アニール用ジグ

4.4 実験結果

4.4.1 結果

実験の結果を表 1 にまとめる。このことによって分かったことは、温度依存性、エッチング液による変化、および条件が正しくとも必ずしも成功するとは言えないということである。

ここでのウェハーボンディングの成功というのは、アニールをしたのちの時点ではがれていない状態のことを示している。しかしながら前の文で述べたように、ウェハーボンディングが成功していても研磨ではがれることは起こりうるので、この時点では成功していても、素子として用いることが出来るかどうかはこの時点ではわからない。

組み合わせ	エッチャント		フッ酸処理時間	処理時間	温度()	水素圧力(Pa)	作製数	成功数
	左面	右面						
Si/Si	A	A	2min	2min	600	0.6	1	1
	A	A	2min	2min	600	1.8	1	1
InP/Si	A	A	2min	2min	600	0.6	1	1
GaSb/Si	B	B	2min	2min	600	0.6	6	4
	B	B	2min	2min	300	0.6	2	2
	B	B	2min	2min	-	-	2	-
	B	B	5min	2min	-	-	1	0
	B	A	2min	2min	300	0.6	2	1
	B	A	2min	2min	600	0.6	1	0
	A	A	2min	2min	-	-	2	-
Si/p-nSi	A	A	2min	2min	600	0.6	2	2
GaSb/p-nSi	B	B	2min	2min	300	0.6	1	0
	B	B	2min	2min	600	0.6	5	0
	B	B	2min	2min	500	0.6	1	0
	B	B	3min	2min	650	0.6	1	0
	B	B	2min	2min	600	1.8	1	0
	B	B	2min	2min	-	-	1	-
	B	A	2min	2min	-	-	2	-
	B	A	2min	2min	600	0.6	1	0
	B	A	5min	2min	700	0.6	1	0

A: $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$
 B: H_2SO_4

図の中で(-)は、アニールする前にボンディングがはがれてしまったためアニールを行っていない

表 1 条件によるウェハーボンディング成功率の関係

4.4.2 温度依存性、おもりによる変化及び水素の圧力について

表に示すように加熱温度を 300 にしてやってみたが、研磨には成功したものの、研磨の際に剥がれるという現象が起こったので、温度によって接着力は変化すると考えられる。さらにおもりによる変化があるかと考え、おもりを乗せずにボンディングをしてみたが、結果的にうまくいかなかった。そのほか、水素の圧力によっても変化すると考えられるが、実験上では水素の圧力の変化による以前に GaSb/p-nSi の接着がどのような条件下でも不可能であったのと、GaSb/Si の接着では変化が起こらなかったのが実際のところは不明である。

4.4.3 素子にかかる圧力

素子にかかる圧力は素子の大きさによって異なるが、各素子ともおよそ GaSb=0.8cm×0.8cm、Si=1.0cm×1.0cm 程度である。おもりの重さは 650g であり、ジグの蓋の自重は 250g であった。

よっておもりを乗せたときにかかる圧力は、 $1406.25\left(\frac{g}{cm^2}\right)$ である。

おもりを乗せなかったときにかかる圧力は、 $390.63\left(\frac{g}{cm^2}\right)$ である。

実際におもりを乗せずにアニールしたところ、接着力が弱く、ほんのわずかな力で結合が外れてしまった。

4.4.4 エッチング液による成功・不成功の比較

エッチング液と加熱温度の依存性を確かめるためいくつかの条件を変えてみた。その結果、GaSb は Si にとって最もよいエッチング液とされる $H_2SO_4+H_2O_2+H_2O=3:1:1$ の割合のエッチング液では、表面に火傷跡が発生し使い物にならないことが分かった。しかしながら、GaSb/Si の場合と Si/p-nSi でウェハーボンディングが成功しているエッチャントである H_2SO_4 が何故 GaSb/p-nSi でうまくいかないかは不明である。

4.5 Si/p-nSi の作製

GaSb/p-nSi がどうしても作れないため、p-nSi の方に問題があるのではないかと考え Si/p-nSi の作製に着手した。条件としてエッチング液には $H_2SO_4+H_2O_2+H_2O=3:1:1$ を用い、エッチング液以外は GaSb/p-nSi と同じ条件を用いた。結果としてはウェハーボンディングに成功し、研磨に耐えうる素子の作製に成功した。よって p-nSi にウェハーボンディングがまったく出来ないということはないであろうと考えられる。ではエッチング液に問題があるのではないだろうかと考え、 $H_2SO_4+H_2O_2+H_2O=3:1:1$ を用いずにこれまでと同じ条件のエッチング液である硫酸で行ったところ、やはりウェハーボンディングに成功した。これにより p-nSi が硫酸によってエッチングされないという事実も否定された。よってエピタキシャル成長と GaSb の接合自体に問題があると考えられるが、実際のところはよく分からない。

この章における参考文献

電子・情報工学講座 10 光エレクトロニクスデバイス 改訂版
針生 尚 1999

第 5 章 研磨

本章では作製した p-n 接合の研磨手順の説明を行う

5.1 はじめに

ウェハー表面についている保護膜およびボンディングを行ったときに発生する酸化膜の除去、拡散における応答速度の低下や吸収による光の減衰を防ぐために表面研磨を行う。表面研磨を行った後は、光を入射しやすくするために鏡面研磨を行う。

5.2 研磨手順

研磨の手順としては、まずボンディングした素子をジグにワックスで固定する。ホットプレートでジグを 100℃ まで熱し、ワックスを溶かす。ワックスは温度を上げすぎるとアセトンによって剥離するのが困難になるので熱し過ぎないように注意する。図 11 のように溶かしたワックスが素子に覆い被さるように十分乗せる事によって素子の一部分だけに負荷がかからないようにする。研磨剤は粗い粒子のものから細かい粒子のものへ順々に行った。研磨剤は酸化アルミニウムの粉末を用いる。GaSb は Si に比べてやわらかいためすぐに削れていってしまうので壊れないように気をつけて研磨を行う。

まず GaSb 面の研磨を行い、その後に Si 面の研磨を行った。片面の研磨が終わるとジグから一旦外すのだが、その際にワックスが十分に溶けている事を確認してから素子をジグから外す。外す際にワックスが十分溶けていないとピンセットの衝撃で素子が割れてしまうことがあるので十分注意する。ジグから外した素子にはまだワックスが着いているので、アセトンに浸けて超音波洗浄を行う。ワックスが目で見えて素子から十分に剥離されるまで超音波洗浄を行う。アセトンで洗浄した後は放置しておくとも表面に白い膜が発生してしまうので、メタノール洗浄を行う。これによって表面の白い膜は発生しにくくなる。十分に洗浄を行った後、純水でリンスしておく。

その後再びジグに乗せてワックスを溶かして固定し、同様の手順でもう片面も研磨を行う。

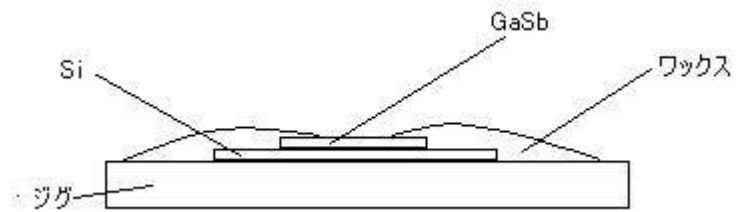


図 11 研磨

5.3 鏡面研磨

両面の荒削りが終わったら、鏡面研磨を両面に行う。鏡面研磨には鏡面研磨剤を用いて行う。鏡面研磨の手順は荒削り研磨と同じである。表面が目で見ても鏡面が出ていると思われるところまで十分に行う。鏡面研磨とは表面を一様に平らにするのであって、表面が削れる量というのは非常に少ないので厚さはほとんど変わらないと考えられる。

第6章 エッチングおよび電極付け

本章では各素子に対するエッチャントの提示、エッチングの必要性について述べ、電極をつける際のプロセスを述べる。

6.1 エッチングにおける効果

エッチングを行うことによって基板表面の性質や状態を変えることを活性化といい、素子を作る工程のいくつかの段階で行う。この研究では表面を硫酸系エッチャントを用いて行っているが、これによって表面が親水性化し、素子同士をファンデルワールス力で引き寄せることでウェハーボンディングの成功確率をあげていると考えられる。

6.2 エッチャント

エッチャントとして、GaSb、Siともに自然酸化膜除去にはHF(弗化水素酸)と純水を1:3で混合したもの(HF:46~48%)を、表面を親水性化するためにはH₂SO₄(硫酸)(H₂SO₄:97%)またはH₂SO₄+H₂O₂+H₂O=3:1:1(H₂SO₄:97%、H₂O₂:30%)を用いる。

6.2.1 SiO₂エッチング

SiO₂はSiの自然酸化膜であり、絶縁物である。大変よい保護膜にはなりうるが、素子の内面に存在することは好ましくない。このSiO₂は通常HFで取り除くことができる。しかし、自然酸化膜を取り除いた後のSiはHFによって疎水性となっている。ウェットエッチングに比べドライエッチングではウェハーボンディングの成功率が非常に低くなると考えられているので、表面を親水性になるように再度エッチングを行う必要がある。

6.2.2 Siエッチング

Siの表面が疎水性から親水性にするためには、硫酸系エッチャントでエッチングするのがよい。SiのエッチャントとしてはH₂SO₄のみとH₂SO₄+H₂O₂+H₂O=3:1:1で行う方法がある。今回の研究では両方のエッチャントを試してみたが、Siに対してはどちらも有効であることが分かった。

6.2.3 GaSb エッチング

GaSb も Si と同様に硫酸系エッチャントで行う。しかしながら $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} = 3:1:1$ で行った場合、表面に火傷跡みたいなものが残った。(図 12 参照) H_2SO_4 のみで行った場合には火傷跡は発生しなかった。(図 13 参照) そこで原因を調べるために $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O} = 3:1$ でエッチングを行ってみると火傷跡が発生しなかった。よって GaSb の火傷跡には H_2O_2 が関係していると考えられる。

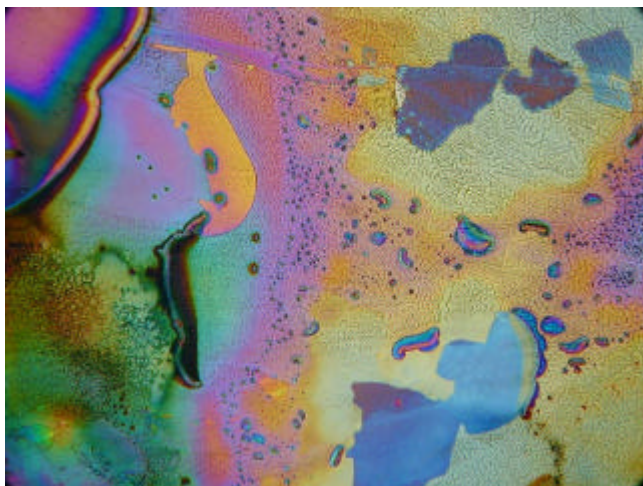


図 12 GaSb を $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} = 3:1:1$ で処理した表面



図 13 GaSb を H_2SO_4 で処理した表面

6.3 電極付け

電極付けは GaSb/Si には実際は行ってないが、実際の素子の作製においては重要なプロセスである。GaSb/Si の場合、GaSb 面には AuGe、p-nSi 面には Al を用いる。電極は真空蒸着によって行う。真空蒸着については次に述べる。

6.4 真空蒸着

真空蒸着によって電極をつける。その際に使用した蒸着用チャンバー及び内部構造を図 14、図 15 に示す。マスクは一辺 100 μm スクエア状に穴のあいているものを用いた。

真空蒸着で電極を付けたら Alloy を行って、電極と半導体部分を合金化してはがれにくくなる。Alloy については次に述べる。

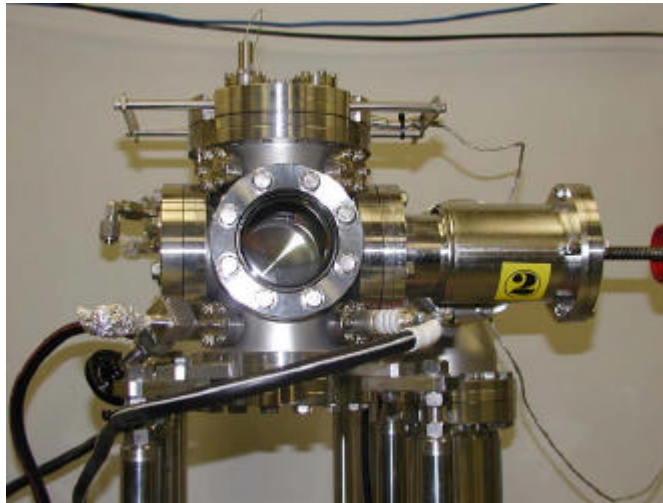


図 14 蒸着用チャンバー

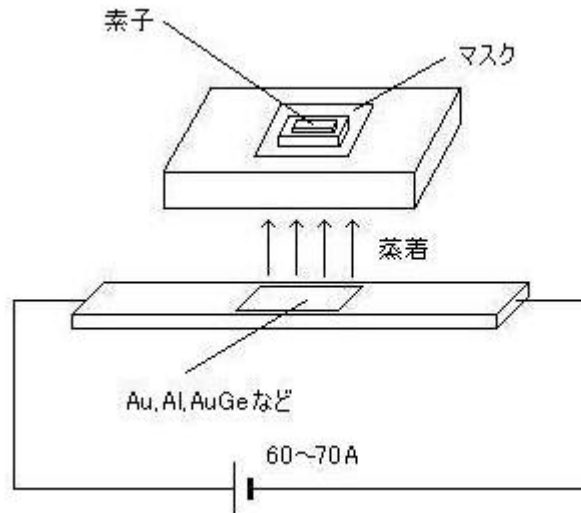


図 15 内部構造

6.5 Alloy

Alloy とは異種金属を溶かし合わせ、新たな特性を創り出すことである。合金には、置換型合金(substitutional alloy)と侵入型合金(interstitial alloy)とがある。固溶する金属が母体の原子位置に置き換わって入る場合を置換型、原子間に侵入する形で入る場合を侵入型という。2種の金属の大きさや化学的性質が似ているときには置換型になりやすく、一方が小さいときには侵入型になりやすい。

6.6 メサエッチング

メサエッチングは、表面でのエッジブレイクダウンを押さえるためにとられる手法のうちの一つである。空乏層内の正と負の電荷量が等しくなければならないから傾斜面のために多くなっている p^+ 領域側での (-) 電荷は、 n 領域側での (+) 電荷で補償される。したがって n 領域の空乏層端は、メサ表面近傍で p - n 接合から大きく遠ざかることになる。このため、メサ表遠近傍での電界強度が下がり、ブレイクダウン電圧が高くなる。このようにしてメサ構造にすることによって表面でのエッジブレイクダウンが押さえられる。

第 7 章 作製した素子の特性評価

本章では特性評価回路、および作製したヘテロ界面の p-n 特性を述べ、光起電力効果の重要性を述べる。

7.1 特性評価のための回路

特性評価のために用いた回路を図 16 に示す。ここで抵抗 $1k$ を電圧計で測ることによって電流を求めた理由は、流れる電流は非常に微弱 ($nA \sim \mu A$ 程度) であるので、電流計では測ることが出来ないからである。

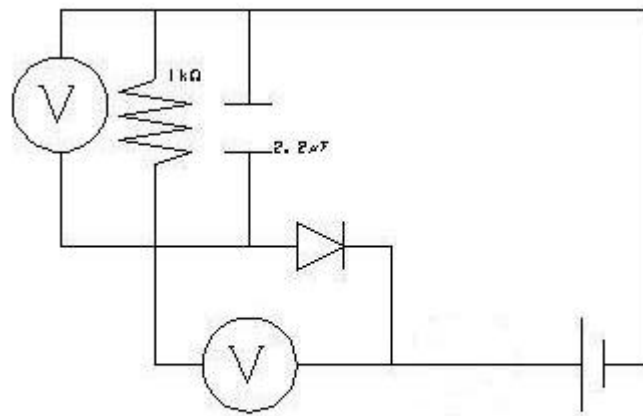
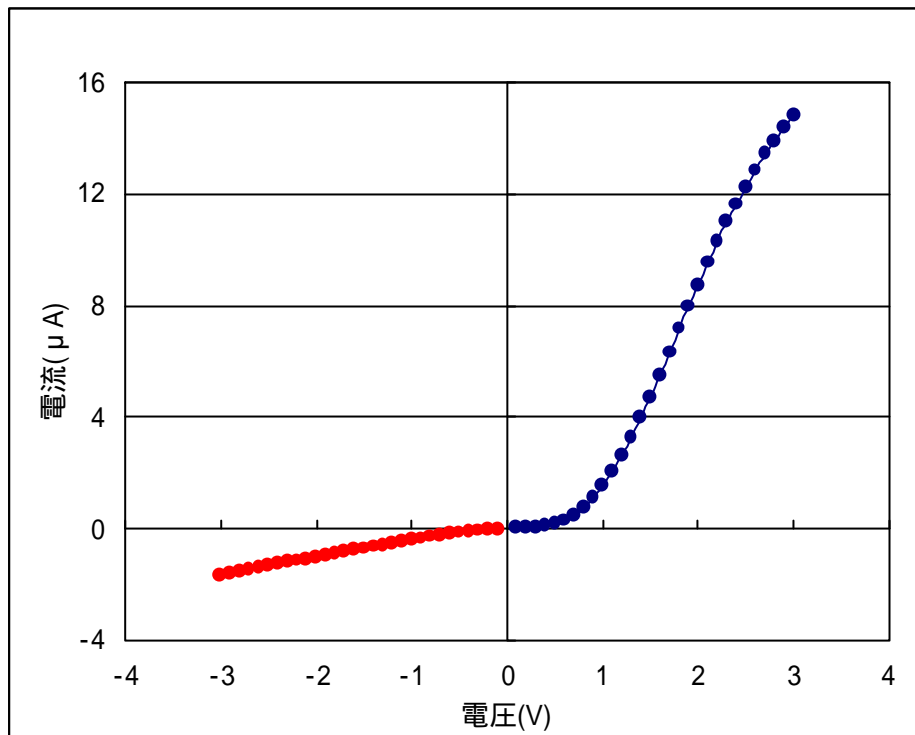


図 16 回路

7.2 電流 電圧特性

作製した GaSb/Si ヘテロ界面の I-V 特性をグラフ 1 に示す。これより言える事は、順方向電流と逆方向電流の流れ方が異なるため、方向性が出ているということである。しかしながら光起電力効果などを調べてはいないため、これだけでは PD として働くかということは疑問である。



グラフ 1 GaSb/Si ヘテロ界面の I-V 特性

7.3 光起電力効果

p-n 接合した素子に光を照射して電気出力として取り出すことを光起電力効果という。本来は実際に作製した素子に波長 $1.55 \mu\text{m}$ の光を照射して光起電力効果が実際に起きるかどうかを測定すべきであったが、今回は電極も満足に付いていないこともあり、光起電力効果の測定は行っていない。しかし、この実験は非常に重要な実験である。

第 8 章 結論

- 1 . 光通信用 1.55 μm 用受光素子としての GaSb/p-nSi の有用性について説明した。
- 2 . GaSb/Si のウェハーボンディングプロセスについて説明し、その手法を確立した。
- 3 . GaSb/Si のヘテロ界面の作製に成功し、I-V 特性を調べたことにより、方向性が出ていることがわかった。
- 4 . GaSb/Si 以外にも、Si/p-nSi、InP/Si、Si/Si のウェハーボンディングプロセスについても検討し、ヘテロ界面の作製に成功した。

謝辞

在学中すべての期間において、また本研究においてご指導、助言をいただきました高知工科大学電子・光システム工学科 神戸宏教授に深く感謝いたします。在学中すべての期間において、原先生をはじめ電子・光システム工学科の皆様にご指導、助言、叱咤激励をいただきましたことを深く感謝いたします。

実験の助言をいただきました、大橋渉氏、塩尻裕一氏、田中聡氏に感謝いたします。

実験に協力していただき、お世話になりました加瀬川亮氏、大西健一氏に深く感謝いたします。