

特別研究報告書

題目

Fe の真空蒸着による β -FeSi₂ の作製

Fabrication of β -FeSi₂ by vapor deposition of iron

指導教員

神戸 宏 教授

報告者

1075029

川西 正

平成 17 年 2 月 21 日

高知工科大学 大学院 工学研究科 基盤工学専攻
電子・光システム工学コース

Fabrication of β -FeSi₂ by vapor deposition of iron

Tadashi Kawanishi

Abstract

In optical fiber communication systems, photodiodes (PD's) play the important role as devices to convert the optical signal into electrical signal, deciding the system performance. InGaAs/InP PD's are commonly used in the systems with 1.3/1.55- μ m wavelength regions. Silicon avalanche photodiodes (APD's) are known as ideal APD's, having lower noise with lower cost than InGaAs/InP APD's. However, silicon has no sensibility to 1.3/1.55- μ m bands, because of its bandgap energy. In this study, we fabricate β -FeSi₂ (beta iron silicide) by Fe vapor deposition for a PD material with narrow band gap. We also fabricate Ge/Fe/Si heterojunctions to realize APD's for the optical communication systems.

A β -FeSi₂ layer was successfully fabricated on a Si wafer by Fe vapor deposition and post-annealing at a temperature of 900 °C under a low-pressure hydrogen atmosphere about 50 Pa. The β -FeSi₂ layer was confirmed with RBS and Raman spectra. The directional I-V characteristics were observed but photocurrents were not. The reason is that the β -FeSi₂ layer was too thin to raise photocurrents. It is needed to fabricate thicker layer using the other methods.

Ge/Fe/Si heterojunctions were also successfully fabricated using a wafer bonding method. The I-V characteristics were not so good that reverse currents were large, however, photocurrents by a 1.55- μ m-band lightwave were observed. The dark currents were quite large and the photocurrents relatively small, and so it is needed to improve dark currents and quantum efficiencies to realize Ge/Fe/Si heterojunction PD's.

目次

1. はじめに	3
1.1 研究の背景	3
1.2 研究の概要	4
1.3 研究の結果	5
(1) Fe の真空蒸着による β -FeSi ₂ の作製	5
(2) Ge/Fe/Si ヘテロ接合の作製	5
1.4 本論文の構成	6
2. β -FeSi ₂ を用いたフォトダイオード	7
2.1 フォトダイオードの原理	7
2.2 ヘテロ接合 APD	9
2.3 β -FeSi ₂ について	9
3. Fe の真空蒸着による β -FeSi ₂ の作製	11
3.1 装置	11
(1) 真空蒸着装置	11
(2) 熱処理装置	11
(3) 記録計	11
3.2 実験の概要	13
3.3 作製工程	13
(1) 洗浄	14
(2) 真空蒸着	14
(3) 熱処理	14
4. 作製した β -FeSi ₂ の評価	16
4.1 評価	16
(1) 光学顕微鏡写真	16
(2) X 線回折分析	17
(3) 顕微ラマン分光分析	17
(4) I-V 特性	18
4.2 考察	19

5. Ge/Fe/Si ヘテロ接合の作製	20
5.1 装置	20
5.2 実験の概要	21
5.3 作製工程	21
(1) 洗浄	22
(2) 真空蒸着	22
(3) ボンディング・熱処理	22
6. 作製した Ge/Fe/Si ヘテロ接合の評価	24
6.1 評価	24
6.2 考察	28
7. 結論	32
謝辞	33
参考文献	33
付録	34

1. はじめに

この章では、まず研究の背景、目的、概要、および本論文の構成について述べる。

1.1 研究の背景

近年、インターネットの普及に伴い、ブロードバンド回線を敷設する家庭も急速に増えている。わが国における高速インターネット接続サービスの契約数を図 1.1 に示す¹⁾。この図に示すように、2001 年頃から DSL(デジタル加入者線)サービスの普及が始まり、2002 年にはより広帯域な FTTH(家庭向け光ファイバ)サービスも普及し始めている。2004 年 6 月末現在、DSL の加入数は 1212 万件、FTTH の加入数は 176 万件に達した。

現在は、わが国のブロードバンドサービスは DSL サービスが中心である。現在下り最大 50Mb/s の伝送速度をうたう ADSL サービスが提供されているが、伝送距離が長くなるにつれ実際の通信速度は急激に低下し、伝送距離 1km で 25Mb/s 程度、距離 2km で 8Mb/s 程度の伝送速度とされている。このため、今後はより高速大容量で長距離伝送が可能な FTTH サービス、すなわち光ファイバ通信への要求がますます強まるものと考えられる。

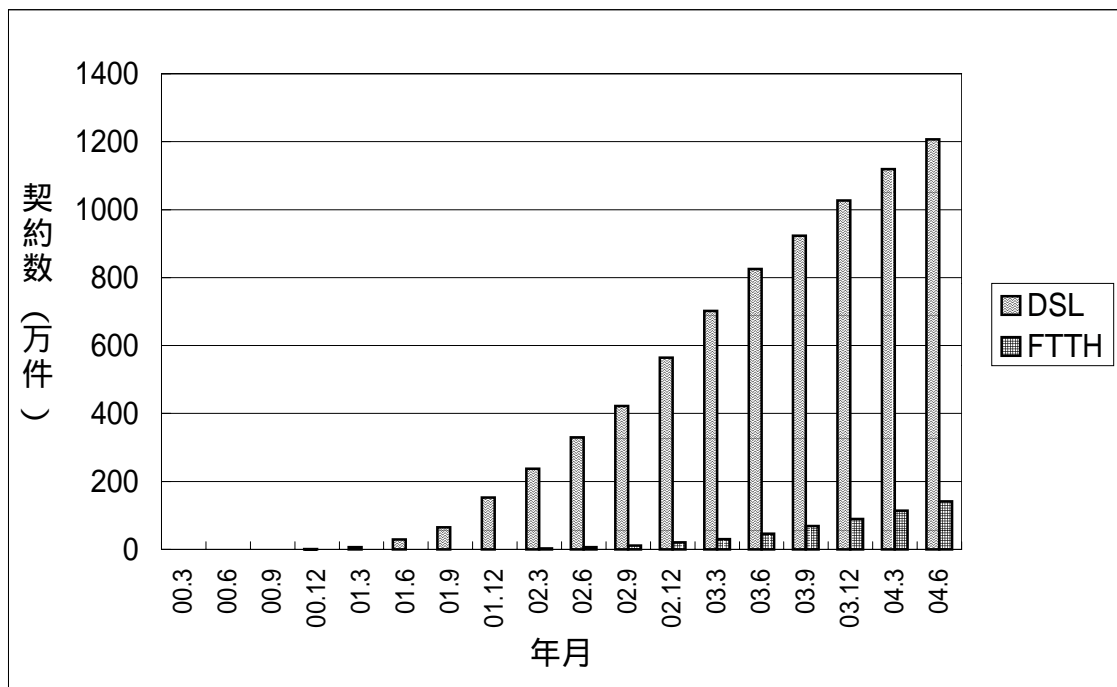


図 1.1 高速インターネット接続サービス契約数の推移

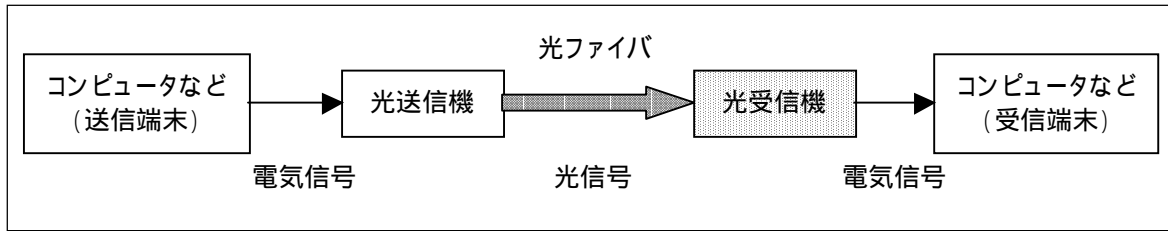


図 1.2 光ファイバ通信システム

光ファイバ通信システムの基本的な構成図を、図 1.2 に示す。光ファイバ通信システムでは、電気信号としての音声や映像、コンピュータのデータなどの情報は、光送信機によって光信号に変換されて光ファイバを伝送され、伝送された光信号は光受信機で電気信号に復元される。

これら光ファイバ通信システムに用いられる部品は、従来の電気通信に用いられる部品に比べて高価であり、そのため FTTH サービスのコストは DSL サービス等と比べて割高となっている。今後 FTTH サービスの更なる普及には、光ファイバケーブルおよび光送信機に使われる発光素子や光受信機に使われる受光素子をはじめとする光通信電子部品や光部品の低価格化が欠かせない。

本研究は、波長 $1.3\sim 1.55\ \mu\text{m}$ 帯用の受光素子に関するもので、現在使われている受光素子にかわる、低価格で高性能な受光素子の実現を目的とする。最終的な目標としては、比較的低位ビットレート、すなわち FTTH のようなシステムに用いられるアバランシフォトダイオード (APD) の実現であるが、本研究では $\beta\text{-FeSi}_2$ および Ge/Fe/Si ヘテロ接合を用いたフォトダイオードの作製を目指し、これらの材料の作製方法および特性評価を進めた。

1.2 研究の概要

現在、光通信用受光素子には InGaAs PIN フォトダイオード (PIN PD) や、InGaAs/InP APD が広く用いられている。

InP より雑音の小さい Si を用いれば、より高性能な APD を実現できる可能性がある。また、FTTH では各家庭に光伝送装置を設置することになるが、毒性の面からみただけ As の使用を減らしたい。さらに、In はさほど資源量が豊富ではないため、近い将来資源枯渇の心配もある。このように、性能、低毒性、資源問題の 3 つの側面から、Si を基板とする受光素子の実現は有意義である。

しかしながら、Si には光通信に用いられる $1.3\ \mu\text{m}\sim 1.55\ \mu\text{m}$ 帯の光に対する感度がないため、Si フォトダイオードはこの波長域を用いる光通信用受光素子には適さない。そこでわれわれは、Si を基板とし、Ge や GaSb、 $\beta\text{-FeSi}_2$ など $1.3\ \mu\text{m}\sim 1.55\ \mu\text{m}$ 帯の

光に対して感度のある物質を受光部としたヘテロ接合 APD を提案している⁽¹¹⁾。

本研究では、まず、Si の化合物であり、バンドギャップエネルギーが約 0.7~0.8eV であるとされる β -FeSi₂ に注目し、Si 基板に Fe を蒸着し、熱処理するという簡便な方法で、Si 基板上に β -FeSi₂ 層の形成を目的として研究を進めた。

さらに、 β -FeSi₂ 作製を試みる研究の過程で、Fe が Si と Ge の双方に親和性が高いことに気付き、Si と Ge との間にごく薄い Fe 層をはさみこむことで、Si と Ge のウェーハボンディングを実現できるのではないかと考え、Ge/Fe/Si ヘテロ接合形成を目指した研究を行った。

1.3 研究の結果

本研究で得られた結果を簡単にまとめておく。

(1) Fe の真空蒸着による β -FeSi₂ の作製

Si ウェーハに Fe を真空蒸着した後、約 900°C の水素雰囲気中で熱処理することによって β -FeSi₂ の薄膜を形成することができた。この β -FeSi₂/Si ヘテロ接合は、方向性のある I-V 特性を示した。しかしながら光ファイバ通信に用いられる 1.55 μ m 帯の光に対する感度を観測することはできなかった。

Fe の真空蒸着によって β -FeSi₂ の作製は可能であることを確認したが、今後の課題として、他の手法により、Si ウェーハ上により厚い β -FeSi₂ 層を形成する必要があることを明らかにした。

(2) Ge/Fe/Si ヘテロ接合の作製

Si ウェーハに Fe を真空蒸着し、さらに Ge ウェーハを張り合わせることにより、Si と Ge のウェーハボンディングに成功した。これにより、ウェーハボンディングの手法による直接的な Si/Ge 接合よりも、容易に安定なヘテロ接合が形成可能であることがわかった。この Ge/Fe/Si ヘテロ接合を形成したサンプルは、漏れ電流が大きく良好な I-V 特性は観測できなかったが、1.55 μ m の光に対して初めて光電流を観測することができた。

暗電流の低減と量子効率の向上などのため、Si/Fe/Ge 接合界面付近の元素分布やバンド構造の解析とその最適化、および Si や Ge に対して Fe が侵入することによる半導体特性への影響の定量化とその制御など、特性向上に向けた今後の課題を明確にした。

1.4 本論文の構成

まず第 2 章では、 β -FeSi₂を用いたフォトダイオードの原理について述べる。次に第 3 章で Fe の真空蒸着による β -FeSi₂の作製について、実験装置や作製手順を述べる。その評価結果は第 4 章で報告する。続いて第 5 章では Ge/Fe/Si ヘテロ接合の作製について、実験装置や作製手順を述べる。その評価結果は第 6 章で報告する。最後に、第 7 章に結論をまとめる。

2. β -FeSi₂を用いたフォトダイオード

本章では、まず研究の背景となるフォトダイオードの原理について簡単に述べ、続いて研究対象である β -FeSi₂ の特徴について簡単に触れる。

2.1 フォトダイオードの原理

光ファイバ通信では、伝送されてきた光信号を電気信号に復元するため、受光素子が必要である。光通信用の受光素子としては、PIN フォトダイオード(PIN PD) や アバランシフォトダイオード(APD) が用いられる。

PIN フォトダイオード (PIN PD)

波長 λ の光の周波数 ν は、光の速度を c とすると、

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad (2.1)$$

で表される。また、周波数 ν の光は、量子論では、エネルギー

$$E = h\nu \quad (2.2)$$

をもつ光子の流れである。ここで、 h はプランク定数。

半導体に、そのバンドギャップエネルギー E_g に相当する光の波長 λ_c より波長 λ が短い光を入射すると、光の吸収によって電子・正孔対が励起される。ここで、バンドギャップエネルギー E_g と遮断波長 λ_c の関係は、式(2.1), (2.2) より、次式のようになる。

$$\lambda_c = \frac{hc}{E_g} \quad (2.3)$$

図 2.1(a) にフォトダイオードの構造を模式的に示す。半導体材料に λ_c より波長の短い光が入射すると光の吸収により電子・正孔対が励起される。

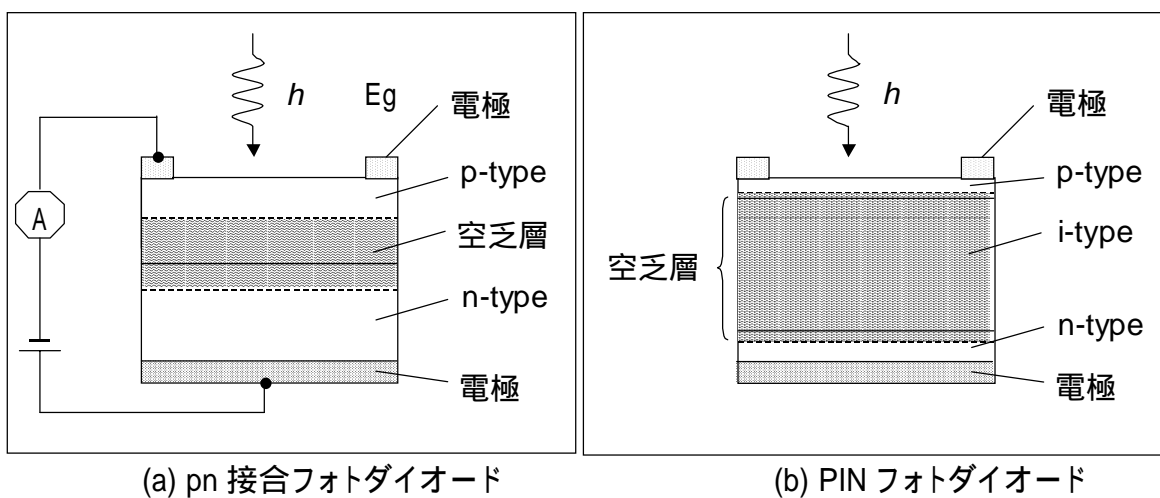
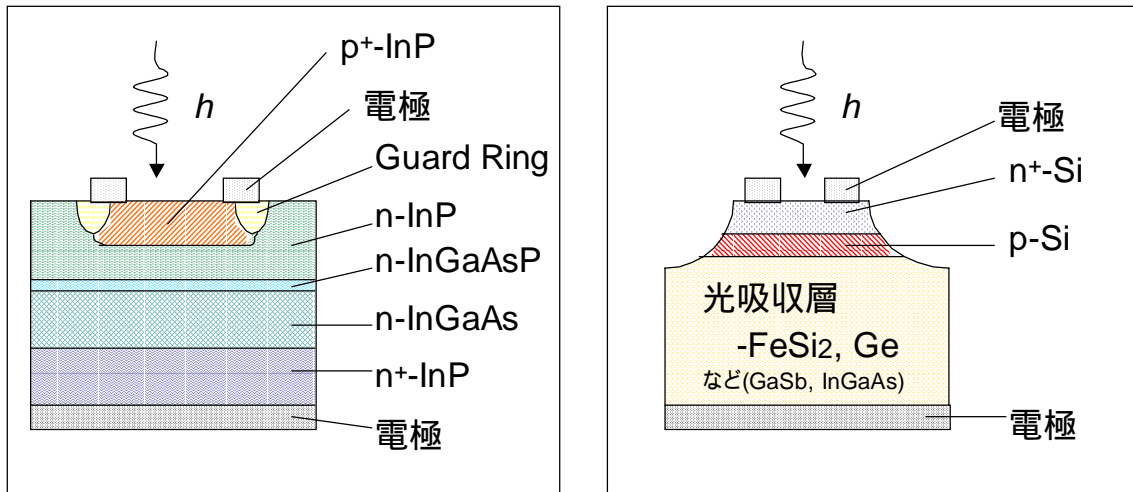


図 2.1 フォトダイオードの構造



(a) 実用化されている光通信用 APD

(b) Si を基板とする APD

図 2.2 アバランシフォトダイオードの構造

pn 接合の空乏層中で励起された電子・正孔対は、空乏層電界でドリフト電流となり外部に流れる。フォトダイオードは逆方向バイアス電圧を印加された状態で使用する。光がないときの電流を暗電流と呼び、理想的なダイオードでは逆方向の飽和電流である。光が入射したときに流れる電流を光電流と呼び、入射光電力に比例した電流が流れる。

実際には、光吸収効率を上げるため、図 2.1(b) のように、p 型半導体と n 型半導体の間に真性半導体又は不純物濃度の低い半導体のはさみ込まれた構造が用いられる。これにより広い空乏層が得られ、変換効率や応答速度が向上する。このような構造のフォトダイオードを PIN フォトダイオードと呼ぶ。

アバランシフォトダイオード (APD)

pn 接合ダイオードを降伏点近くまで逆バイアスすることにより、発生した光電流をなだれ増倍させ、より大きな電流を取り出せるフォトダイオード(アバランシフォトダイオード・APD)も用いられている。図 2.2(a)に、現在広く用いられている光通信用 InGaAs APD の構造例を示す。

APD では、なだれ増倍に伴って発生する雑音、すなわち なだれ雑音はイオン化率比 $k = \alpha / \beta$ (α は電子のイオン化率、 β は正孔のイオン化率。 $\alpha > \beta$ の場合は $k = \beta / \alpha$ が用いられる)に支配され、 k が小さいほどなだれ雑音が低減されることが知られている。Si(k =およそ 0.02)は InP(k =およそ 0.4)と比べイオン化率比 k が非常に小さく APD に適しているが、Si はバンドギャップ $E_g = 1.12\text{eV}$ 、光の波長に換算して $\lambda_c = \text{約 } 1.1 \mu\text{m}$ であり、1.3~1.55 μm 帯の光に対する感度がない。このため、Si フォ

トダイオードは 1.3~1.55 μm 帯を用いた光通信用受光素子として使うことができない。

2.2 ヘテロ接合 APD

われわれは Si を基板とし、Si で形成された pn 接合をなだれ増倍層、光吸収層を 1.3~1.55 μm 帯の光に対する感度のある低バンドギャップ材料とするヘテロ接合 APD を提案している。その構造例を図 2.2(b) に示す。

図 2.2(a) に示した光通信用 APD では、InP を基板とし、光吸収層には InGaAs が用いられている。この場合、InGaAs の格子定数を InP の格子定数と一致させることが可能であり、エピタキシャル結晶成長法により実現されている。また InP 基板と InGaAs 光吸収層の間に InGaAsP バッファ層を形成することにより、基板と格子定数を一致させたままゆるやかにバンドギャップエネルギーを調整する方法が取られている。これによりバンド不連続によるキャリアの蓄積を防いでいる。

一方、Si と Ge などの低バンドギャップ材料では、バンドギャップだけでなく格子定数も異なる。一般に、格子定数の異なる物質のヘテロ接合の実現は結晶成長法では困難とされている。またそのようなヘテロ接合は界面にひずみを生じ、素子の経時変化やトラップ準位の原因になるとされている。こういったトラップ準位の存在は、素子の受光性能や電氣的な性能の低下の原因となりうる。

2.3 $\beta\text{-FeSi}_2$ について

高度情報化社会の進展に伴い、大量の半導体材料が消費されている。現在、電子デバイスや電力デバイスの材料としては Si が多く用いられているが、光デバイス材料としては、0.8 μm 帯では GaAs 系、1.3~1.55 μm 帯では InP や InGaAs 系の材料が広く使われている。

しかしながら、地球環境問題が脚光を浴びてきている現在、As のような有毒な元素の使用量はなるべく減らしたい。一方、In 資源は必ずしも豊富とは言えず、太陽電池や液晶パネルなどの透明導電膜として ITO (インジウム・スズ酸化物) 膜が大量に使われていることもあり、In 資源の枯渇が懸念されている。

$\beta\text{-FeSi}_2$ は、 $E_g =$ 約 0.7~0.8eV、光の波長に換算して $\lambda_c =$ 約 1.6 μm の、直接バンドギャップの半導体といわれている。上で述べた環境問題や資源問題への懸念が広がる中、As を使わず、かつ資源量も豊富な $\beta\text{-FeSi}_2$ を光デバイスなどの材料として用いることが期待され、環境半導体材料として広く研究が進められている。

また、 $\beta\text{-FeSi}_2$ は Si を構成元素とする化合物半導体であるため Si ウェーハとの整合性も期待され、多くの Si ウェーハへの $\beta\text{-FeSi}_2$ 形成成功例が報告されている。現在までのところ、イオン注入法 (IBS) で作製された $\beta\text{-FeSi}_2$ の 1.54 μm のフォトルミネセンス

が観測された報告¹³⁾ や、レーザアブレーション法(PLD)で β -FeSi₂ が試作された報告¹⁴⁾ など、受光素子以外にも太陽電池や発光ダイオード(LED)などへの応用研究が盛んに行われている。

イオン注入法 (IBS)

IBS 法では、添加したい物質はイオン源でイオン化され、加速器によって数十 keV～数 MeV に加速されて Si 基板に打ち込まれる。加速するエネルギーによってイオン注入の深さを、イオン電流の制御によってイオン注入量をコントロールできるので、LSI 製造工程における不純物ドーピング法として広く用いられている。

IBS 法による β -FeSi₂ 形成としては、Fe⁺ イオンは数十 keV に加速され Si ウェーハに注入される。その後 Fe を注入された Si ウェーハを RTA 処理することなどによって β -FeSi₂ を形成する方法などが行われている。

レーザアブレーション法 (PLD)

ターゲット材にパルスレーザーを照射すると、ブルームと呼ばれる発光状態を発生する。PLD 法では、このブルームによって基板上に薄膜を形成する。

PLD 法による β -FeSi₂ 形成法としては、Si 基板上に Fe 膜を形成した後に熱処理する方法、FeSi₂ ターゲット材を用いて Si 基板上に β -FeSi₂ 膜を形成する方法、Si 基板上に Fe と Si 層を交互に形成した後レーザー照射や熱処理によって Fe と Si を反応させて β -FeSi₂ を得る方法などが実施されている。

本研究で用いた真空蒸着法は、上で述べた IBS 法や PLD 法などと比べ不純物が混入しやすく、また蒸着量の定量的な制御ができないという欠点はあるものの、さほど大掛かりな装置を必要としない簡便な薄膜形成法であり、半導体への電極形成などに用いられている。本研究では、Si ウェーハ表面に真空蒸着法で Fe を蒸着し、熱処理するという簡便な方法で β -FeSi₂ を形成することを検討した。

3. Feの真空蒸着による β -FeSi₂の作製

本章では、本研究で進めた Fe の真空蒸着による β -FeSi₂ の作製に使用した装置と、作製手順について述べる。作製したサンプルの評価については次章で考察する。

3.1 装置

(1) 蒸着装置

蒸着装置の外観写真を図 3.1 に、その構成図を図 3.2 に示す。

本装置では、ベース圧力 10^{-3} Pa 以下の真空雰囲気中でタングステン(W)ボートに電流を流して加熱することにより、Fe, Al, Auなどを蒸着することができる。

(2) 熱処理装置

熱処理装置の外観写真を図 3.3 に、その構成図を図 3.4 に示す。

1Pa以下の真空雰囲気中、もしくは約50Paの減圧水素雰囲気中で、最高1,100°Cでの熱処理が可能である。

(3) 記録計

従来、装置の圧力や温度を約1時間ごとにノートに記録していたが、山武製記録計DP500を譲り受けることができたので、これを熱処理装置に接続して使用した。

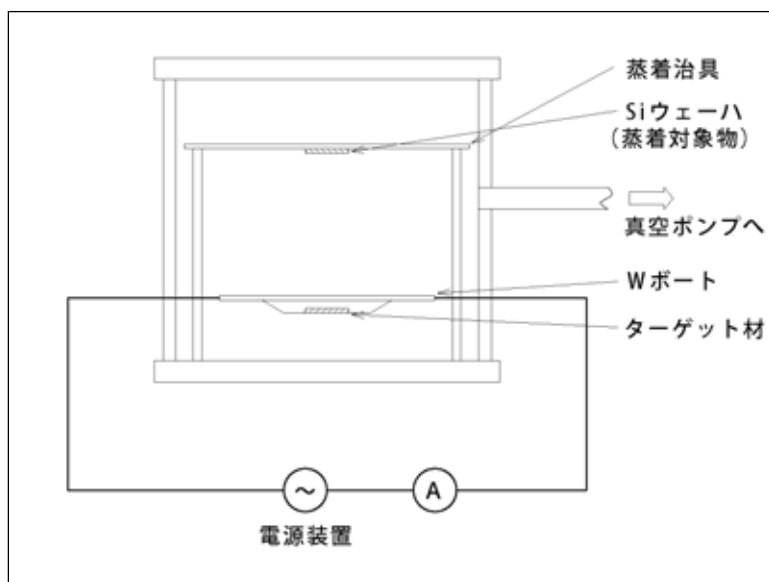


図 3.1 蒸着装置

図 3.2 蒸着装置の構成



図 3.3 熱処理装置

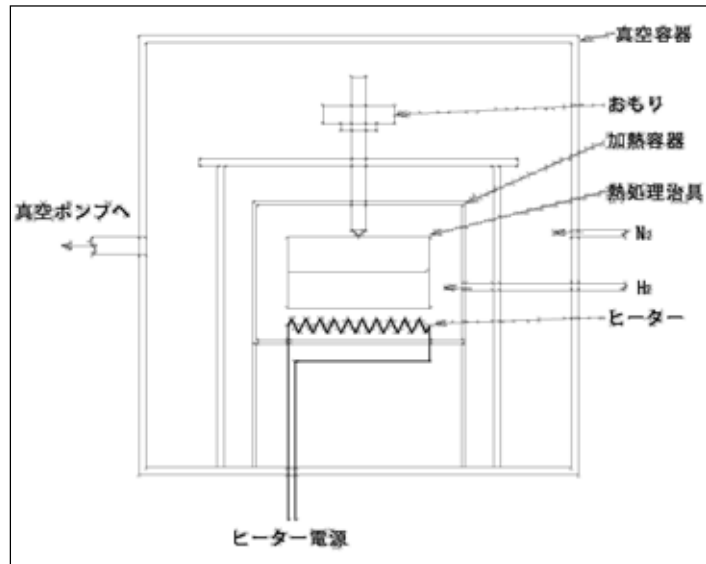


図 3.4 熱処理装置の構成

表 3.1 記録計に接続したプロセス量

CH	測定量	測定レンジ
1	上部温度	0~1000°C
2	圧力	0~200Pa
4	H ₂ 流量	0~200ccm
5	下部熱電対起電力(*1)	0~50mV
6	室温	0~50°C

(*1) 熱処理装置下部熱電対には B 熱電対を使用している。本記録計は直接 B 熱電対を入力することができないため、熱電対の起電力をそのまま記録計に入力した。

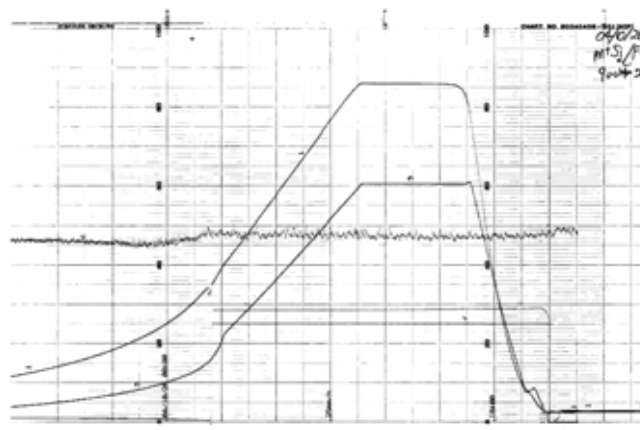


図 3.5 記録計の記録サンプル

この記録計は電圧信号のほか、熱電対の直接入力も可能な 12 入力のもので、現在は表 3.1 に示す 5 種類のプロセス量を入力し記録している。図 3.5 に、記録サンプルを示す。従来の 60 分ごとの手作業での記録に対し、記録計の使用により連続な記録が可能となった。また、人為的な数値の書き間違いなども検証できるようになった。

3.2 実験の概要

第 2 章で述べたように、Si を基板とし、光吸収層を GaSb や Ge、 β -FeSi₂ とする APD を作製することができれば、光通信用受光素子の低価格化、高性能化に有効である。そこで、われわれは以前、Si を基板上に Fe を蒸着もしくはスパッタし、熱処理することによって、 β -FeSi₂ を光吸収層とするフォトダイオードの作製を試みた。しかし、Fe と Si を反応させるためには 900°C もしくはそれ以上の温度での熱処理が必要と考えられるが、従来使用していた装置では高々 750°C 程度までしか温度を上げて熱処理をすることができず、 β -FeSi₂ の形成は成功しなかった。そこで、今回 1,100°C までの熱処理が可能な装置を導入し、Fe の蒸着と熱処理による β -FeSi₂ の作製を試みた。

3.3 作製工程

β -FeSi₂ 作製工程の概略を図 3.6 に示す。Si 基板は、超音波洗浄とフッ酸による表面酸化膜除去の後、Fe を蒸着し、水素雰囲気中での熱処理によって Fe と Si を反応させ β -FeSi₂ を作製する。

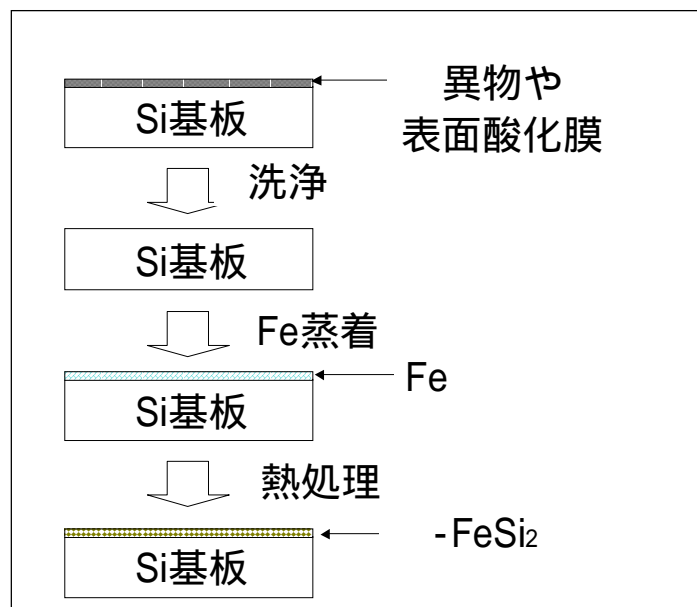


図 3.6 Fe の蒸着による β -FeSi₂ 作製工程

(1) 洗浄

約 8mm□にカットされた Si ウェーハは、まずアセトン、メタノール、純水中で超音波洗浄を行い、異物の除去をする。その後、バッファードフッ酸とフッ酸で金属性の異物の洗浄と表面酸化膜の除去をする。表 3.2 に洗浄工程の手順をまとめる。

表 3.2 洗浄工程の手順

洗浄液	洗浄時間	洗浄方法
アセトン	5 分	超音波洗浄
メタノール	5 分	超音波洗浄
純水	10 分	超音波洗浄
B-HF (16 バッファードフッ酸)	5 分	
純水		水を替えて 5 回すすぐ
フッ酸 (*2)	10 分	
純水		水を替えて 5 回すすぐ

(*2) 市販の 46wt%フッ化水素酸を純水で HF:H₂O=3:7(容積比)で希釈して使用。

(2) 真空蒸着

真空蒸着工程の手順は下記の通りである。Fe の真空蒸着では、高温の Fe が空気に触れないよう、Al や Au 電極作製のための真空蒸着時に比べて、装置を十分に冷ましてからサンプルを取り出す必要がある。

- ① φ0.5×10mm のワイヤー状の Fe 蒸着材をタングステンポートに置く。
- ② 洗浄済み Si ウェーハを固定用治具に固定し、蒸着装置にセットする。
- ③ 真空ポンプを起動し、圧力 10⁻³Pa 以下になるまで真空を引く。
- ④ 電流 65A(電圧約 3.3V) で 4 分間蒸着。
- ⑤ 常温になるまで(2 時間以上)放冷。
- ⑥ サンプル取り出し。

(3) 熱処理

実験開始当初は、異物の残存や表面クラックなどが発生した。洗浄工程での操作不手際その他、蒸着装置がクリーンルームの外にあるためサンプルをハンドリングする過程で少量の塵埃が付着してしまう場合がある。このため、Fe を蒸着後、熱処理装置にセットする前に超音波洗浄を行うことにより、前工程で付着してしまった異物の除去を試みた。

表 3.3 熱処理温度パターン

No.	温度① 時間①	温度② 時間②	温度③ 時間③
1	800℃ 2 時間	800℃ 2 時間	400℃ 2 時間
2	900℃ 2 時間	900℃ 2 時間	400℃ 2 時間 30 分
3	1000℃ 2 時間	1000℃ 2 時間	400℃ 3 時間

(*3) 例えば No.1 のパターンでは、常温から 800℃まで 2 時間で昇温後、800℃を 2 時間保持し、400 度まで 2 時間かけて降温する。400℃からは自然放冷。

また、サンプルが高温の状態装置に N₂ 導入を行うとサンプル表面が黒変してしまう場合があった。これは鉄の窒化が原因と思われる。350℃以下で N₂ 導入をすれば、表面の黒変はみられないが、現在は余裕をみて、300℃以下で N₂ 導入をするようにしている。

さらに、熱処理後のサンプル表面にクラックの発生も観測された。Si と FeSi₂ の熱膨張係数の違いが原因とみられ、温度の急昇降、特に降温時の温度勾配を小さくする必要がある。

このような試行錯誤の結果、以下の手順で処理を行うことにより、外観上良好なサンプル作製が可能となった。

- ① Fe 蒸着済み Si ウェーハをアセトンで 5 分間超音波洗浄する。
- ② 洗浄済みのサンプルを熱処理装置にセットする
- ③ 真空引き 1Pa 以下
- ④ H₂ 供給開始 (水素供給量 50ccm で約 50Pa の水素雰囲気になる)
- ⑤ 圧力が安定したら(約 7~10 分放置)プログラム調節計により所定の温度パターンで熱処理する。温度パターンの例を表 3.3 に示す。
- ⑥ 加熱終了後、温度が 300℃以下になってから、N₂ 導入(200Pa)。
- ⑦ 放冷、40℃以下でサンプル取り出し。

以上のように、真空蒸着時にサンプルが十分冷えてから取り出すこと、蒸着後、熱処理前にもアセトンによる超音波洗浄を実施すること、熱処理時の昇降温速度を緩やかにするとともに N₂ 導入は 300℃以下で行うことなどを工夫することにより、良好なサンプルを作製することができるようになった。

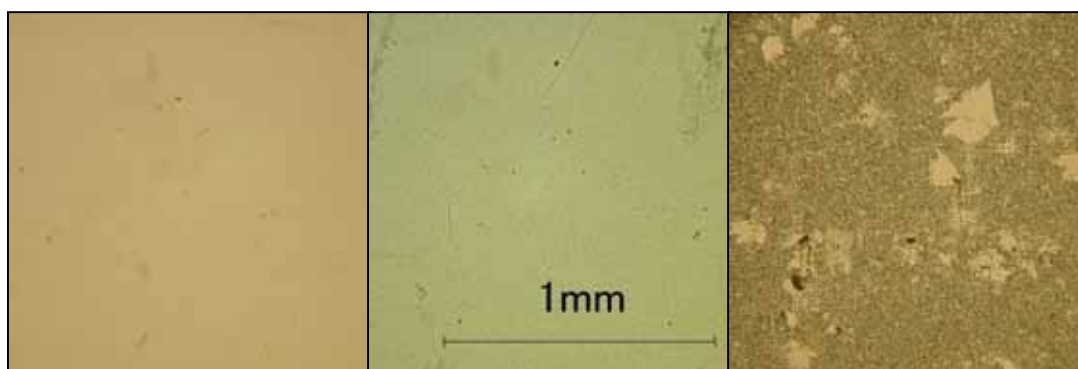
4. 作製した -FeSi_2 の評価

本章では、前章で述べた手順で作製したサンプルの評価方法と結果、およびその考察を述べる。

4.1 評価

(1) 光学顕微鏡写真

作製サンプルの光学顕微鏡写真を図 4.1 に示す。800°C および 900°C で熱処理したサンプルでは微視的には島状の凝集が存在するものの巨視的にはほぼ均一な表面状態になっているのに対し、1000°C で熱処理されたサンプルでは表面が不均一になっている。



(a) 800°C

(b) 900°C

(c) 1000°C

図 4.1 熱処理後の Fe 蒸着 p-Si (光学顕微鏡写真、×100)

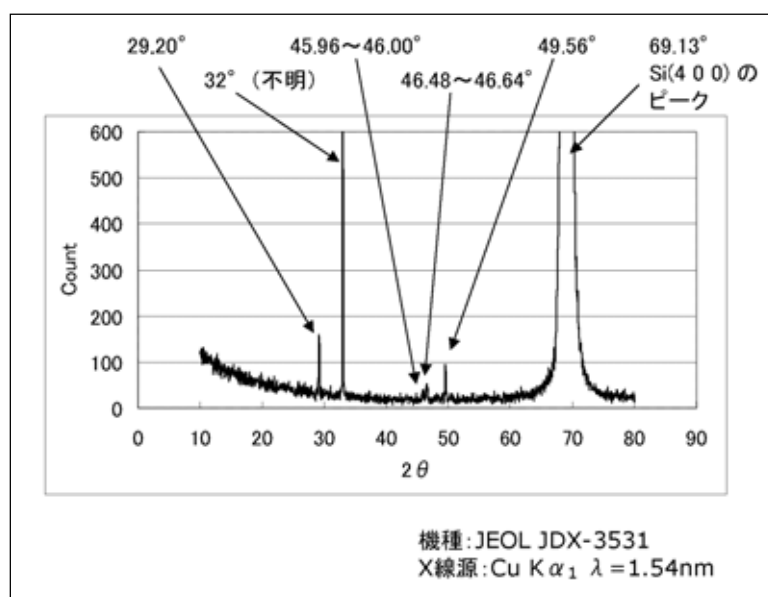


図 4.2 X 線回折スペクトル (熱処理温度 900 °C)

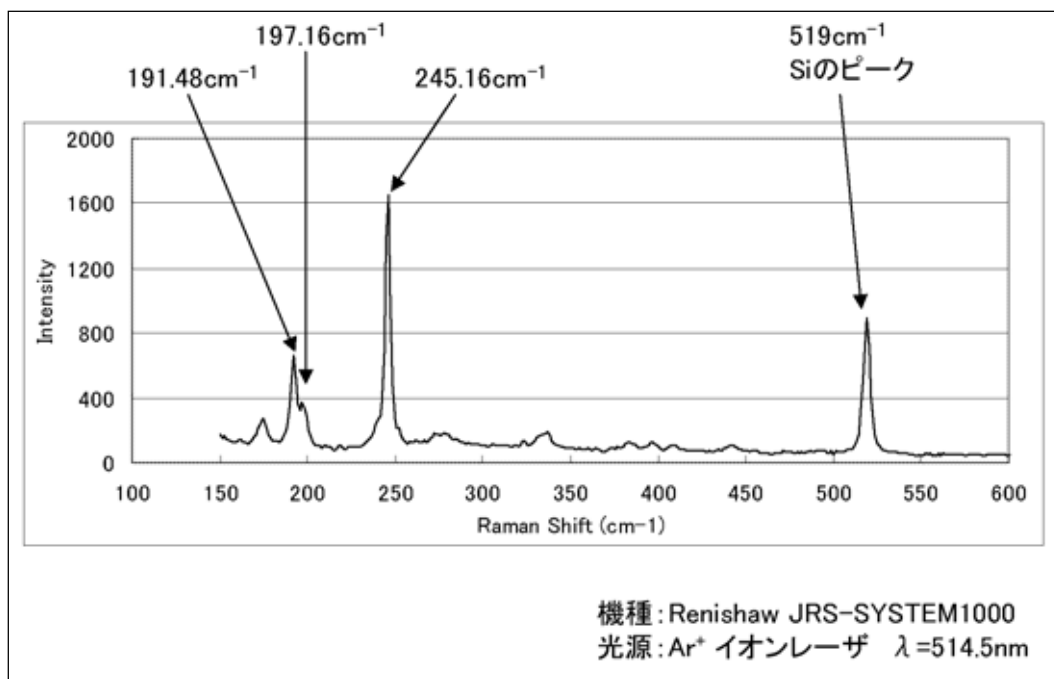


図 4.3 顕微ラマン分光スペクトル (熱処理温度 900)

(2) X線回折分析 (XRD)

X線回折分析による測定例を図 4.2 に示す。800°Cおよび900°Cで熱処理したサンプルでは既知の β -FeSi₂ とよく一致する回折角にピークを観測したが、1000°C熱処理したサンプルでは β -FeSi₂ のピークを観測できなかった。

(3) 顕微ラマン分光分析による評価

顕微ラマン分光分析による測定例を図 4.3 に示す。XRD と同様、熱処理温度 800°C および 900°C で熱処理したサンプルでは既知の β -FeSi₂ のピークとほぼ同じ波数にピークを観測した。熱処理温度 1000°C のサンプルでは β -FeSi₂ のピークを観測できなかった。

一方、同様に 900°C で熱処理されたサンプルでも、作製ロットによってピーク波数はほぼ同じであるが相対強度にはかなりのばらつきがあった。微妙な作製条件の差が、でき上がった β -FeSi₂ の結晶品質に大きく影響するものと推定した。

以上の XRD およびラマン分光分析の結果から、Si に Fe を真空蒸着し 900°C 以下で熱処理したサンプルでは、 β -FeSi₂ 層を形成することができたと結論した。

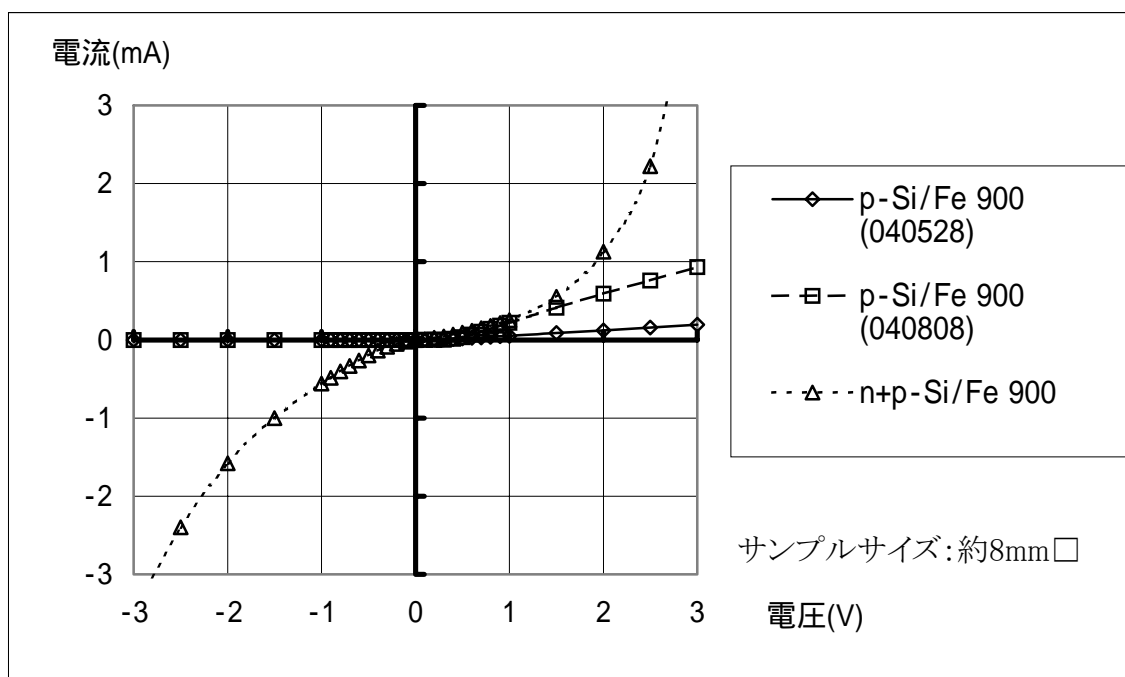


図 4.4 I-V 特性

(4) I-V 特性

作製したサンプルの裏面に、Au を真空蒸着し、400°Cで 10 分間熱処理して電極を形成した後、このサンプルの I-V 特性を測定した。測定結果を図 4.4 に示す。

p-Si に Fe を蒸着して熱処理を行ったサンプルでは、熱処理温度 900°C以下で Si→Fe 側に方向性を示す。図示していないが、熱処理温度が 1000°Cのサンプルではカーブトレサによる測定で短絡に近い状態となり、方向性を示さなくなった。

pn-Si エピタキシャルウェーハに Fe を蒸着して熱処理を行ったサンプルでは、図 4.4 に示すように I-V 特性において Si の pn 接合が本来持っている方向性が弱まりオーミックに近づいた。熱処理による Fe の何らかの作用により Si の pn 接合は破壊されてしまったと結論した。

方向性を示す 900°Cで熱処理されたサンプルに可視光を当てると、順方向、逆方向とも多少電流値が増加した。Si ウェーハ中で光励起若しくは熱励起された電子・正孔対によりキャリアが増加したためと考えられる。また、このサンプルに光通信用 1.3 μm および 1.55 μm 光源を当ててみたが、有意な電流値の変動を観測することはできなかった。すなわち、β-FeSi₂でのキャリア発生は認められなかった。

4.2 考察

Si ウェーハに Fe を蒸着して 900°C 以下で熱処理するという簡便な方法で β -FeSi₂ の作製が可能であることが、XRD およびラマン分光分析の結果から確認できた。しかし、900°C 2 時間の同条件で違う日に作製したサンプルでもラマン分光分析の相対ピーク強度が異なっていたことから、わずかな作製条件の違いでも作製された素子の結晶性に大きく影響することがわかった。

作製されたサンプルは、p-Si 基板に対して明確な方向性をもつ I-V 特性を示すので、n 型の β -FeSi₂ 層が形成され、p-Si と n- β -FeSi₂ のヘテロ接合が作製されたと結論した。

しかし、このサンプルに 1.3 μm や 1.55 μm の光を当てても光電流を観測することができなかった。 β -FeSi₂ 層の厚さを定量的に測定する適当な方法がないが、 β -FeSi₂ 層はおよそ 0.1 μm 以下と推定され、光吸収がほとんど発生していないとも考えられる一方、バンドギャップエネルギーが 1.5 μm 付近であることも考えられ、スペクトル測定による十分な考察も必要である。可視光に対して多少電流の変動がみられるのは、Si の光励起や熱励起でキャリアが増えバルク抵抗値が下がったのが原因であると考えた。

1.3~1.55 μm 帯の光に対して光電流を発生させるためには、十分に厚い(数 μm 以上の) β -FeSi₂ 層の作製が必要である。Si を基板、 β -FeSi₂ を光吸収層とする 1.3~1.55 μm 帯の光検出器が可能な PD を作製するためには、磁気スパッタなどの方法により厚い β -FeSi₂ 層の作製が必要である。その際、 β -FeSi₂/Si 界面の結晶状態やバンド構造についての検討も必要となろう。

5. Ge/Fe/Siヘテロ接合の作製

本章では、Feの真空蒸着とウェーハボンディングによるGe/Fe/Siヘテロ接合の作製における装置と工程について述べる。作製したサンプルの評価と考察は次章で記述する。

5.1 装置

真空蒸着装置および熱処理装置は、第3章で述べた装置と同じである

貼り合わされた異種半導体ウェーハは、熱処理治具を使って熱処理を行いウェーハボンディングを完成させる。今回、従来の熱処理治具に問題点が発生したので、治具の改善を行った。

ウェーハボンディング作業においては、サンプルを熱処理治具にセットし、上からおもりによる荷重をかけた状態で熱処理を行うことによりボンディングを完成させる。当初、汎用ステンレス鋼(SUS304)製の熱処理治具(図5.1(a))を使用していたが、高温での熱処理によりSiが治具に張り付いてしまうとともに、Geがステンレス製の治具に溶け込んでしまった。そこで、この治具の上に20mm□の石英ガラス板を置きその上にSiやGeの基板を置くことで対応したが、この方法ではどうしても多少の機械的なガタを避けられず、基板に均一な力をかけるのが困難であった。また、最高1,000°Cへの加熱によりSUS304製の治具表面の劣化も発生した。

そこで、次に図5.1(b)に示すセラミック製の治具を導入した。しかし、この治具を用いてボンディング実験を行ったところ、2回目の実験の時に治具が破損してしまった。熱衝撃による破損と考えられる。また、白色だったセラミック表面がSiやGeによる汚染で黒変した。

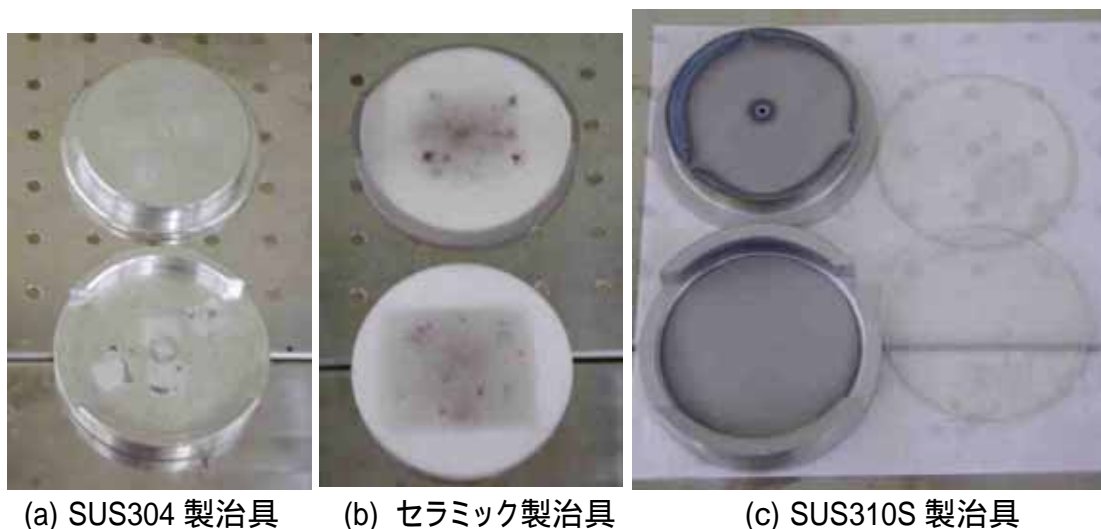


図 5.1 熱処理治具

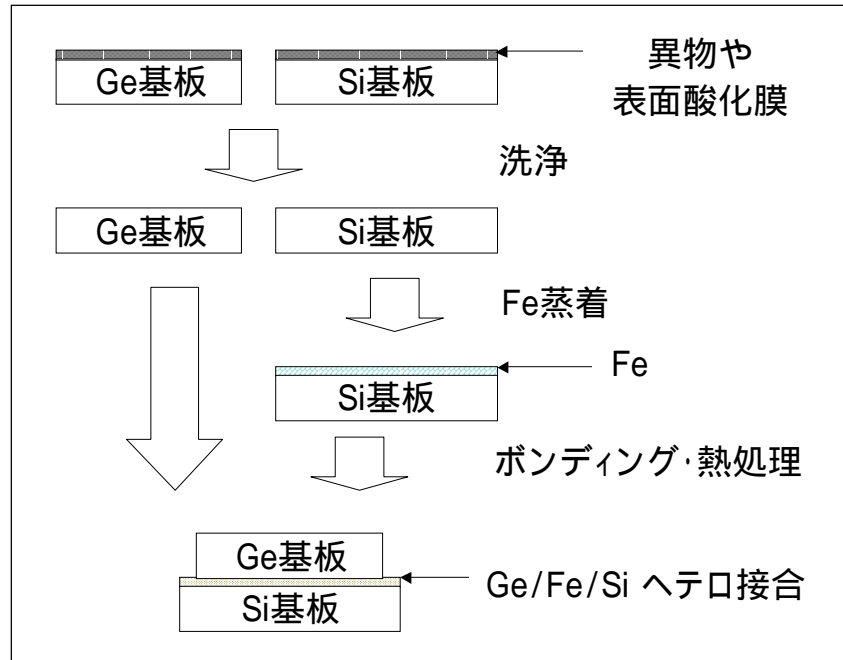


図 5.2 Ge/Fe/Si ヘテロ接合作製工程

そこで、今回高耐熱ステンレス鋼 SUS310S と石英ガラス板による治具を設計した。設計、製作された治具の外観写真を図 5.1(c)に示す。新しい治具の使用により、耐熱性と操作性が改善し、ボンディングの成功率も向上した。

なお、今回作製した治具の設計図を付録 1 に示した。

5.2 実験の概要

第 3 章では Fe の蒸着による β -FeSi₂ の作製について述べた。一方、われわれはウェーハボンディングの手法によって、Si を基板とし、Ge を光吸収層とする APD 作製に関する実験も行っている。2003 年度までに、Si と Ge のウェーハボンディングに成功し、一定の I-V 特性や C-V 特性を得たが、いずれも 1.55 μ m 帯の光に対する感度を観測することはできなかった。また、ウェーハボンディングの成功率の向上も困難であった。

今回、一連の実験過程で、Fe が、Si と Ge とともに反応しやすい現象を見出した。そこで、Si と Ge の間に薄い Fe 層を挟み込むことにより Si と Ge のボンディングをより容易かつ確実に作製することができる可能性があると考え、Ge/Fe/Si ヘテロ接合作製の実験を進めた。

5.3 作製工程

以下に Ge/Fe/Si ヘテロ接合作製の作製工程を述べる。作製工程の概略フローを図 5.2 に示す。

(1) 洗淨

Si ウェーハは約 7mm□、Ge ウェーハは約 5mm□にカットする。第 3 章で述べた Fe 蒸着による β -FeSi₂ 作製時の洗淨工程と同様の手順で、Si ウェーハと Ge ウェーハを洗淨する。

(2) 真空蒸着

蒸着工程も β -FeSi₂ 作製の場合と同様である。

Si だけに Fe 蒸着を行う場合、Ge だけに Fe 蒸着を行う場合、Si と Ge の双方に Fe 蒸着を行う場合の 3 通りを試したところ、Si だけに蒸着を行った場合に最もボンディング成功率が高かった。

蒸着装置にセットする Fe 蒸着線材の量を変えて蒸着膜厚の調整を試みた。実際には蒸着線材(φ0.5mm)の量を 10mm、5mm、3mm と変えてボンディング実験を行ったが、すべての蒸着材の量でボンディングは成功した。Fe の量は少ないほうがよいと考えられるので蒸着材の量は 3mm に決めた。ただし蒸着膜厚の定量測定は行っていない。

(3) ボンディング・熱処理

β -FeSi₂ 作製の場合にならって、Fe 蒸着後の Si 基板はボンディング前にアセトンで 5 分間超音波洗淨する。

Fe を使わない Ge/Si ウェーハボンディングの場合は純水中でボンディング作業を行うが、Fe を蒸着した場合は純水中でボンディングする必要性は不明であった。そこで、純水中でのボンディング、メタノール中でのボンディング、エタノール中でのボンディング、空气中で単に Si ウェーハと Ge ウェーハを重ねるだけのボンディング、の 4 通りのボンディング方法を試みた。その結果、

i) Fe 蒸着済みの Si ウェーハを水に漬けると、表面が不均一に変色する。原因として水による Fe の腐食が考えられ、Fe を蒸着したウェーハの場合は水中でのボンディングは不相当と結論した。

ii) メタノール中でボンディングされたサンプルは、熱処理後、概ね良好であった。

iii) エタノール中でボンディングされたサンプルも、熱処理後、概ね良好であった。

iv) 空气中で単に載せただけのボンディングでも、熱処理後ボンディングは成功するが、メタノールやエタノール中でボンディングした場合と比べて成功率が低かった。ボンディングに失敗したサンプルを目視や光学顕微鏡で観察すると、異物の噛み込みを確認できた。

一方、メタノールやエタノール中でボンディングしたサンプルでも、熱処理前に少し動かすと簡単に剥がれてしまう。おそらくメタノールやエタノール中でボンディングすることは化学的に特に意味をもたないが、クリーンルームであっても雰囲気中に多少の

異物は存在し、また作業中に道具や作業者の着衣、皮膚等から発生する異物もあるから、空気中で単にウェーハを重ねただけではそのような異物を噛み込んでしまうケースも発生すると考えられる。メタノールやエタノール中でのボンディングには、特に化学的な意味はないかもしれないが、液体中でボンディングすることで異物噛み込みを減らすことができたものと結論した。

メタノールはSiに吸蔵され半導体特性に悪影響を及ぼすおそれがあると言われている。また、メタノールはFeに対してわずかに腐食性を示すので、ボンディング作業はエタノール中で実施することにした。ただし、異物対策ができれば単に空気中でウェーハどうしを重ねるだけで十分かもしれないと考えている。

Ge/Si ウェーハボンディングの場合は、水中でのボンディング後、空気中で160°Cのホットプレートで水を飛ばすが、Feを蒸着した基板を空気中で加熱することは不適當なので、本実験ではホットプレートでの加熱は行わなかった。

貼り合わされたサンプルは、前節で述べた新しい熱処理治具を使っておもりによる荷重をかけて熱処理を行った。実験を行った熱処理温度パターンを表5.1に示す。

表 5.1 熱処理温度パターン

No.	温度① 時間①	温度② 時間②	温度③ 時間③	温度④ 時間④	温度⑤ 時間⑤	温度⑥ 時間⑥
1	160°C 10分	160°C 2時間	400°C 30分	900°C 1時間15分	900°C 2時間	400°C 2時間30分
2	160°C 10分	160°C 2時間	400°C 30分	800°C 1時間	800°C 2時間	400°C 2時間
3	160°C 10分	160°C 2時間	400°C 30分	850°C 1時間8分	850°C 2時間	400°C 2時間15分

No.1のパターン(熱処理温度900°C)では、装置からサンプルを取り出そうとただけでサンプルが破損してしまう場合が多かった。

No.2のパターン(熱処理温度800°C)では、ボンディングの成功率が低く、多くのサンプルで熱処理後にSi基板とGe基板が剥がれてしまった。

No.3のパターン(熱処理温度850°C)が最もボンディングの成功率が高かった。

さらに、850°C 1時間の熱処理や870°C 2時間の熱処理も試みたが、いずれもボンディングの成功率は良好であった。

以上一連の実験結果から、Ge/Fe/Si ウェーハボンディングを成功させるためには850~870°Cで1~2時間の熱処理をすればよいと結論付けた。

6. 作製したGe/Fe/Siヘテロ接合の評価

前章の方法で作製した Ge/Fe/Si ヘテロ接合のサンプルに対して、光電気的特性を測定し、その考察を行った。

6.1 評価

I-V 特性の測定のため、Ge 表面への Au 電極蒸着を試みたが、熱処理によって Ge がもろくなっており、作業のためにピンセットで Ge 基板をやや強く触れただけで Ge が破損してしまっただけで、今回は図 6.1 に示すように作製したサンプルをプリント回路基板に Ag 導電性ペーストを使って貼り付けて測定を行った。

Ge ウェーハには i-Ge を、Si ウェーハとしては n-Si, p-Si, および pn-Si (エピタキシャルウェーハ) の 3 種類のウェーハを用い、前章に述べた手順でヘテロ接合のサンプルを作成して I-V 特性を測定した。その測定結果を図 6.2 に示す。

I-V 特性の方向性は n-Si ウェーハを用いた場合に最も顕著に現れた。また、pn-Si に対して Fe 蒸着と熱処理を行うと Si の pn 接合による方向性がほとんど失われてしまった。

これらサンプルに可視光源を当てると光電流が観測できた。特に n-Si/Fe/i-Ge ヘテロ接合のサンプルで大きな光電流が流れた。これらのサンプルに波長 $1.3 \mu\text{m}$ や $1.55 \mu\text{m}$ の光源 (光出力約 1mW) を当てたところ、光電流を観測することができた。図 6.3 に示すように、n-Si/Fe/i-Ge ヘテロ接合のサンプルに可視光を当てた場合と $1.55 \mu\text{m}$ の光を当てた場合で発生する光電流の向きが反対であったが、この原因については次節で考察する。

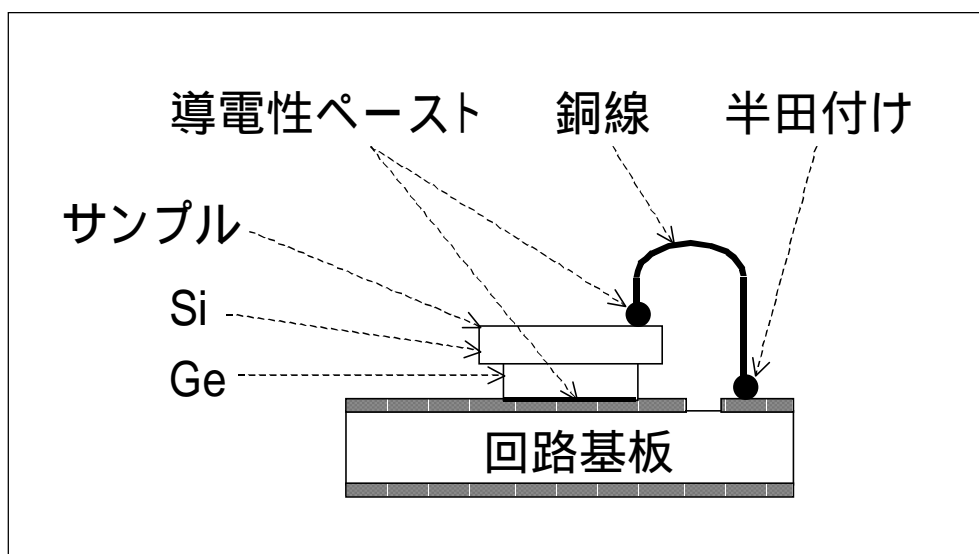


図 6.1 サンプルと回路基板の接続

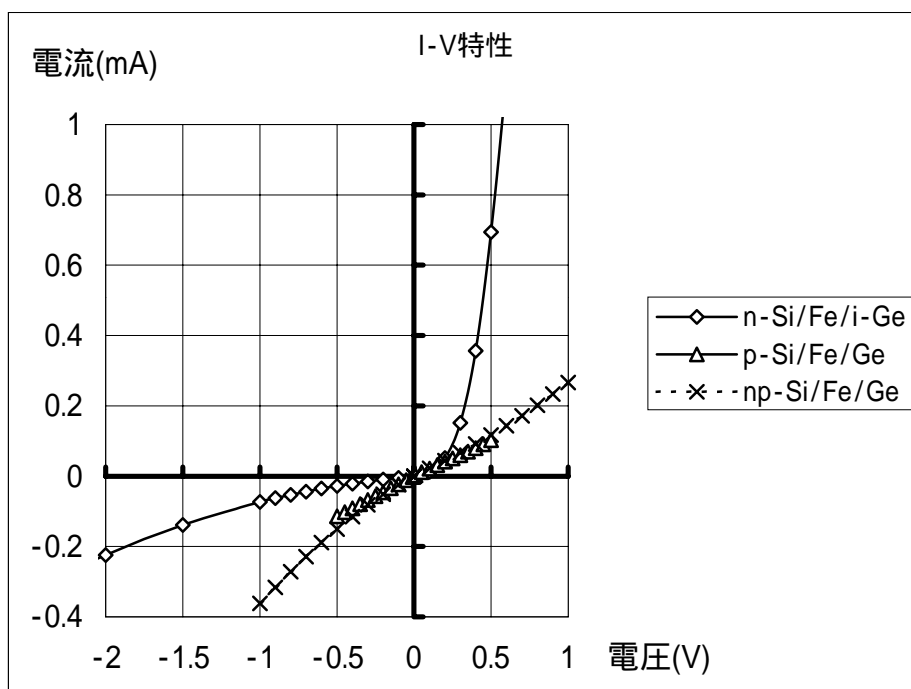


図 6.2 Ge/Fe/Si ヘテロ接合サンプルの I-V 特性 (熱処理温度 850)

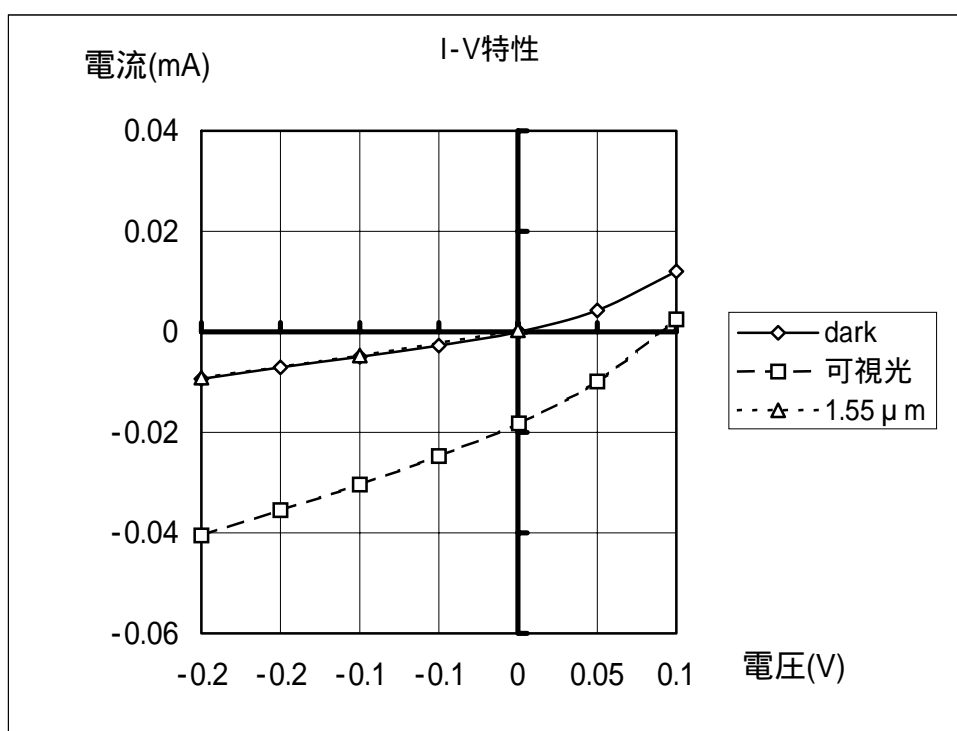


図 6.3 n-Si/Fe/i-Ge ヘテロ接合の光に対する反応

1.55 μm 光に対する光電流は、約 +0.2 ~ 0.3 μA

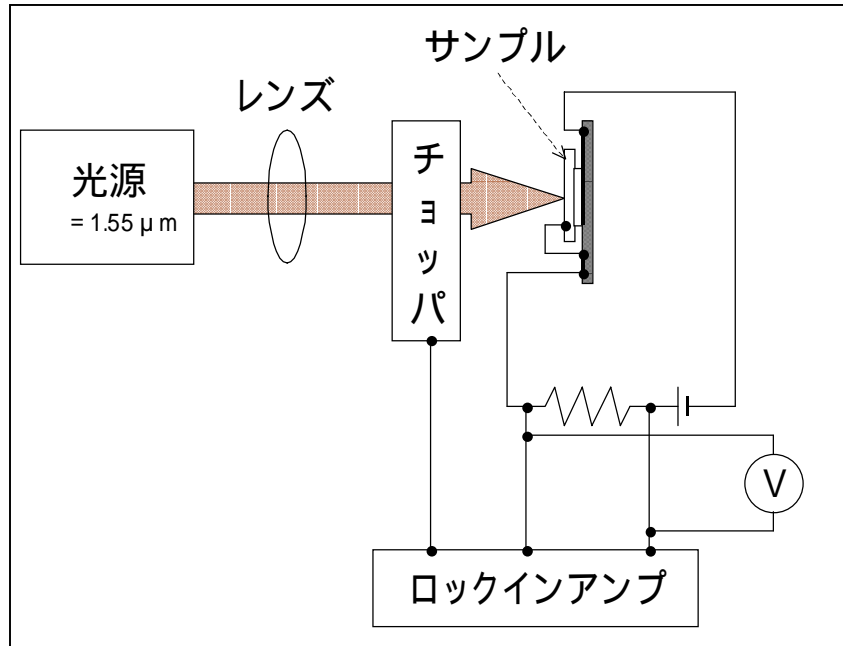


図 6.4 ロックインアンプを用いた光電流測定系

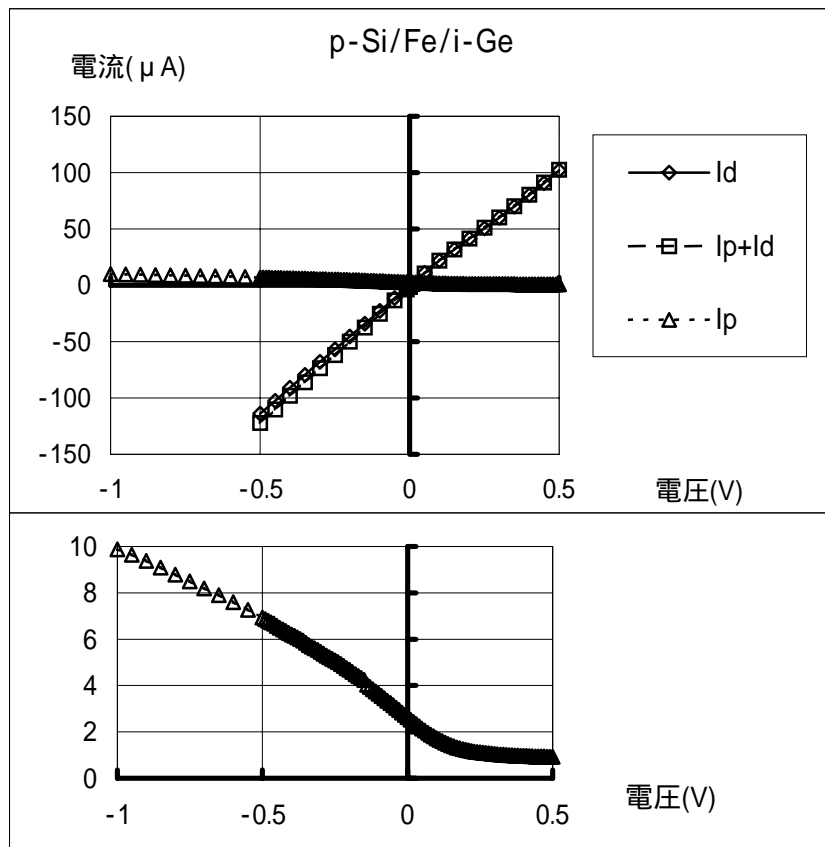


図 6.5 ロックインアンプを用いた光電流測定結果 (p-Si/Fe/i-Ge)

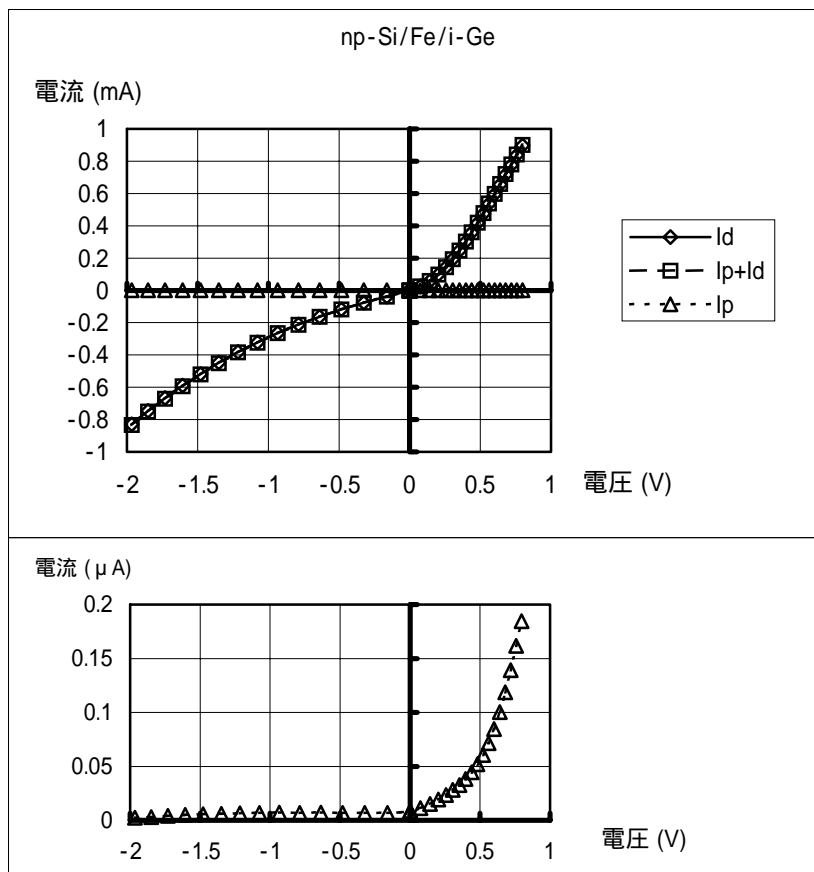


図 6.6 ロックインアンプを用いた光電流測定結果 (np-Si/Fe/i-Ge)

Ge/Fe/Siヘテロ接合サンプルについて、 $1.55 \mu m$ の光に対する光電流を観測することができたので、ロックインアンプを用いて光電流の定量的な測定を試みた。

図6.4に示すように、光源からの波長 $1.55 \mu m$ の光をレンズで集光するとともに、サンプル上の適切な位置に入射できるよう微調整ができるようになっている。レンズとサンプルの間にあるチョッパにより、入射光がある状態とない状態が周期的に繰り返される。ロックインアンプを使って光があるときの電流と光がないときの電流の差分を増幅して出力することにより、サンプルに発生した光電流を定量化することができる。

このロックインアンプを用いた測定の結果 図6.5に示すように、p-Si/Fe/i-Geのサンプルで最大の光電流を得た。入射光電力約 $1mW$ の $1.55 \mu m$ 光源に対して、ロックインアンプの出力を電流値に換算した値は最大 $9.9 \mu A$ となり、量子効率は 0.8% であった。

np-Si/Fe/i-Geのサンプルについても、図6.6に示すように $1.55 \mu m$ の光に対する光電流は測定できたが、その値はi-Ge/Fe/p-Siのサンプルより小さく、最大 $0.18 \mu A$ 、量子効率は約 0.15% であった。

6.2 考察

n-Si/Fe/i-Ge のサンプルでは、n-Si に負電圧を印加すると順方向になると考えられるが、測定ではこれとは逆向き(n-Si→i-Ge の向き)で大きな電流が測定された。その原因としては、導電性ペーストを用いて Si ウェーハと銅線を接続して電極としたため、Si-金属接触がショットキー接合になっていることが考えられる。一方、図 6.3 に示したように、このサンプルに可視光を当てた場合と 1.55 μm の光を当てた場合で光電流の向きが反対になった。これは、可視光の場合は光子のエネルギーが Si のバンドギャップエネルギーを超え Si が光励起されるのに対し、1.55 μm の光では光子のエネルギーが Si のバンドギャップエネルギーを下回るため Si を透過して Ge が光励起されるためと考えられる。

このことを説明するため、図 6.7(a)に示すように、Ag ペースト付けした n-Si/Fe/i-Ge ヘテロ接合を、図(b)のようなショットキーダイオードとヘテロ接合ダイオードの逆向きの直列接続モデルで考えた。ここに漏れ電流と内部抵抗、さらに光電流を考慮した等価回路モデルを図(c)に示す。ショットキーダイオードの漏れ電流よりヘテロ接合ダイオードの漏れ電流が大きいと考えれば今回の実験結果を説明できる。R₁~R₄ に適当な値をあてはめて I-V 特性をシミュレーションした結果を図 6.8 に示す。

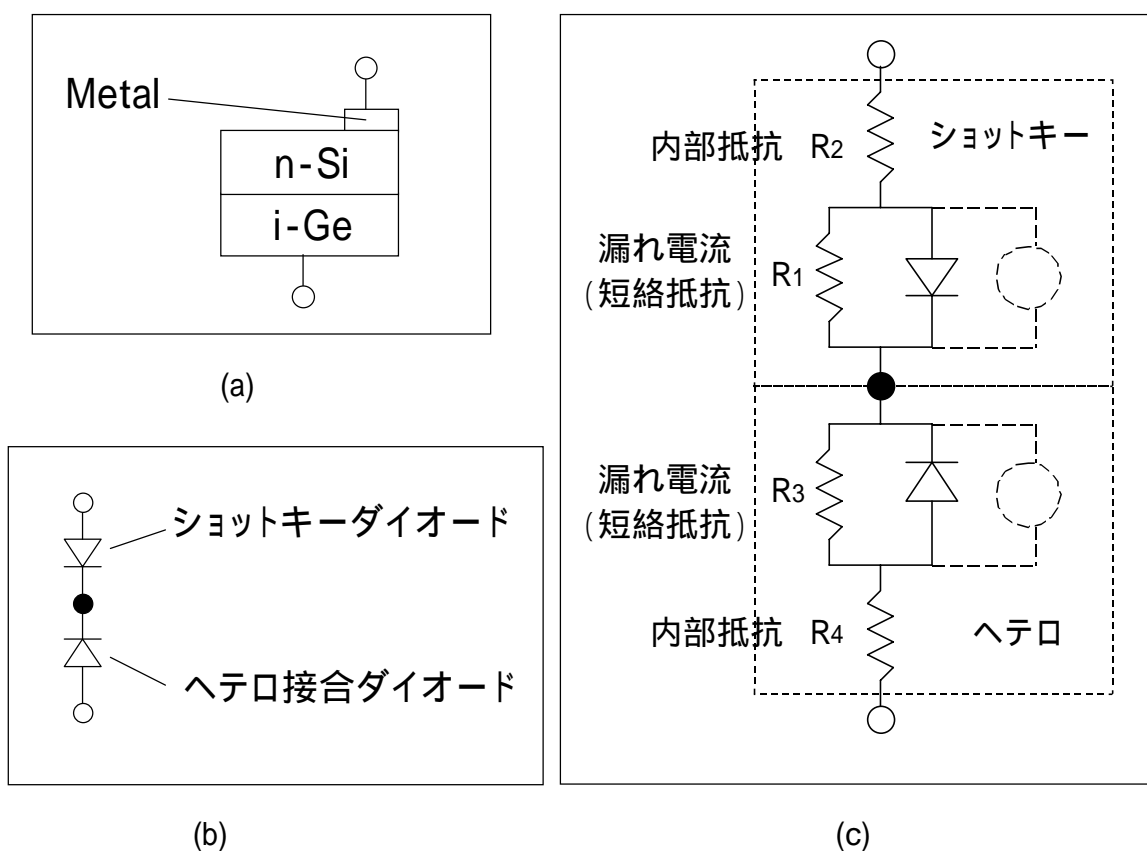


図 6.7 電極付けされた n-Si/Fe/i-Ge ヘテロ接合の等価回路モデル

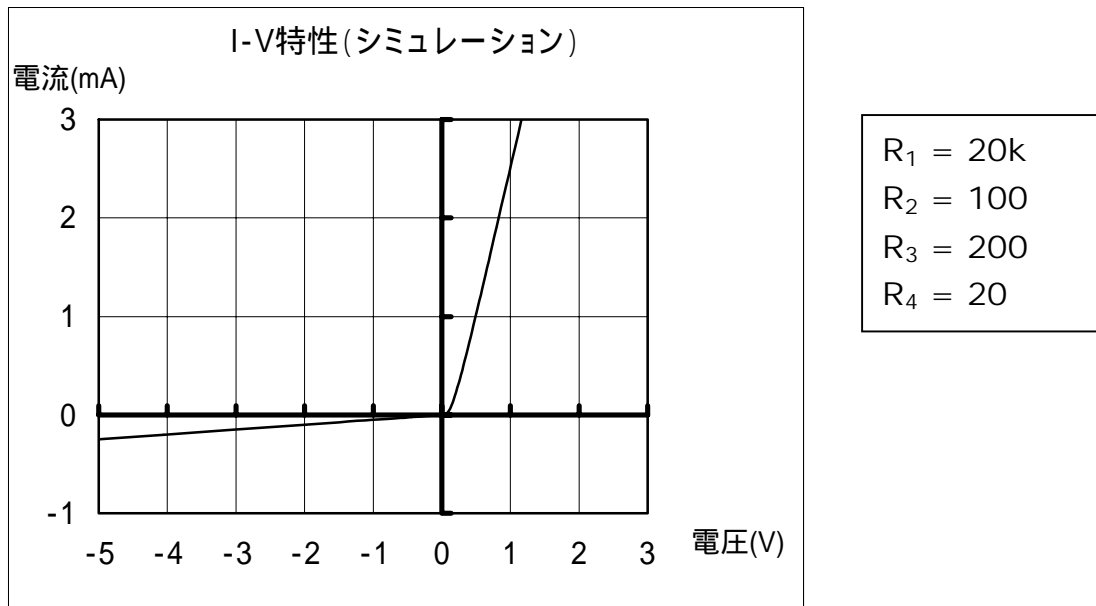


図 6.8 等価回路モデルによるシミュレーション

ここで図 6.7(c)において、可視光に対してはショットキーダイオードが反応すると考えれば光電流は Ge→Si→Metal の向きとなり、1.55 μm の光に対してはヘテロ接合ダイオードが反応すると考えれば光電流は Metal→Si→Ge の向きとなる。以上のように考えれば、I-V 特性の形と可視光および 1.55 μm の光に対する光電流の向きは、実験で観測された結果と一致する。

さて、p-Si/Fe/i-Ge のヘテロ接合サンプルで 1.55 μm の光に対して最大の光電流を観測した。このサンプルでは印加電圧 -1V で -0.8mA と相当大きな暗電流が発生した。一方、この印加電圧で発生した光電流は $9.9 \mu\text{A}$ 、量子効率 は 0.8% である。量子効率が小さい原因の一つに 1.55 μm の光に対して Ge の吸収係数が小さいことがあるのではないかと考え、同じサンプルに 1.3 μm の光源を当ててみたが、光電流は増えなかった。従って、量子効率が小さい原因としては吸収係数とは別の原因を考えなければならない。まず、暗電流が大きい理由としては、Ge と Si のヘテロ接合面におけるバンド不連続量、金属 Fe の残存による漏れ電流、ヘテロ界面付近の再結合電流、さらに素子表面のリーク電流などが考えられる。一方量子効率が低い理由としては、バンドギャップが異なる半導体の接合により界面にトラップ等が発生し光励起されたキャリアが捕獲されてしまうことや、界面付近に Fe Ge Si 三元混合物が存在しバンド構造が複雑になっていることによる影響、Fe や、Fe と Ge や Si の化合物がそれぞれ不純物として Si や Ge に侵入して半導体特性を劣化させることの影響、さらに図 6.6(c)で示した漏れ電流の原因となる短絡抵抗 R_3 の影響などが考えられる。

Ge/Fe/Si ヘテロ接合 PD の実現のためには、暗電流の低減と量子効率の改善が欠かせない。ここではバンド構造を大幅に簡略化して考察したが、そういった素子特性の改善のためには正確な Si/Fe/Ge 接合面のバンド構造やトラップ機構の解明や、Fe 蒸着量や熱処理条件の最適化により確実にヘテロ接合が形成され、かつ未反応の金属 Fe を残さないようにしつつ Si や Ge に拡散される Fe の影響を最小にする必要がある。具体的には、SEM や TEM、X 線蛍光分析などの手法を用いて界面付近のミクロな結晶構造や元素分布を解析しつつ、Fe の蒸着条件や熱処理条件を変化させて最適な素子作製方法や作製条件を探る必要がある。図 3.1, 3.2 で示したような真空蒸着装置による Fe の真空蒸着では Fe 蒸着量の定量化ができないため、イオンビーム蒸着など蒸着量の定量化が可能な方法が必要になってくる。

さらに、Si のなだれ増倍を利用した Ge/Fe/Si ヘテロ接合 APD を実現するためには n-Si/p-Si/Fe/p-Ge 接合を実現し、ここに十分大きな逆バイアス電圧を印加することによって p-Ge で光励起された電子を Si のなだれ増倍層に供給する必要がある。そのためには少なくとも -20V 程度の逆バイアスが必要になるものと想定され、そのような大きな逆バイアスにも耐える漏れ電流の少ないヘテロ接合素子を実現しなければならない。そのような素子を具体的にどのようなプロセスで作製することができるか、今後検討を深める必要がある。

また、今回はとりあえず導電性ペーストを用いて電極の代用にしたが、この方法で形成した Si・金属接触はショットキー接合になってしまったものと推定した。Si と電極との抵抗性接続を実現することも今後の課題であるが、既に Si と電極との接合については詳しく研究がなされており、作業工程を改善すれば Si と電極との抵抗性接合の実現はさほど困難ではないと考えている。

7. 結論

Fe の蒸着による β -FeSi₂ の作製実験においては、Si ウェーハに Fe を蒸着し水素雰囲気中で熱処理するという簡便な方法によって β -FeSi₂ の作製が可能であることがわかった。p-Si ウェーハ上にこの方法で β -FeSi₂ を作製すれば、p-Si と n- β -FeSi₂ のヘテロ構造をもつ pn 接合を形成可能であるが、1.55 μm の光に対する感度を得ることができなかった。その原因は、 β -FeSi₂ 層がごく薄いからと考えられる。Si を基板とし、 β -FeSi₂ を光吸収層とする PD の実現には、厚い β -FeSi₂ 層を形成する別の手段を検討する必要がある。また、Si の pn 接合をなだれ増倍層、 β -FeSi₂ を光吸収層とする APD を実現するためには、p- β -FeSi₂ 層を形成しなければならない。

一方、Ge/Fe/Si ヘテロ接合の作製実験においては、Fe を蒸着した Si 基板と Ge 基板を貼り合わせて熱処理することにより、Fe と Si、および Fe と Ge を反応させ、Ge/Fe/Si ヘテロ接合を作製することに成功した。漏れ電流が大きく I-V 特性の方向性は良くないが、1.55 μm の光に対する光電流を初めて観測することができた。ヘテロ界面を横切ってキャリアが移動することを確認できたので、暗電流の低減と量子効率の改善により、Ge/Fe/Si ヘテロ構造をもつ PD や APD が実現する見通しを得た。

われわれは、本研究と並行して Ge/Si ウェーハボンディングの研究も続けている。本年度、Ge/Si ウェーハボンディングのサンプルでも波長 1.3/1.55 μm の光に対して光電流を観測することができた。これら一連の成果から、Si を基板とし、 β -FeSi₂ や Ge を光吸収層とする 1.3/1.55 μm 帯用 APD の実現に一步前進したと言える。Ge/Si ヘテロ接合と Ge/Fe/Si ヘテロ接合の比較とともに、Si 基板への β -FeSi₂ の厚膜形成方法の検討も進めることが、Si を基板とする光通信用ヘテロ構造 APD の実現に向けて有意義である。

今後、これらの研究を進めることで、Si を基板とし、Ge 若しくは β -FeSi₂ を光吸収層とする波長 1.3/1.55 μm の光通信用ヘテロ接合 APD が実現すれば、低価格で高性能、かつ資源量の限られた In や有害性が懸念される As といった元素を含まない、低価格で比較的高性能な受光素子として、FTTH をはじめとする光通信ネットワークの普及に貢献できるものと考えている。

謝辞

本研究にあたり、高知工科大学 神戸 宏 教授にはたいへんお世話になりました。また、河津 哲 教授には記録計を快くお譲りいただき、また、河東田 隆 教授、西田 謙 助手および河東田研究室の河野 巧氏には XRD およびラマン分光分析装置の使用などにあたりご協力をいただきました。深く感謝いたします。

さらに、成沢 忠 教授、岩下 克 教授ほか本学の教職員各位には研究を進めるにあたり数多くのご指導、ご助言、ご協力をいただきました。また、神戸研究室の小松氏、松岡氏、中村氏をはじめとする電子・光システム工学科の学生各位には、実験、研究を進めるにあたり数多くのご協力をいただきました。

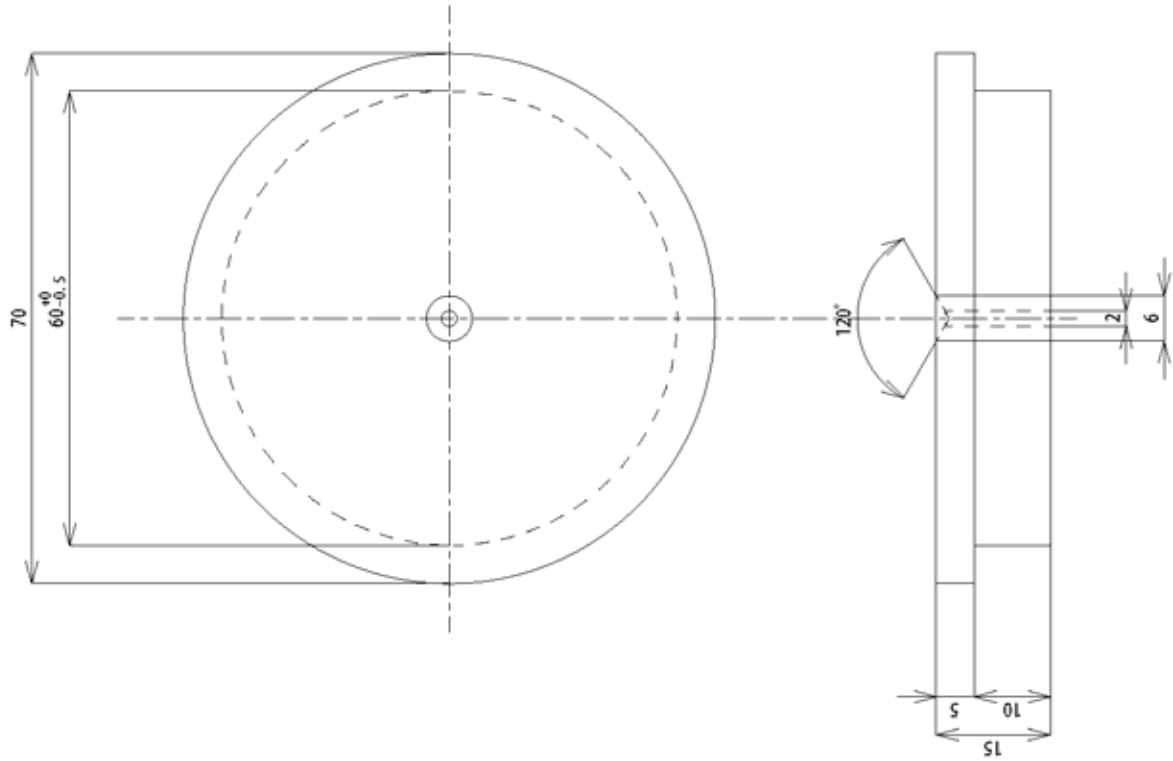
どうもありがとうございました。

参考文献

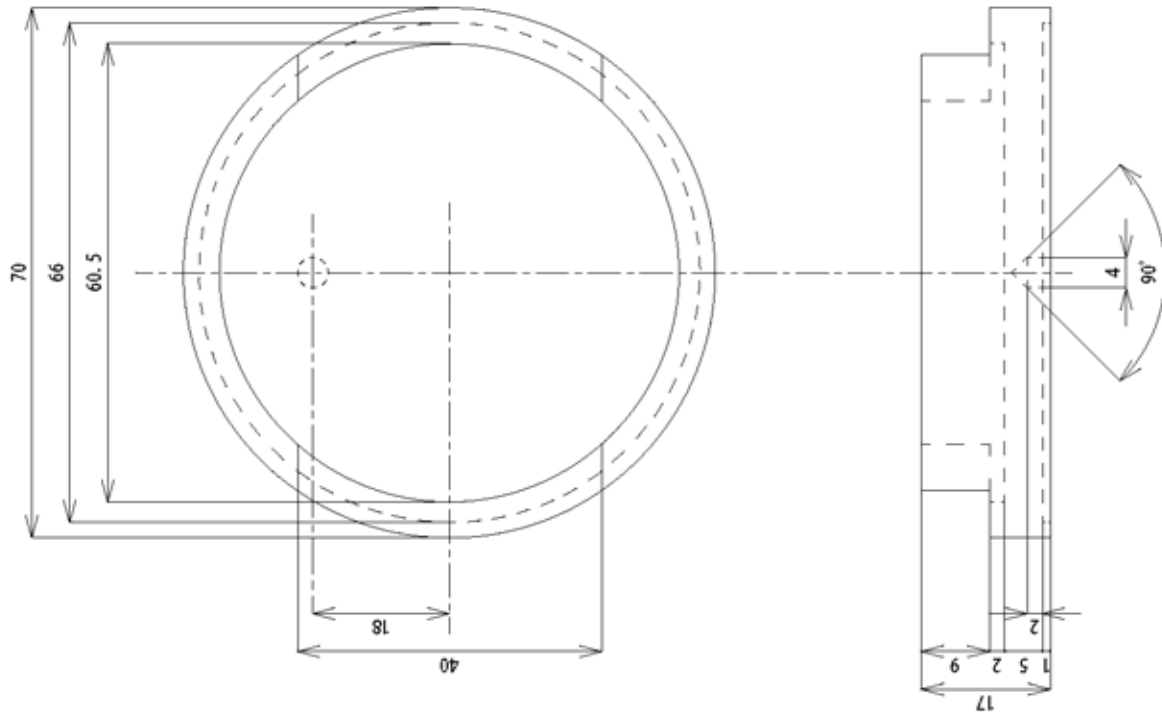
- 1) 総務省, 「ブロードバンド契約数の推移」, 総務省, 2004
- 2) 清水 潤治, 「半導体工学の基礎」, コロナ社, 1986
- 3) 神保 孝志, 「光エレクトロニクス」, オーム社, 1997
- 4) 末松 安晴, 伊賀 健一, 「光ファイバ通信入門(改訂3版)」, オーム社, 1989
- 5) 近角 聡信, 「物性科学入門」, 裳華房, 1999
- 6) Govind P. AGRAWAL, "Fiber-Optic Communication Systems 3rd Edition", A JOHN WILEY & SONS, INC., 2002
- 7) 高橋 清, "HETEROJUNCTIONS", 1966
- 8) 長崎 誠三, 平林 眞, 「二元合金状態図集」, アグネ技術センター, 2002
- 9) 麻蒔 立男, 「薄膜作成の基礎(第3版)」, 日刊工業新聞社, 1996
- 10) 菊地 正典, 「半導体のすべて」, 日本実業出版社, 1998
- 11) 神戸 宏, 「Si を基板とした光通信用アバランシフोटダイオード」, レーザー学会第 294 回研究会研究報告 RTM-02-57, 2001
- 12) 大西 健一, 「ベータ鉄シリサイドを用いたフォトダイオードの作製」, 高知工科大学 卒業研究報告, 2001
- 13) 寺井 慶和, 前田 佳均, 「IBS β -FeSi₂ の成長速度と 1.54 μ m 発光との相関」, 第 51 回応用物理学関係連合講演会 30P-R-10, 2004
- 14) S. Uekusa, Y. Watanabe, N. Miura, Y. Aida, " β -FeSi₂ thin-films grown by pulsed laser deposition", MRS Symp. Proc. Vol. 648 p6.34, 2000

付録 1. 熱処理治具設計図

(2) フタ



(1) 本体



材質：SUS310S
 数量：各 1個
 仕上 ▽ C0.5
 (本体底部 C0.2)

04/06/22
 熱処理治具