

平成24年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「多結晶太陽電池ウェハの高精度欠陥検査装置の開発」

研究開発成果等報告書

平成25年 3月

委託者 四国経済産業局

委託先 公益財団法人とくしま産業振興機構

目 次

第1章	研究開発の概要	1
1-1	研究開発の背景・研究目的および目標	
1-2	研究体制	
1-3	成果概要	
1-4	当該研究開発の連絡窓口	
第2章	欠陥種別に応じた最適画像取得方法の研究	7
2-1	目的	
2-2	内容と成果	
2-3	まとめ	
第3章	赤外線利用高精度マイクロクラック検出技術の開発	9
3-1	目的	
3-2	内容と成果	
3-3	まとめ	
第4章	微弱欠陥検出手法の研究	11
4-1	目的	
4-2	内容と成果	
4-3	まとめ	
第5章	多結晶シリコンウェハ面方位評価手法の研究	14
5-1	目的	
5-2	内容と成果	
5-3	まとめ	
第6章	高輝度ドーム照明装置の開発	16
6-1	目的	
6-2	内容と成果	
6-3	まとめ	
第7章	マルチスペクトルライン照明装置の設計検討	17
7-1	目的	
7-2	内容と成果	
7-3	まとめ	
第8章	超並列処理アルゴリズムの開発	18
8-1	目的	
8-2	内容と成果	
8-3	まとめ	

第 9 章 超並列画像処理装置の多結晶ウェハ欠陥検査装置への組み込み	2 0
9-1 目的	
9-2 内容と成果	
第 10 章 ソフト搬送技術の研究	2 1
10-1 目的	
10-2 内容と成果	
第 11 章 装置のメカニカル設計と動作試験	2 2
11-1 目的	
11-2 内容と成果	
第 12 章 検査プログラムの実装と制御ソフト開発	2 3
12-1 目的	
12-2 内容と成果	
第 13 章 実用化と実証試験	2 4
13-1 目的	
13-2 内容と成果	
13-3 まとめ	
最 14 章 全体総括	2 6
14-1 成果	
14-2 課題	
14-3 今後の予定	

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

1-1-1 研究開発の背景

太陽電池用シリコンウェハは、インゴットと呼ばれるシリコンの結晶の塊より、ワイヤソーにより薄く切り出されて製造されるため、ウェハの製造過程で、外観上判断不能な超微細な亀裂（マイクロクラック）が発生する場合がある。このクラックは、後工程で大きくなり発電不良、破損につながり太陽電池の品質に重大な影響を及ぼす。

また、ウェハ切り出し後の洗浄が不十分であると、表面に油汚れが残り、この表面の汚れは、後工程（エッチング工程）に影響を与え発電不良につながる。

多結晶シリコンは、小さな結晶の集まりからなり、結晶面方位により結晶粒のコントラストが変わるため、表面の汚れや太陽電池内部のマイクロクラックが、結晶粒や結晶粒の境界である粒界と区別し難く、検出が極めて困難であり現状では有効な検査装置は開発されていない。ウェハ製造メーカーでは24時間体制の人海戦術により全数を検査している。

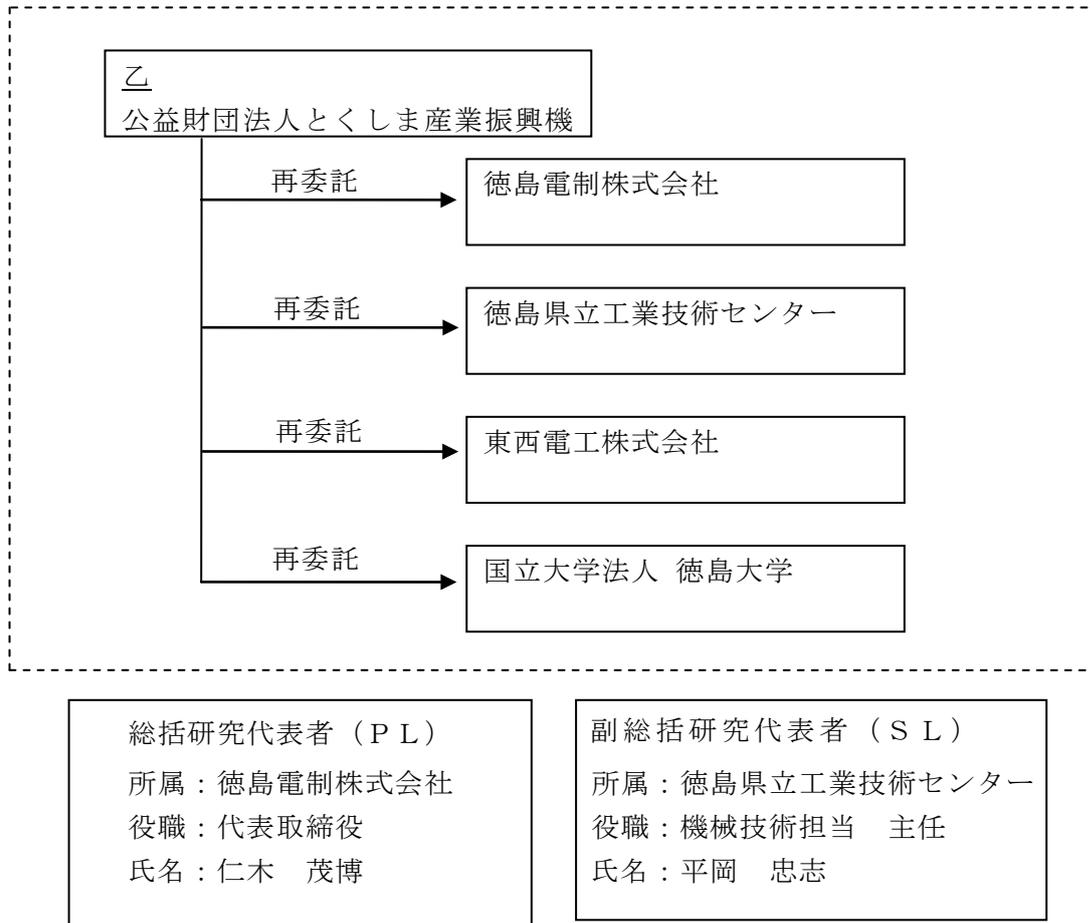
1-1-2 研究開発の目的および目標

研究開発では、多結晶太陽電池ウェハを対象として、 $300\mu\text{m}$ 以上の長さのマイクロクラックを検出可能で、ユーザの検査基準に合わせた柔軟な微弱欠陥判定機能と、ワークに振動を与えないソフト搬送機能を備える高精度欠陥検査装置を開発する。特に、結晶粒の影響を受けずに微弱な汚れと微細なマイクロクラックのみを欠陥し、過検出率（正常部を欠陥と検出する割合）1%以下を目指す。さらに、微弱な汚れに関しては目視検査と比較して99%以上の一致率を、マイクロクラックの不良見逃し発見率は0.1%以下を目指す。

多結晶シリコンは、表面の結晶方位の違いから観測される明暗の強度が異なるため微弱な汚れや微小マイクロクラックの画像検査が難しいが、これまでに開発してきた面方位の違いを識別する技術と微弱欠陥の検出技術、赤外線検出技術、超並列処理技術を融合し高度化することにより新しい多結晶ウェハ高精度欠陥検査装置を開発する。

1 - 2 研究体制

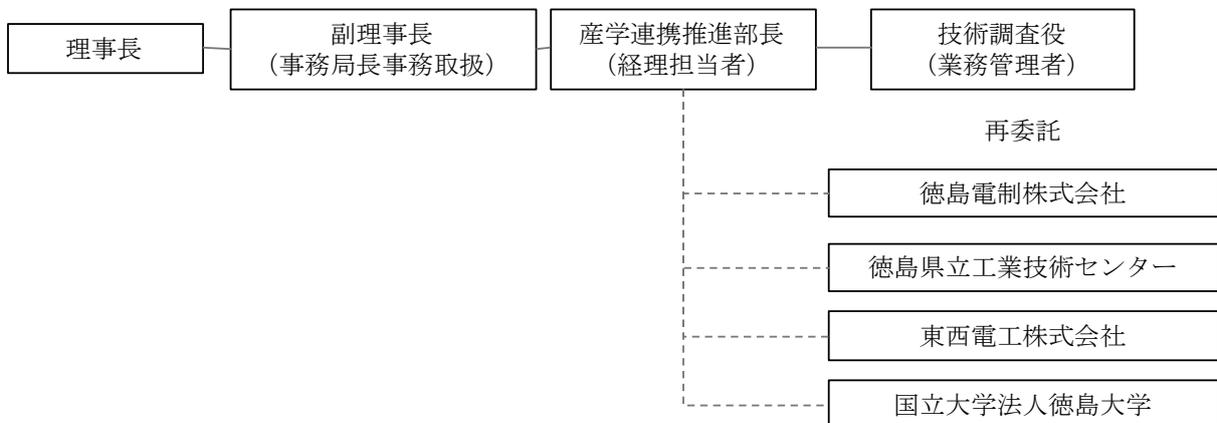
1 - 2 - 1 研究組織



1 - 2 - 2 管理体制

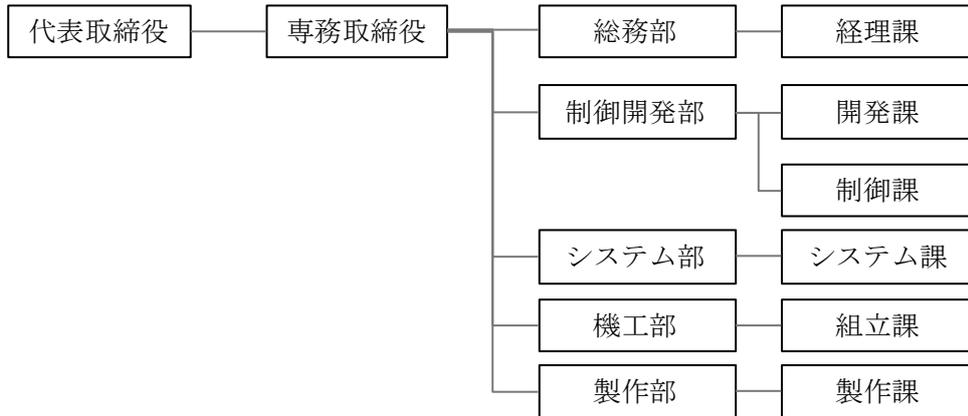
①事業管理者

[公益財団法人 とくしま産業振興機構]

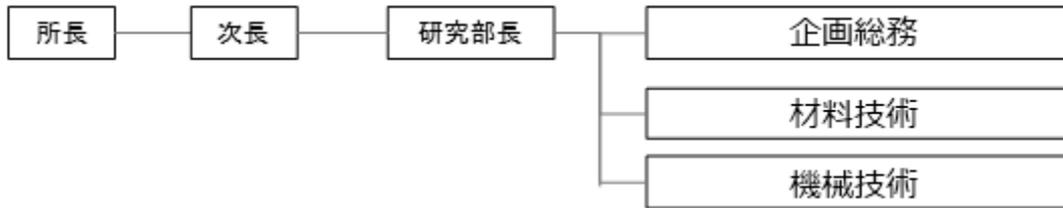


② (再委託先)

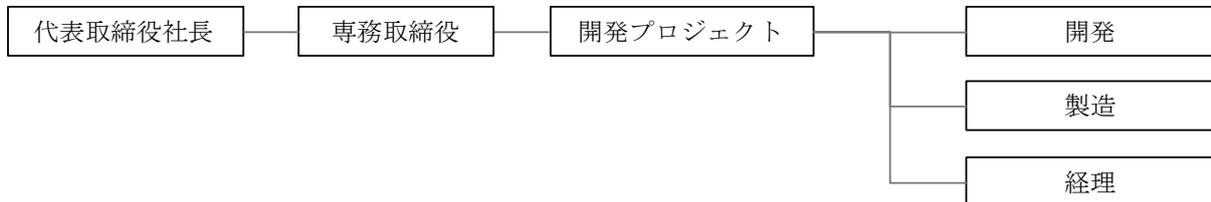
徳島電制株式会社



徳島県立工業技術センター



東西電工株式会社



国立大学法人 徳島大学



1-2-3 管理員及び研究員

【事業管理者】公益財団法人 とくしま産業振興機構

① 管理員

氏名	所属・役職	備考
宮崎 淳	産学連携推進部 部長	
武知 博憲	産学連携推進部 副部長	
尼寺 康泰	産学連携推進部 副部長	

② 研究員

氏名	所属・役職	備考
尼寺 康泰 (再)	産学連携推進部 副部長	
山下 有平	産学連携推進部 研究員	

【再委託先】※研究員のみ

徳島電制株式会社

氏名	所属・役職	備考
仁木 茂博	代表取締役	総括研究代表者(PL)
木下 裕史	開発課 課長	
友川 裕史	システム課副課長	
養松 友規	開発課開発担当	
久保 豊和	組立課設計担当	
堀尾 真一	制御課・副課長	
張 栄志	組立課・組立担当	
小松 健一	組立課・組立担当	
河江 徳和	製作課・副主任	
中村 仁	製作課・製作担当	

徳島県立工業技術センター

氏名	所属・役職	備考
平岡 忠志	機械技術課 主任	副総括研究代表者(SL)
松原 敏夫	材料技術課 主任	

東西電工株式会社

氏名	所属・役職	備考
川添 正和	製造・取締役	
三島 庸歳	開発プロジェクト・リーダー	
濱崎 修	開発・リーダー	
奥村 真世	開発	

国立大学法人 徳島大学

氏名	所属・役職	備考
寺田賢治	大学院 ソシオテクノサイエンス研究部 教授	

1-3 成果概要

主な成果は、下記のとおりである。

- (1) RGB ドーム照明を用いる照明方法を確立し、 $100\mu\text{m}$ 程度の異物を検出した。
- (2) 人工的にマイクロクラックを作成し、画像上で $300\mu\text{m}$ のマイクロクラックの撮影に成功し、検出することができた。
- (3) 電子線回折と撮影角度を変化させた画像方位識別実験によって、画像識別では面方位だけでなく、結晶面の回転角度情報も含んでいることが明らかとなった。
- (4) 画像サイズ 4096×4000 、画像深度 $8\text{bit}\times 3$ の画像 1 枚に対して、 15×15 サイズのガウシアンフィルタとエッジ保存型フィルタを 0.15 秒で畳み込むことが可能となった。
- (5) マイクロクラックサンプル画像 800 枚（クラックあり 400 枚，なし 400 枚。）に対して、検出率 92.8%，誤検出率 6.0%を達成した。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

① 事業管理者

【公益財団法人とくしま産業振興機構】

〒770-8021 徳島県徳島市雑賀町西開1-1-2

TEL:088-669-4757 / FAX:088-669-4759

E-mail:tec-info@our-think.or.jp

(経理担当者) 産学連携推進部 部長

宮崎 淳

(業務管理者) 産学連携推進部 副部長

武知 博憲

② 再委託先

【徳島電制株式会社】

〒770-0873 徳島県徳島市東沖洲2丁目2-6番7

(経理担当者) 総務部 経理課 副主任

木下加奈子

(業務管理者) 専務取締役

藤川 仁

【徳島県立工業技術センター】

〒770-8021 徳島県徳島市雑賀町西開1-1-2

(経理担当者) 総務課 係長

山本 高輝

(業務管理者) 研究部長

室内 秀仁

【東西電工株式会社】

〒775-0001 徳島県海部郡牟岐町大字河内赤水98番地の1

(経理担当者) 経理 総経理リーダー

芦谷文美代

(業務管理者) 専務取締役

北出 亘

【国立大学法人徳島大学】

〒770-8506 徳島県徳島市南常三島町二丁目1

(経理担当者) 徳島大学工学部管理係 係長

泉 朗

(業務管理者) 大学院ソシオテクノサイエンス研究部教授

寺田賢治

第2章 欠陥種別に応じた最適画像取得方法の研究

2-1 目的

可視領域で $100\mu\text{m}$ 以上の微細欠陥の検出を目指して最適画像取得方法の研究を行う。

2-2 内容と成果

微細、微弱欠陥を検出するために、最適な光源、撮影検査角を検討し、製作した多方向画像取得評価装置を用いて、最適画像検出方法の研究を行う。工業技術センターにて、光源やカメラの設置方法、取得画像の解析を行う。(公財)とくしま産業振興機構では、画像の取得実験と取込方法の検討およびデータの収集・解析を実施する。また、徳島電制(株)では、工業技術センターと共同で、取得した画像の検証を行う。

2-2-1 微細、微弱欠陥の最適画像取得方法の研究

多結晶ウェハの各結晶は、カメラをある角度で固定した場合、照明をある角度から当てると明るくなり、別の角度では暗くなる。一方、汚れ等の欠陥は照明を任意の角度から当てても暗いままである。また、多結晶ウェハには、多結晶シリコンインゴットから遊離砥粒方式でスライスされたウェハ(以下、遊離ウェハ)と固定砥粒方式でスライスされたウェハ(以下、固定ウェハ)があり、光をウェハに当てたとき、遊離ウェハは拡散反射成分が強い特徴があり、固定ウェハは直接反射成分が強い特徴がある。

そこで、照明には遊離ウェハと固定ウェハで同じ RGB ドーム照明を利用する。これは RGB の LED をそれぞれ異なる場所に配置し、反射板を利用して RGB の照明を異なる角度から照射する照明方法である。

欠陥を含む遊離ウェハを RGB ドーム照明で撮影した画像を図2-1左に示す。また、その検出結果を図2-1右に示す。この欠陥の大きさは $50\times 150\mu\text{m}$ である。欠陥を含む固定ウェハを RGB ドーム照明で撮影した画像を図2-2左に示す。また、その検出結果を図2-2右に示す。



図2-1 欠陥を含む遊離ウェハを RGB ドーム照明で撮影した画像とその検出結果

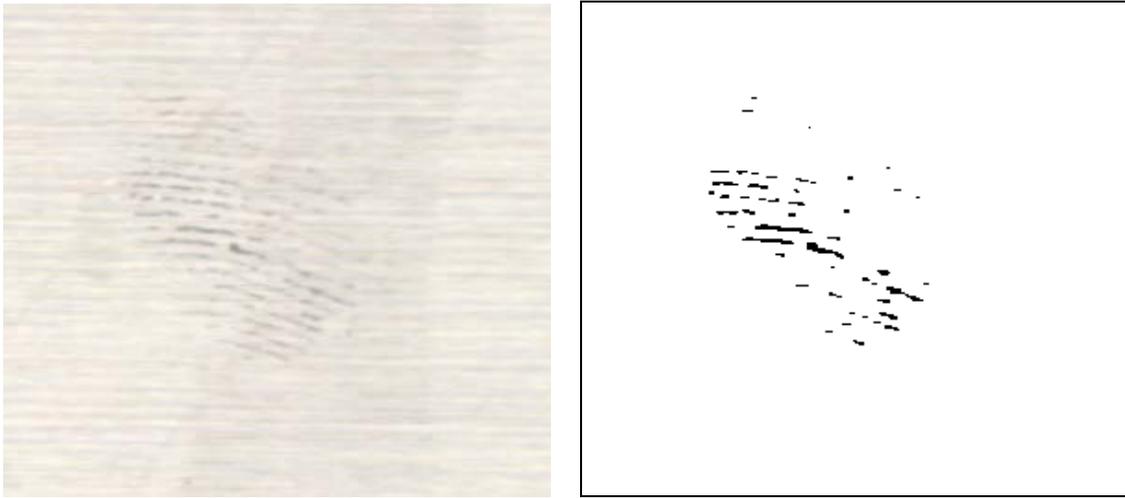


図 2-2 欠陥を含む固定ウェハを RGB ドーム照明で撮影した画像とその検出結果

2-2-2 マイクロクラックの最適画像取得方法の研究

赤外 LED 光源の光量不足のため、赤外 LED 光源を利用せず、十分な光量がある赤外ハロゲン光源を利用することにした。平成 23 年度までのマイクロクラックのある多結晶ウェハの撮影方法では広い未検出領域があったが、未検出領域を大幅に少なくすることに成功した。人工的にマイクロクラックを作成し、画像上で $300\mu\text{m}$ のマイクロクラックの撮影に成功し、検出することができた。詳細は「第 3 章 赤外線利用高精度マイクロクラック検出技術の開発」に示す。

2-3 まとめ

RGB ドーム照明を用いる照明方法を確立した。この照明方法では、 $100\mu\text{m}$ 程度の異物検出が可能である。平成 23 年度までのマイクロクラックのある多結晶ウェハの撮影方法では広い未検出領域があったが、未検出領域を大幅に少なくすることに成功した。人工的にマイクロクラックを作成し、画像上で $300\mu\text{m}$ のマイクロクラックの撮影に成功し、検出することができた。

第3章 赤外線利用高精度マイクロラック検出技術の開発

3-1 目的

300 μm 以上の長さのマイクロラックを検出可能にする。

3-2 内容と成果

赤外線リニアイメージセンサにより構築した赤外線ラインセンサカメラでは、素子の感度不良や欠陥のため、取得画像に対して補正をかける必要がある。工業技術センター及び（財）とくしま産業振興機構では、この補正を画像取得時に高速で行うためのプログラムを協働して作成する。また、構築した赤外線ラインセンサカメラによりマイクロラックの検出実験を行う。

3-2-1 素子の欠陥と感度不良の補正方法の検討

赤外線ラインセンサには1%未満の不良素子があり、このまま使用すると微細な欠陥を検出することができない。そこで、不良素子の周囲の正常な素子の情報から、不良素子のレベルを補間するプログラムを作成した。これは、素子近傍の5画素を用いてプレ推定を行った後に、 3×7 画素程度の近傍領域の平均を用いてさらに正確な補正を行う方法で、画像を取り込みながらリアルタイムで補間を行う。

赤外線素子の感度のばらつきや光源およびレンズに起因するむらを補正するためにシェーディング補正処理は不可欠である。そこで、まず、各画素位置において黒レベルと白レベルで画素単位補正を行うための輝度勾配とオフセットを算出した。つぎに、求めた補正係数を用いて一定の値を入力した場合の補正值を算出した。

3-2-2 マイクロラック撮影結果

多結晶シリコンウェハのマイクロラックサンプルはほとんどなく、また、僅かなマイクロラックサンプルも少しの衝撃でマイクロラックが成長していくため、マイクロラックを人工的に作成し、画像を取得した。図3-1はウェハ内部のマイクロラックの例で、長さは画像上では900 μm 程度で、マイクロラックの上下に明暗のペアが現れることが特徴である。図3-2はウェハと背景の境界付近にあるマイクロラックの例で、長さは画像上では300 μm 程度で、マイクロラックは明るく現れるのみであることが特徴である。両図とも左が人工クラック作成前、右が作成後である。これらのマイクロラックは結晶粒界よりもコントラストが高いので検出可能である。

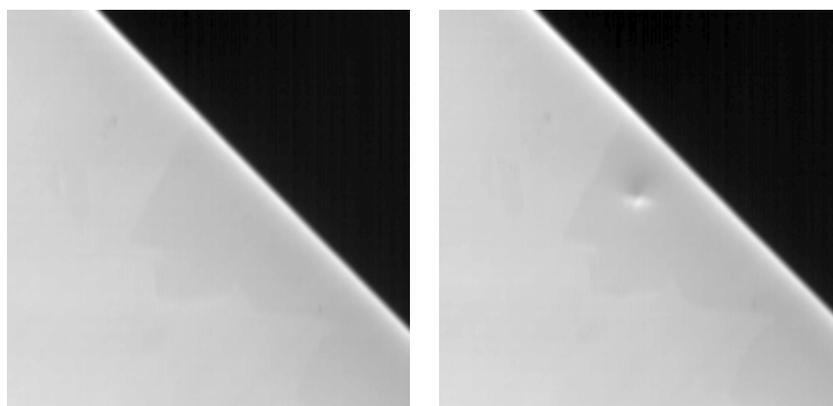


図3-1 ウェハ内部のマイクロラックの例。左：なし、右：あり。

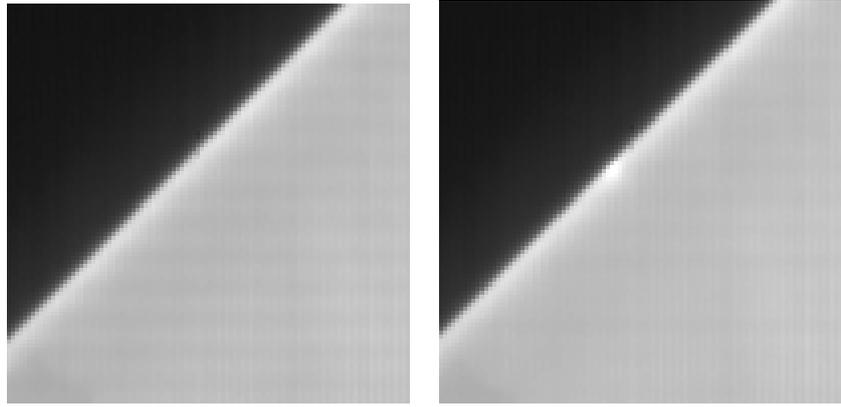


図 3-2 ウェハと背景の境界付近のマイクロクラックの例。左：なし，右：あり。

3-3 まとめ

赤外 LED 光源の光量不足のため，赤外 LED 光源を利用せず，十分な光量がある赤外ハロゲン光源を利用することにした。人工的にマイクロクラックを作成し，画像上で $300\ \mu\text{m}$ のマイクロクラックの撮影に成功し，検出することができた。

第4章 微弱欠陥検出手法の研究

4-1 目的

微弱な汚れと微細なマイクロクラックのみを検出し、過検出率（正常部を欠陥と検出する割合）1%以下を実現する。

4-2 内容と成果

汚れの検出に関しては、遊離ウェハと固定ウェハが同じ照明方法で検査できる可能性があるRGBドーム照明による検査手法を検討する。また、テクスチャ処理ウェハについても汚れを検出するアルゴリズムを検討する。

微細なマイクロクラックに関しては、フィルタ処理を検討して検出精度の改善を図る。

4-2-1 遊離ウェハのRGBドーム照明を利用した汚れ検出方法

遊離ウェハの各結晶は、カメラをある角度で固定した場合、照明をある角度から当てると明るくなり、別の角度では暗くなる。一方、汚れ等の欠陥は照明を任意の角度から当てても暗いままである。そこで、エッジ保存型フィルタを利用して微弱な汚れを検出するアルゴリズムを考案した。

4-2-2 固定ウェハのRGBドーム照明を利用した汚れ検出方法

固定ウェハの各結晶は、遊離ウェハの各結晶のように明暗がはっきりせず、汚れと比較して明るい。一方、汚れ等の欠陥は、遊離ウェハの欠陥と同様に照明を任意の角度から当てても暗いままである。そこで各画素をある閾値で2値化することを基本にした汚れ検出アルゴリズムを考案した。

4-2-3 テクスチャ処理ウェハと汚れ等の判定アルゴリズム

テクスチャ処理ウェハの中で問題になるものが、図4-1に示すような直径2~3 μm の黒丸が連なった人の血管のような形状である。この黒丸の連なりは正常部分と判定することが求められている。どの方向から撮影しても黒く映るので、汚れや異物と似ている。汚れは境界がはっきりしていないことが多いので、黒丸の連なりと汚れの判定は容易である。問題は黒丸の連なりと異物との判定方法である。

黒丸の連なりと異物の判定方法を次の手順で判別することを検討した。

- ①ウェハの種類に応じて上記の検出処理を適用する。
- ②2値化，ラベリングをする。(図4-2，図4-3)
- ③ラベル付けられた各塊の円形度に応じて黒丸の連なりと異物を判定する。

円らしいものは異物，円らしくないものは黒丸の連なりと判定する。

ほとんどの塊は正確に判別することが可能である。しかし、黒丸の連なりが途中でとぎれて円らしくなるものもわずかにあった。

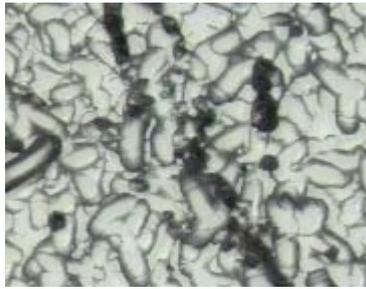


図 4-1 テクスチャ処理ウェハの黒丸の連なり。レーザー顕微鏡で撮影したもの。

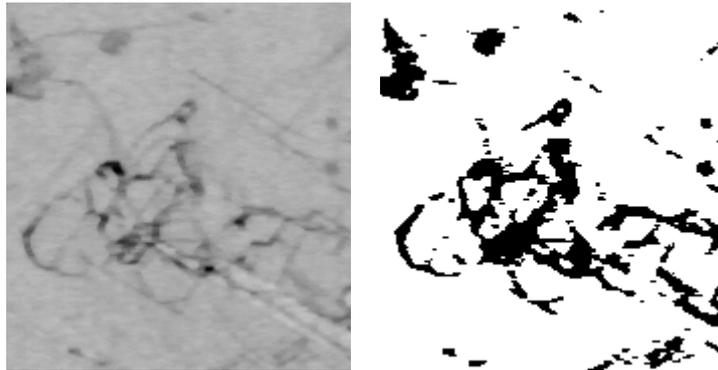


図 4-2 テクスチャ処理ウェハの黒丸の連なり。RGB ドーム照明で照明し，ラインセンサカメラで撮影したもの。

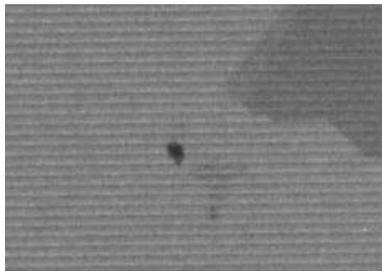


図 4-3 遊離ウェハの異物

4-2-4 マイクロクラックの検出アルゴリズム

固定・遊離ウェハともにマイクロクラック検出アルゴリズムは以下のとおりである。

①領域分割

ウェハの各辺，各面取り，中央と領域を分ける。領域分割する理由は，それぞれに別のフィルタを畳み込むためである。フィルタが別である理由は，中央部分のマイクロクラックと端部分のマイクロクラックは映り方が異なるためである。

②各辺，各面取りについては以下の処理を行う。

辺，面取りの方向に沿って微分処理，2 値化，ラベリング，判別処理をする。

③中央については以下の処理を行う。

フィルタを畳み込み，2 値化，ラベリング，判別処理をする。

4-3 まとめ

遊離ウェハの RGB ドーム照明を利用した汚れの検出方法，固定ウェハの RGB ドーム照明を利用した汚れ検出方法を示した。テクスチャ処理ウェハと汚れ等の判定アルゴリズムでは，塊の円形度を利用して判定できる可能性があることがわかった。マイクロクラックの検出アルゴリズムでは，ウェハの辺と面取り部は微分処理に検出できることが，中央はフィルタで検出できることがわかった。

第5章 多結晶シリコンウェハ面方位評価手法の研究

5-1 目的

画像撮影時の多結晶表面の反射率は面の方位により異なってくるため、予め結晶面方位による反射率の違いを調べることで、すなわち面方位を識別しておくことで最適な画像取得方法を選択できる。この結晶面方位の識別において、既存手法との一致率90%以上を目標として、面方位評価手法を確立することを目的とする。

5-2 内容と成果

工業技術センターにおいて、これまでに研究開発を行ってきた結晶面方位の違いを識別する技術と既存の電子線を用いた識別技術との比較検証を行う。また、一致率が低い場合は、その原因を究明し、結晶面方位識別手法の改良を行う。また、電子線回折による結晶方位解析における、条件決定及び取得データの解析については、(公財)とくしま産業振興機構と連携する。

(1) 画像による方位識別手法

撮影角度を変更して取得した画像を基に、多結晶の結晶粒ごとに色分けを行って表示する方法により面方位識別画像を作成した。切断の際に発生するソーマークが判別に影響を与えることがあり、この影響を最小限に押さえられるように処理を行った。

(2) 画像による多結晶ウェハ結晶面方位評価機構

シリコンの結晶構造はダイヤモンド形構造の立方格子(A4形)であり、X線回折では一部の回折線が消滅する。またX線回折では多結晶シリコンの平均的な面方位しか得られないことから、電子線を用いたEBSD(Electron BackScattering Diffraction:電子線後方散乱回折)法による結晶方位解析を行った。画像による方位識別ではワイヤーソーで切断したままの試料を用いたが、EBSD法では分析表面近傍の加工ひずみを除去するためコロイダルシリカにより約5時間バフ研磨を行った試料を用いた。図5-1にEBSD法により得られた結晶面方位分布図を示す。また図5-2に同じ試料について画像による方位識別を行った結果を示す。これらより画像による方位識別では、EBSD法と同程度に結晶粒の認識ができてい

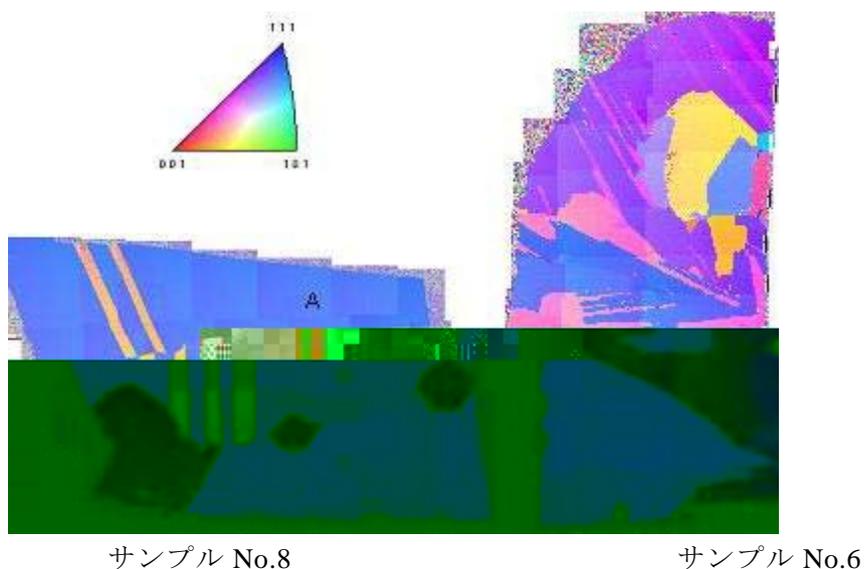


図5-1 EBSD法による結晶面方位分布図

ことがわかる。一方，図 5-1，及び図 5-2 の ABC を見ると，EBSD 法では同じ面方位であるにもかかわらず，画像による方位識別では違うコントラストで示されている。これは同じ面方位であっても回転によりコントラスト差を生じていると考えられる。以上，画像による方位識別では面方位だけでなく，回転角度情報も含んでいることが明らかとなった。



図 5-2 画像による方位識別（枠は EBSD 法による分析範囲）

5-3 まとめ

画像による面方位識別技術を検証するため，電子線の回折現象を用いて多結晶シリコンウェハの面方位を解析し，工業技術センターにて開発した手法との比較を行った。その結果，電子線回折による解析では同じ面方位であるにもかかわらず，工業技術センターの方位識別結果とは異なった方位と識別される場合があった。これは同じ面方位であっても回転により光学的にコントラスト差を生じているためと考えられる。撮影角度を変化させた画像方位識別実験によって，画像識別では面方位だけでなく，結晶面の回転角度情報も含んでいることが明らかとなった。

第6章 高輝度ドーム照明装置の開発

6-1 目的

拡散照明による均一照射エリアを、200mm×5mm以上の範囲で、20,000ルクス以上の照度を確保する。

6-2 内容と成果

多結晶ウェハの各結晶は、カメラをある角度で固定した場合、照明をある角度から当てると明るくなり、別の角度では暗くなる。一方、汚れ等の欠陥は照明を任意の角度から当てても暗いままである。また、多結晶ウェハには遊離ウェハと固定ウェハがあり、遊離ウェハは拡散反射成分が強い特徴があり、固定ウェハは直接反射成分が強い特徴がある。

そこで、照明には遊離ウェハと固定ウェハで共通のRGBドーム照明を利用する。これはRGBのLEDをそれぞれ異なる場所に配置し、反射板を利用してRGBの照明を異なる角度から照射する照明方法である。試作ドーム照明の実験結果より、遊離ウェハと固定ウェハの端部が暗くなることがわかったため、LEDの集積度を、中央は低く、端部は高くして、ハード的に均斉度の向上を図った。

6-3 まとめ

拡散照明による均一照射エリアを、200mm×5mm以上の範囲で、20,000ルクス以上の照度を得ることができた。ドーム照明装置の均斉度を向上させることができた。

第7章 マルチスペクトルライン照明装置の開発

7-1 目的

多波長（RGB，白，IR）の LED ライン光源を 20kHz 以上の速度で，制御クロックに同期して切り替えることができるマルチスペクトルライン照明装置を開発する。既存の 100W ハロゲンタイプの赤外線光源よりも高輝度を実現する赤外線ライン照明装置を製作する。

7-2 内容と成果

多波長の LED ライン光源を制御クロックに同期して高速に切り替えることができる点灯制御回路を研究し，製作する。また，高輝度，照射ライン均一の赤外線ライン照明装置を開発する。

RGB 及び白色 LED を使用し，ライン照明装置を製作した（図 7-1）。250mm 離れた位置で 80,000 ルクス以上の照度を確保することもでき，検査に十分な明るさを確保できた。また，レンズを用いて長手方向の均斉度を検査に必要なものにする事ができた。さらに，LED の電源に定電流電源を使用し，LED 負荷を切り替えて点灯させることで 20 kHz のクロック切替に対応できる RGB と白のライン照明装置を開発した。

赤外線 LED を使用し，ライン照明装置を製作した（図 7-1）。RGB 及び白色 LED のものと外観は同じである。特定波長においてはハロゲンタイプの赤外線光源と同等の輝度が得られた。また，レンズを用いて長手方向の均斉度を検査に必要なものにする事ができた。さらに，RGB 及び白色 LED と同様に，LED の電源に定電流電源を使用し，LED 負荷を切り替えて点灯させることで 20 kHz のクロック切替に対応できる赤外線ライン照明装置を開発した。



図 7-1 マルチスペクトルライン照明装置

7-3 まとめ

RGB 及び白色及び赤外線 LED を用いて，検査に必要な輝度を持つマルチスペクトルライン照明装置を開発した。また，それぞれ長手方向の均斉度を検査に必要なものにする事ができた。さらに，それぞれ 20 kHz のクロック切替に対応できる装置となった。

第8章 超並列処理アルゴリズムの開発

8-1 目的

8k×8kの画像に対して15×15のサイズのエッジ保存型フィルタ処理0.25秒以内、ガウシアンフィルタ処理0.1秒を実現することを目標として、超並列処理アルゴリズムの開発を行う。

8-2 内容と成果

低価格で処理能力の高いGPU（グラフィックプロセッシングユニット）を用いて、並列数値演算装置を構築し、GPU内部の480個以上の複数のプロセッサがそれぞれ複数のスレッド（小さなプログラム）を動作させながら並列に高速処理を行うアルゴリズムを開発する。

GPU機能を容易に拡張できる並列数値演算装置を構築し、GPU内部の480個以上の複数のプロセッサがそれぞれ複数のスレッドを動作させながら図8-1に示すように、並列に高速処理を行うフィルタ処理アルゴリズムを開発した。具体的には、GPU(NVIDIA GeForce GTX 580もしくは690)を2枚用いた実験用の並列数値演算装置の構築を行った。また、NVIDIAのマルチGPU動作システムであるScalable Link Interface(SLI)を用いた複数GPU同時処理プログラムの実験を行った。さらにメモリアクセスとアルゴリズムの最適化を行い、処理時間の短縮を図った。

エッジ保存型フィルタ処理の目標に関しては、8k×8k×3の画像に対して、15×15のエッジ保存型フィルタ処理GPUを2個使う場合、GTX580では0.637秒、GTX690では0.545秒かかり、目標値には達しなかった。しかし、実際に処理する画像サイズでは、目標の0.25秒を達成できた。

ガウシアンフィルタ処理の目標に関しては、8k×8k×3の画像に対して、15×15のガウシアンフィルタ処理GPUを2個使う場合、GTX580では0.409秒、GTX690では0.550秒かかり、目標値には達しなかった。しかし、実際に処理する画像サイズでは、目標の0.1秒を達成できた。

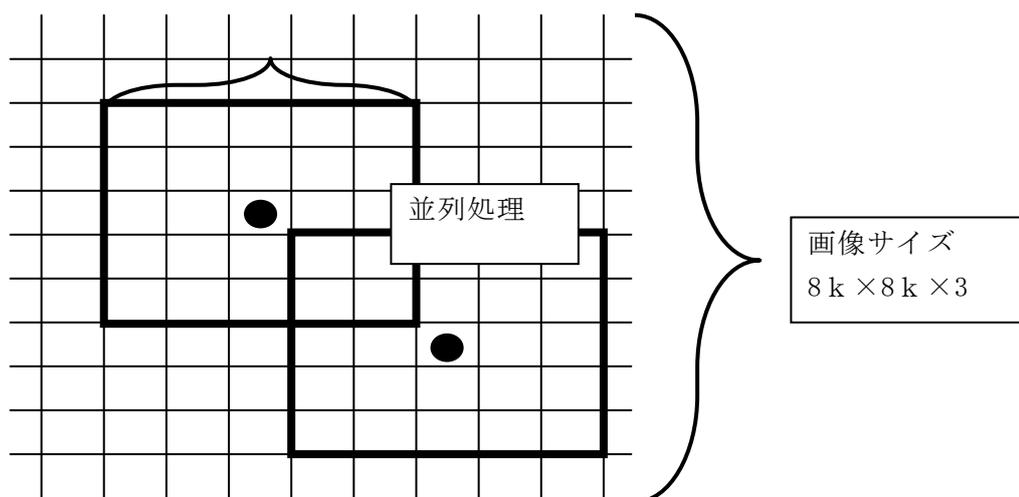


図8-1 フィルタ処理について

フィルタサイズ
3×3～15×15

実際のクラック検出処理に GPGPU を用いた超並列画像処理を実装した。処理時間については、CPU のみで処理すると 2.85 秒であったが、GPU を用いることで 0.28 秒であった。GPU により CPU の 10 倍の処理速度が実現できた。

8-3 まとめ

GPU (NVIDIA GeForce GTX 580 もしくは GTX690) を 2 枚用いた並列数値演算装置の構築を行った。各々 15×15 のサイズのエッジ保存型フィルタ処理では、GTX580 では 0.637 秒、GTX690 では 0.545 秒と目標値には達しなかったが、実際の画像に適用した場合を想定すると、目標の 0.25 秒以内を実現していることがわかった。また 各々 15×15 のサイズのガウシアンフィルタ処理では、GTX580 では 0.409 秒、GTX690 では 0.550 秒と目標値には達しなかったが、実際の画像に適用した場合を想定すると、目標の 0.10 秒以内を実現していることがわかった。

第9章 超並列画像処理装置の多結晶ウェハ欠陥検査装置への組み込み

9-1 目的

アルゴリズムを実装し、ガウシアンフィルタおよびエッジ保存型フィルタ処理を 0.25 秒以内に行う。

9-2 内容と成果

多結晶ウェハ欠陥検査装置の画像処理装置部に GPU ボード等を追加・変更することで処理速度を向上させる。

以下の条件で処理速度を確認した。

画像サイズ：4096 x 4000

画像深度：8bit x 3(RGB)

GPU：GTX690 1枚

また、処理速度の測定結果は以下のとおりである。

ガウシアン 15x15： 142 ミリ秒

エッジ保存型 15x15： 137 ミリ秒

(処理速度はフィルタのサイズとほぼ比例する。例えば、3x3 -> 30 ミリ秒、11x11 -> 110 ミリ秒など。)

これに加えて画像データをメインメモリから GPU メモリにコピーする時間、逆にコピーする時間がそれぞれを足し合わせて 30 ミリ秒程度必要である。

例えば、固定ウェハの汚れ検出の場合は、GPU 処理部の計算時間は以下となる。

ガウシアンフィルタを 4 回 (15x15, 11x11, 7x7, 3x3) 畳み込む。この場合、 $150+110+70+30+30 = 390$ ミリ秒となり、目標の 1000 ミリ秒を下回ることが可能である。

遊離ウェハの汚れ検出で計算量の多い部分はエッジ保存型フィルタを 2 回畳み込む箇所である。15x15 サイズのフィルタを 2 回畳み込むとすると、 $150+150+30 = 330$ ミリ秒となり、目標の 1000 ミリ秒を下回ることが可能である。

また、マイクロクラック検査にもガウシアンフィルタを数回畳み込む予定である。例えば、ガウシアンフィルタを 3 回 (15x15, 11x11, 7x7) 畳み込んだとすると、 $150+110+70+30 = 360$ ミリ秒であるが、画像サイズが 2048x4000 の予定なので、計算時間はこの半分の 180 ミリ秒となる予定である。

9-3 まとめ

画像サイズ 4096x4000, 画像深度 8bitx3, GPU に GTX690 を 1 枚用いて、15x15 サイズのガウシアンフィルタとエッジ保存型フィルタを 0.15 秒で畳み込むことが可能となり、目標の 0.25 秒以内を達成した。また、欠陥検出に計算量の多いガウシアンフィルタやエッジ保存型フィルタを適用することが可能になり、検出能力の向上が期待できる。

第10章 ソフト搬送技術の研究

10-1 目的

画像取得時に、振動の影響によるむらの明るさの変動幅が、むらの平均の明るさに対して1%以内を実現する。

10-2 内容と成果

単結晶ウエハで実績のある搬送技術を改良し、薄いウエハ基板を高速に、振動させずに検査エリアに搬入・搬出しソフト搬送技術の研究を行う。

ウエハ搬送時の振動を少なくするために、厚みが薄い平ベルトと小径プーリーを組み合わせた搬送方式を装置に組み込み搬送時の振動を最小限に抑えるように最適化を行った。

搬送時の振動を検証するために、赤外線カメラを用いて単結晶ウエハ1枚を8回繰り返し撮像し、取得した画像の明るさのばらつきの検証を行った、検証の結果8枚の画像の明るさの平均値が60.89（0～255階調）に対して1.07%（明るさの値でバラつきが±0.655）であった。小径ベアリングと厚みの薄い平ベルトを用いる事による搬送時の振動は、画像処理を行う上で問題ない事が確認された。

第11章 装置のメカニカル設計と動作試験

11-1 目的

むらの変動幅が1%以内で、1秒以内の検査時間を可能にする。

11-2 内容と成果

最適画像取得方法に基づいた画像入力部と、高速で安定して動作する搬送部を備える多結晶ウエハ欠陥検査装置の設計・制作を行い、制作後は動作試験を行う。

マイクロクラックは目視では判別できないため、赤外線感度を持つカメラを用いてウエハ画像を取得し、画像に対してソフト的にフィルター処理及び欠陥検出処理を行う事でクラックの有無を判断しなければならない。マイクロクラックの位置やクラックが発生している角度によって検出出来る場合と出来ない場合があった。この原因として、特定の角度で発生するクラック部分に照明光が反射せず正常な部分との明確な明るさの差が無いため検出が困難である事が分かった。H23年度に製作した搬送装置ではマイクロクラックの検出ポジションは1箇所であり、また一方方向から照明を当ててウエハ画像を取得していたため、クラックの位置、発生角度によって未検出が発生した。この問題を解決するために検査ポジションを1箇所増やし、マイクロクラックの検出ポジションを2箇所とした。

搬送ベルト駆動部に使用するベアリングは、回転動作時には必ず振動が伴うため可能な限り小さいベアリングが望ましい。径の大きなベアリングを用いると、ベアリングの寸法公差が大きいため振動（ガタ）が大きくなってしまう。この理由により、可能な限り寸法の小さなベアリングとベアリングにかかる負荷を最小限に抑えるために厚みの薄い平ベルトを用いた、搬送ベルトの種類の中でタイミングベルトや丸ベルトと平ベルトを用いた場合を比較すると平ベルトの厚みが一定に製作されているため一定の高さで搬送が可能になる、また搬送時の振動の軽減と反転動作を必要としないためマイクロクラックの発生している可能性があるウエハの破損を無くすこと事が可能になった。

第12章 検査プログラムの実装と制御ソフト開発

12-1 目的

検査時間 1 秒以内。

12-2 内容と成果

開発した検査プログラムを検査装置の画像入力部と搬送部に同期して動作させ、検査時間 1 秒以内に装置各部分の処理を連携して動作させる総合的な制御ソフトの開発をおこなう。

H22 年及び H23 年度中、ウエハ切断方法の主流となりつつある固定砥粒方式（ダイヤモンドを埋め込んだワイヤでウエハをスライスする方法）でスライスしたウエハに発生するマイクログラックの検出が重要になった。

従来の遊離砥粒方式でスライスしたウエハの表面と固定砥粒方式でスライスしたウエハの表面を比較すると、固定砥粒方式でスライスしたウエハの表面は、光沢があり、遊離砥粒方式でスライスしたウエハと同じ条件で照明を当て画像を取得した場合、それぞれウエハ画像内の明るさが異なるため、使用する画像処理時のフィルター、検出に必要なアルゴリズムも表面状態によりそれぞれ個別に必要となる、また固定的にフィルター処理、検出処理をソフトウェア化してしまうと、表面状態が異なったウエハに対して新たにソフトウェアを作成しなければならないため柔軟に対応することは困難である、この問題を解決するためにウエハの表面状態によってフィルター処理、欠陥検出処理アルゴリズムを細分化しフィルター処理及び欠陥検出に使用するアルゴリズムもウエハ表面形状に併せて検査前に必要な処理のみを使用する／または使用しない等のパラメータを用いて様々なウエハ表面状態に合わせて自由に組み合わせて使用できるようインターフェースを作成する。またフィルター処理、検出処理を細分化し検査前にあらかじめ個別に指定出来るようにすることで今後新たにスライス方式やウエハの製造工程によりウエハの表面状態が異なるウエハに対してフレキシブルに処理が行える。

第13章 実用化と実証試験

13-1 目的

微弱な汚れに関しては目視検査と比較して99%以上の一致率を目指す。マイクロクラックに関しては検査装置により正常と識別したワークを、人が打診検査を行って、0.1%以下の不良見逃し発見率を目指す。

13-2 内容と成果

実際のウェハを使用して実用化のための実証試験を行い、目標とする能力の確認と、検査手法、装置の改良点を探る。

13-2-1 マイクロクラックの検出率

検出率と誤検出率の目標は以下のとおりである。

検出率 99.9% (不良見逃し発見率 0.1%)

誤検出率 1.0%

多結晶シリコンウェハのマイクロクラックサンプルはほとんどなく、また、僅かなマイクロクラックサンプルも少しの衝撃でマイクロクラックが成長していくため、マイクロクラックを人工的に作成し、画像を取得した。マイクロクラックサンプル画像800枚（クラックあり400枚、なし400枚。）に対する実験結果は以下のとおりである。

検出率 92.8%

誤検出率 6.0%

誤検出例、未検出例を図13-1、図13-2に示す。

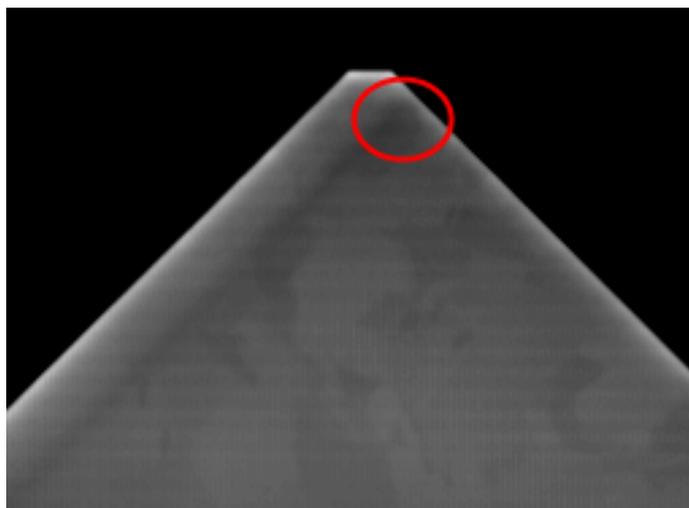


図13-1 誤検出例

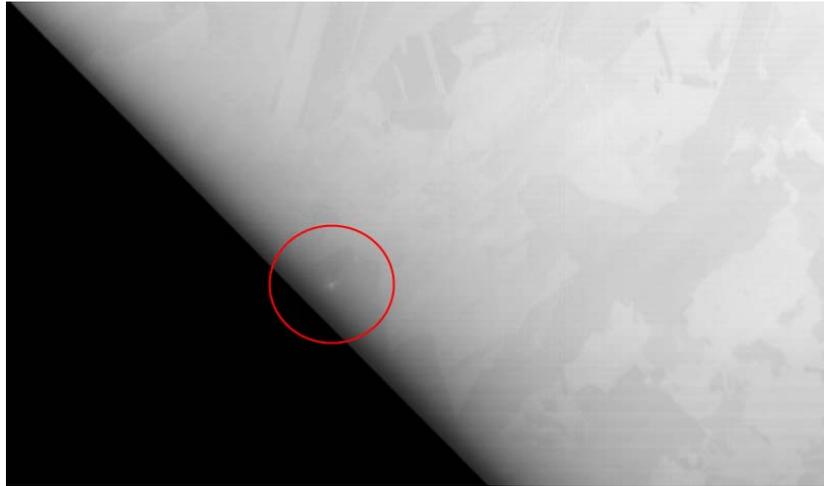


図 1 3 - 2 未検出例

問題点は以下のとおりである。

1. ウェハの端部で誤検出が多い。
2. 微細なマイクロクラックの検出ができない。

1 3 - 3 まとめ

マイクロクラックサンプル画像 800 枚に対してマイクロクラック検出実験を行い，検出率 92.8%，誤検出率 6.0%を達成した。

第14章 全体総括

多結晶シリコンは、小さな結晶の集まりからなり、結晶面方位により結晶粒のコントラストが変わるため、表面の汚れや太陽電池内部のマイクロクラックが、結晶粒や結晶粒の境界である粒界と区別し難く、検出が極めて困難であり現状では有効な検査装置は開発されていない。ウェハ製造メーカーでは24時間体制の人海戦術により全数を検査している。

14-1 成果

本年度の主な成果は、下記のとおりである。

(1) RGB ドーム照明を用いる照明方法を確立し、 $100\mu\text{m}$ 程度の異物を検出した。

(2) 人工的にマイクロクラックを作成し、画像上で $300\mu\text{m}$ のマイクロクラックの撮影に成功し、検出することができた。

(3) 電子線回折と撮影角度を変化させた画像方位識別実験によって、画像識別では面方位だけでなく、結晶面の回転角度情報も含んでいることが明らかとなった。

(4) 画像サイズ 4096×4000 、画像深度 $8\text{bit}\times 3$ の画像1枚に対して、 15×15 サイズのガウシアンフィルタとエッジ保存型フィルタを0.15秒で畳み込むことが可能となった。

(5) マイクロクラックサンプル画像800枚(クラックあり400枚、なし400枚。)に対して、検出率 92.8%、誤検出率 6.0%を達成した。

14-2 課題

これまでの研究により、次のような課題が明確となった。

(1) ウェハ進行方向と直角な方向のマイクロクラックが検出できないため、撮影を2回に分ける方法を考案した。確実に検出可能な方法であるが、カメラを2セット以上用意する必要があり、コスト面で不利である。カメラ1セットでもウェハ進行方向と直角な方向のマイクロクラックを検出できるような照明方法を考案する必要がある。

(2) ウェハのマイクロクラック検出時、結晶粒界を消しつつマイクロクラックを撮影する方法を考案した。しかし、照明の効率が悪く、照明にかなりのエネルギーが必要となった。エネルギー的に効率の良い照明方法を考案する必要がある。

14-3 今後の予定

ウェハ進行方向と直角な方向のマイクロクラックが検出できない問題については、照明方法の改良で対応する予定である。レーザーのような平行光をウェハ端面から照射することを検討する。

照明のエネルギー効率の問題についても、照明方法の改良で対応する予定である。照明からラインセンサカメラまでの間にレンズ、拡散板等のフィルタを通してエネルギー効率の改善ができないか検討する。