

高温塑性加工法による任意の形状を有する Si 結晶ウェハの作製と応用

東北大学 金属材料研究所

教授 中嶋一雄

(平成 17 年度研究開発助成 AF-2005020)

キーワード：高温加圧加工、形状結晶ウェハ、結晶レンズ、シリコン、ゲルマニウム

1. 研究の目的と背景

従来、Si や Ge の結晶ウェハは硬い材料であり、変形加工して自在の形状ができるとは信じられていなかった。中嶋らは、最近 Si 結晶ウェハを、ある条件で高温加圧加工すると自在の形状に変形加工できることを見出した¹⁾。図 1 に、波型の形状に塑性加工した Si 結晶ウェハの写真を示す²⁾。この高温加圧加工法を用いると、Si や Ge の結晶レンズの作製ができる¹⁾。この結晶レンズは、結晶表面の曲率に沿って格子面も同様の曲率を持つことが X 線測定より判明している。さらに、塑性加工した Si 結晶ウェハは、ある条件で熱処理すると、良好な太陽電池特性を出せるほど品質が良

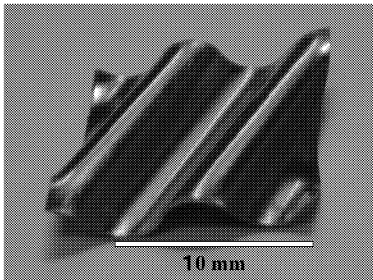


図 1 波型ウェハ

い³⁾。

この高温加圧加工法を用いて Si 結晶ウェハや Ge 結晶ウェハを加工すると、3 次元的に自在の形状を有する結晶ウェハが作製できる。このため、従来技術では加工が困難であった X 線を一点集光できるモノクロメータなどの結晶レンズを作製できる可能性がある。また、この Si 結晶レンズで太陽電池を作製し、同時に結晶ミラーとして用いた新しい太陽電池システムができる。この新システムは、結晶ミラーの集光位置に別の小型太陽電池を配置することにより、ミラー太陽電池

で反射した光をすべて光電変換に利用できる画期的な太陽電池システムである。

Si や Ge 結晶ウェハは、高温でこのように塑性加工が可能であるが、どのような加工条件(加工温度範囲、ウェハ厚さ、荷重、形状、面方位)で、良質な形状結晶ウェハの作製が可能であるか、不明な点が多い。このため本研究では、Si や Ge 結晶ウェハの加工が可能となる条件や範囲を決定することを目的とする。さらに、Si や Ge 結晶ウェハの加工条件をベースに、X 線モノクロメータや X 線分光結晶の設計を行い、3 次元的な形状の Si や Ge 結晶レンズを作製する。この結晶レンズの品質を、結晶学的や X 線的に評価し、結晶レンズとしての可能性を見出し、その有効性を実証する。

2. 実験方法

半球状の結晶ウェハや結晶レンズを得るために、図 2 に示すようなグラファイト製のダイを用いた。これらの上のダイと下のダイの間に、Si 結晶ウェハや Ge 結晶ウェハを挟み、融点より下の所定の高温に保持した後、200N 程度の荷重を加え、各種の形状結晶ウェハを得た。結晶ウェハの厚みも目的に応じて変

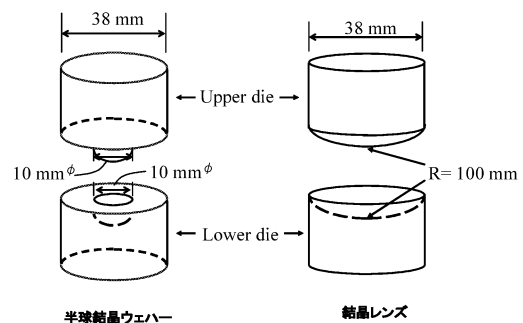


図 2 高温加圧加工用ダイ

えた。結晶ウェハのサイズは、直径が38 mmの円形か、円形ウェハの両端を切り落とした形状の幅30 mm程度のウェハを用いた。

3. 形状結晶ウェハと結晶レンズの高温加工

図3に、高温高圧加工法で作製した半球状のSi形状結晶ウェハを示す。直径は10 mmであり、このような微細な形状のSiやGeの結晶ウェハが容易に作製できる。また、図4は、高温高圧加工法で作製したSi結晶レンズであり、極めて良質の種々の形状のレンズが作製可能である。図5は、半球状のSi形状結晶ウェハの加工可能範囲を、加工温度と結晶ウェハの厚みをパラメータにして求めたチャートであり、荷重は200Nに固定した。Si融点の直下から、1100°C程度の低温までの広い領域で加工が可能であり、結晶ウェハの厚みが薄くなるほど加工可能な温度範囲は低温まで広がる。しかし、最も適切な形状に加工できる最適な温度範囲は、融点に近い領域となる。図6は、図3に示した半球状のSi形状結晶ウェハの半球の高さを、結晶ウェハの厚さを変数とし、加工温度をパラメータにしてとったデータであり、半球の高さは変形量を表している。同じ加工温度では、結晶ウェハの厚みが薄くなるほど変

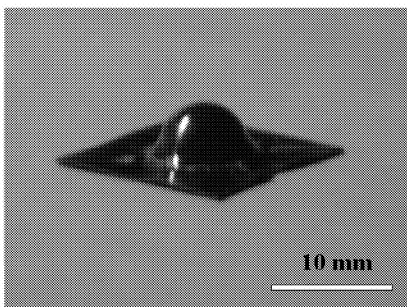


図3 半球状 Si 結晶ウェハ

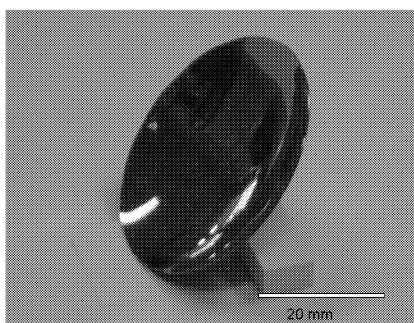


図4 半球状 Si 結晶レンズ

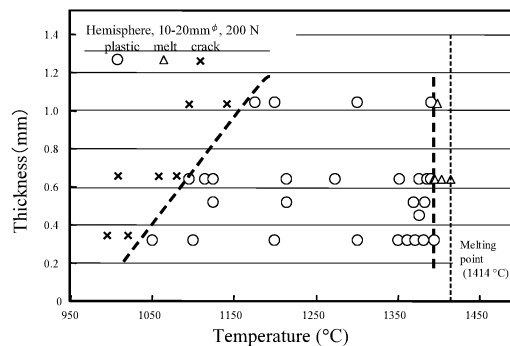


図5 高温高圧加工が可能な条件範囲

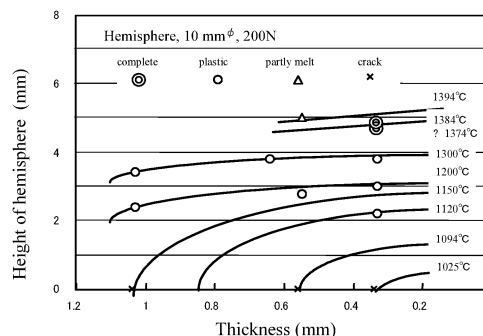


図6 変形量のウェハ厚さ依存性

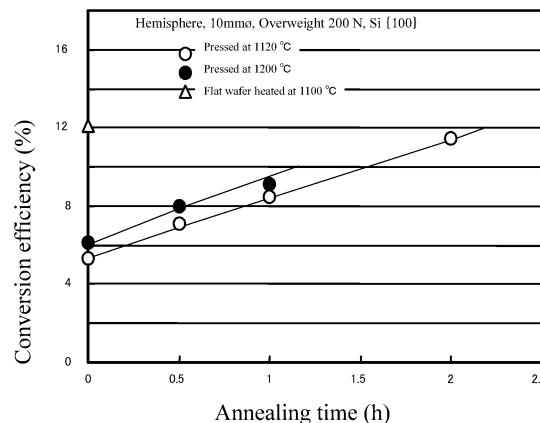


図7 半球状 Si 結晶ウェハを用いた太陽電池特性のアニーリング効果

形量が増しており、最適な形状は1380°C近傍のSi融点直下で得られることを示している。

4. 結晶ミラーを用いた太陽電池システム

図3に示した半球状のSi形状結晶ウェハを用いて太陽電池を作製し、太陽電池の特性が結晶ウェハをアニーリングした時間にどのように依存するかを調べ

た. 図7がその結果で、太陽電池の変換効率をSi結晶ウェハーのアニーリング時間の関数で示している. 加工温度は、1120°Cと1200°Cである. アニーリングしない時には、5.6%しかなかった太陽電池の変換効率が、アニーリング時間とともに高くなり、2時間のアニーリングでは、変換効率は11.5%にまで高くなる. 高温加圧加工しないSi単結晶ウェハーを、同じ装置の中で1100°Cまで加熱し、しかる後に太陽電池を作製した結果を、△印で示している. この太陽電池の変換効率は12.1%であり、2時間のアニーリング後の結晶ウェハーを用いて作製した太陽電池の変換効率である11.5%とあまり変わらない. このことは、適当なアニーリングを施せば、形状結晶ウェハーの品質が、太陽電池を作製できるほどに大幅に改善できることを意味している.

図4に示したSi結晶レンズを、結晶ミラーの太陽電池として用いた新しい太陽電池システムを図8に示す. ミラー太陽電池は、太陽電池としての機能と太陽光の反射集光機能とを合わせ持っている. 集光位置には小型のSi太陽電池を配置し、反射光を効率良く光電変換できるようにしている. システムとしての変換効率は、ミラー太陽電池と集光位置の太陽電池から生じるフォトンの和から求めることができる. 図9にこの太陽電池システムを構成する各太陽電池のV-I特性を示す. 破線で示したのが、模擬太陽光を当てたミラー太陽電池の特性、点線が模擬太陽光を当てた小型太陽電池の特性、実線が集光位置に置いた同じ小型太陽電池の特性

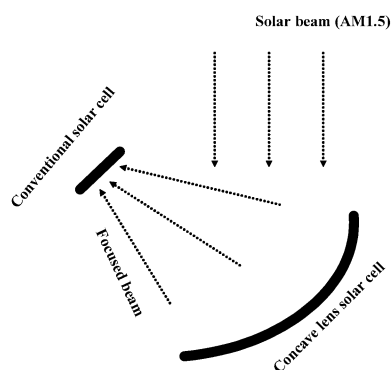


図8 新しい太陽電池システム

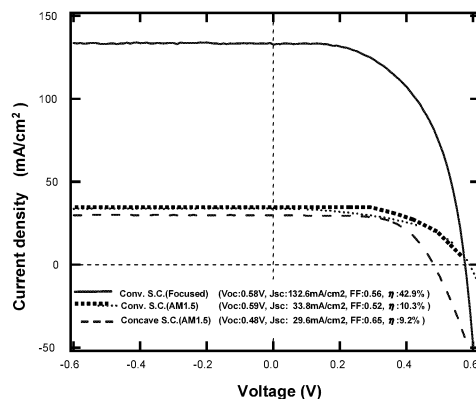


図9 新太陽電池システムのV-I特性

を示す. ミラー太陽電池のみでは、変換効率は9.2%であったが、集光位置に置いた小型太陽電池の特性を加えた、太陽電池システム全体の変換効率は12.2%となる. これは、本太陽電池システムを用いると、ミラー太陽電池の表面から反射した光を有効に利用できることを示してしている.

5. 結晶レンズの品質

3次元的に任意の形状をもった結晶レンズが作製できるため、図10に示すようなX線を一点集光できるJohansson型モノクロメータが作製できる可能性がある. このためまず、高温加圧加工法で作製したSi結晶レンズの品質を結晶学的に検証した. 図11は、x軸とy軸に対して同じ曲率をもつ半球状のSi結晶レンズのX線強度の ω スキャンプロファイルを示す. 測定位置は結晶レンズの中心から10 mmの位置である. FWHMは 0.15° である. 図12に示すように、結晶レンズの結晶表面に沿って結晶格子面が同じ曲率で曲がっている時は、結晶レンズの中心からの距離は曲率半径と{111}面からの傾き角 $\Delta\omega$ に対して、図中に示すような簡単な関係をとる. 図11で測定した半球状のSi結晶レンズや一方向にのみ曲率をもつシリンダー型の結晶レンズに対して、{111}面からの傾き角 $\Delta\omega$ を結晶レンズの中心からの距離に対して測定した結果を図13に示す. 曲率半径は100 mmである. 半球状の結晶レンズのx軸とy軸に対しても、シリンダー型の結晶レンズのx軸に対しても、 $\pm 7^\circ$ の範囲で図12の関係を満たしている. このため、こ

れら2種類の結晶レンズの格子面の曲率も、正確に結晶表面の曲率に沿っていることがわかる. この半球の結晶レンズのFWHMは 0.1° 程度であり、X線の結晶レンズとして使用可能な良い値を持っている. 図14は、

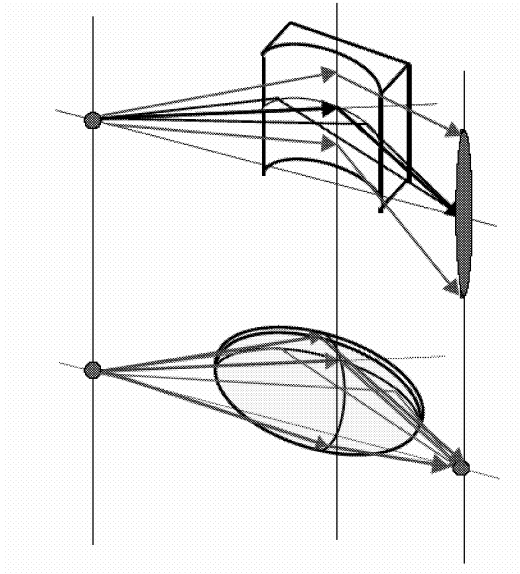


図10 Johansson型モノクロメータ

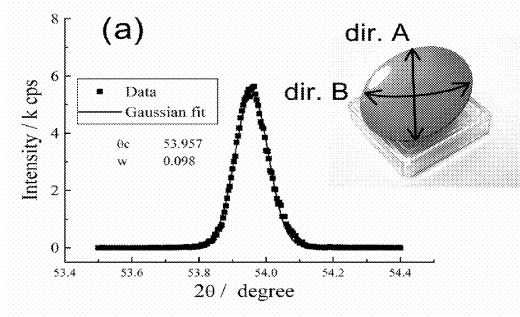


図11 半球状Si結晶レンズのFWHM

$$d = \rho \sin(\Delta\omega)$$

d: distance from the center
 ρ : curvature radius

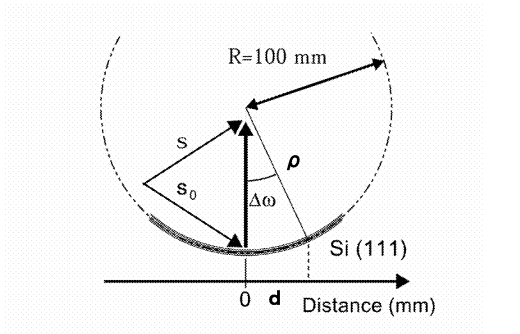


図12 結晶表面の曲率と結晶格子面の曲率

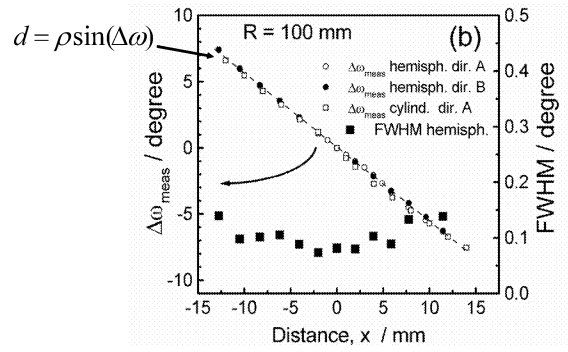


図13 傾き角 $\Delta\omega$ の距離依存性

{111}面の結晶ウェハーを加工して得た半球状のSi結

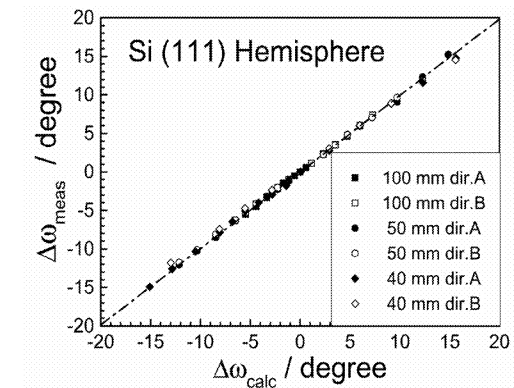


図14 傾き角 $\Delta\omega$ の計算値との相関

晶レンズの{111}面からの傾き角 $\Delta\omega$ の計算値と実験値の結果を比較した関係を示す. $\pm 15^\circ$ の広い範囲にわたって、結晶表面と同じ曲率を有し、良質な結晶レンズが作製可能であることがわかる. 図14には、曲率半径が40, 50, 100 mmの3種類の結晶レンズの結果を示している. いずれの曲率半径の結晶レンズでも、結晶表面と同じ良好な曲率を有している⁴⁾.

6. まとめ

高温加圧加工法を用いると、半導体のような共有結合をした結晶ウェハーでも、3次元的に自在の形状に変形でき、種々の形状結晶ウェハー、結晶レンズ、結晶ミラーが作製できることがわかった. これらの形状結晶は、太陽電池が作製できる程度の良質な品質を有している. また結晶レンズは、結晶表面の曲率に沿って広い角度範囲で、結晶格子面が正確に同じ曲率をしており、X線の新しい結晶レンズとして使用できる可能

性が高い. 今後、加工技術や加工装置の改良により、大きなブレークスルー的な用途が期待できる. なお最近では、分光結晶レンズとしても使用できるデータも得られつつあり、いろいろの用途への実用技術としての可能性も高まった.

謝辞

本研究の一部は、天田金属加工機械技術振興財団の助成により遂行されました. 特に、本研究の黎明期に、いち早く本研究の価値を認めて下さり、ご支援を賜りましたことに厚くお礼申し上げます.

参考文献

- 1) K. Nakajima, K. Fujiwara, W. Pan and H. Okuda: Nature Materials, 4 (2005), 47.
- 2) K. Nakajima, K. Fujiwara and W. Pan: Appl. Phys. Lett., 85 (3004), 5896.
- 3) K. Nakajima, K. Fujiwara and W. Pan: J. Electronic Materials, 34 (2005), 1047.
- 4) H. Okuda, K. Nakajima, K. Fujiwara and S. Ochiai: Appl. Crystallography, 39 (2006) 44