

## シリコンウエハの機械研磨による加工欠陥のレーザー修復

慶應義塾大学理工学部機械工学科 ○榎本 圭太 ◎関 紀旺

## 要 旨

単結晶シリコンウエハは半導体デバイスの基板材料として用いられ、無欠陥・高平坦度が要求される。しかし砥粒加工によるウエハ製造プロセスにおいて、アモルファス層やマイクロクラックなどの加工欠陥層が生じる。本研究では、ナノ秒パルスレーザーを機械研磨後のウエハに照射し、加工欠陥層の修復および平坦化を試みた。また、照射条件選定のためにFEM解析を行った。実験検証結果、レーザー照射により結晶性向上と平坦化を同時に達成した。

## 1. 結論

単結晶シリコン（以下 Si）ウエハは、インゴットをワイヤソーによって切断し、研削や研磨工程を経て製造される。これらの工程においてウエハ表面にはソーマークや研削痕、研磨痕が生じる。また、ウエハ表面下にはクラックやアモルファス層などの欠陥が残留し、ウエハ強度や品質の低下の原因となる<sup>1)</sup>。

従来、これらの加工欠陥層の除去工程として化学機械研磨（CMP）が用いられてきたが、高環境負荷や形状精度の劣化、低スループットが問題となっている。そこで本研究では、レーザー照射による加工欠陥の修復および表面の平坦化を提案する。レーザー修復技術は廃液排出がなく、形状精度を維持し低環境負荷での欠陥修復が可能である。本研究の先行研究では、荒研削後の Si ウエハに対してレーザー照射を行い、結晶構造修復と表面粗さ改善が達成された<sup>2)</sup>。しかし CMP 後の表面と比較し、表面粗さが十分に改善されていない。そこで本研究では、機械研磨後の Si ウエハに対してレーザー照射を行い、加工欠陥の完全除去と CMP 同等レベルの表面平坦化を試みた。また、レーザー出力と溶融深さの関係を調査するため、FEM による熱伝導シミュレーションを行った。

## 2. レーザ照射による加工欠陥修復原理

レーザー修復の原理を図 1 に示す。機械研磨後の Si ウエハにはアモルファス層や転位層、マイクロクラックなどの欠陥が存在する（図 1(a)）。ウエハ表面にレーザービームを適切な条件で照射すると、表面に溶融領域が形成される（図 1(b)）。そして溶融領域が単結晶バルクに到達すると、溶融領域下の単結晶シリコンを種結晶として溶融領域が再結晶化（エピタキシャル成長）する（図 1(c)）。この結果、無欠陥層の形成と表面平坦化が同時に達成される（図 1(d)）。

## 3. FEM による熱伝導解析

レーザー平均出力と溶融深さの関係を調査するため、FEM による熱伝導解析を行った。FEM 解析には COMSOL Multiphysics（COMSOL AB 社製）を用いた。

レーザー照射による加熱プロセスは次の熱伝導方程式によって記述される<sup>3)</sup>。

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (k \nabla T) = Gt \quad (1)$$

ここで、 $\rho$  は密度、 $C_p$  は定圧比熱、 $t$  は時間、 $T$  は温度、 $k$  は熱伝導

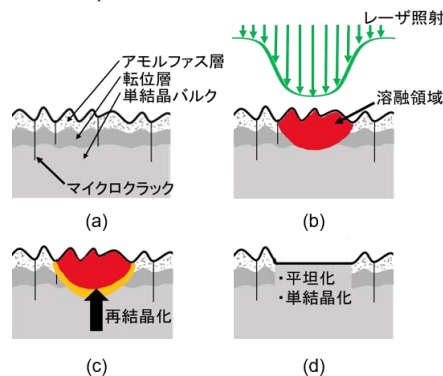


図 1 レーザ修復原理

率である。 $Gt$  はランペルト・ベールの法則による深さ  $y$  に依存する熱源分布であり、

$$Gt(y,t) = I(t) \left(1 - R(T)\right) \frac{e^{-\frac{y}{\delta_a}}}{\delta_a} \quad (2)$$

で与えられる。ここで、 $I(t)$  [ $\text{W}/\text{cm}^2$ ] はレーザー強度、 $R(T)$  は反射率、 $\delta_a$  はレーザーの侵入深さである。レーザー波長  $\lambda = 532 \text{ nm}$ 、 $300 \text{ K}$  での反射率は  $38\%$  であり<sup>4)</sup>、温度の上昇に伴い反射率は増加する。照射部の Si と外部との境界条件は以下の式で表される。

$$\vec{n} \cdot (k \nabla T) = q_0 + h(T_{\text{amb}} - T) + \sigma \epsilon (T_{\text{amb}}^4 - T^4) \quad (3)$$

ここで、 $\vec{n}$  は法線ベクトル、 $q_0$  は熱流束、 $h$  は対流熱伝達率、 $T_{\text{amb}}$  は室温、 $\sigma$  はステファン・ボルツマン定数、 $\epsilon$  は放射率である。これらの式を用いて、数値解析を行った。単純化のため、ビームプロファイルはフラットトップとし、1パルス照射とした。

## 4. 実験方法

実験サンプルとして、機械研磨後の Si ウエハを用いた。レーザー装置にはナノ秒パルスレーザー（INNGU LASER 社製 Super Pulse 532-30）を使用した。レーザーのビームプロファイルはガウス分布をとる。表 1 にレーザー照射条件を示す。走査速度や繰り返し周波数の影響を調査するために 3 条件の照射条件を設定した。始めに、レーザー照射前のサンプルの断面を透過型電子顕微鏡（TEM）で観察した。次に、各条件において平均出力を変化させて線照射実験を行った。照射後、レーザー顕微鏡と白色干渉計を用い、表面観察および表面粗さ測定を行った。また、ラマン分光光度計により結晶構造評価を行った。

## 5. 結果および考察

## 5.1 熱伝導解析結果

FEM による解析結果を図 2 に示す。レーザー平均出力  $3 \text{ W}$  以上で深さ  $100 \text{ nm}$  まで溶融した。しかし  $7 \text{ W}$  では表層（ $10 \text{ nm}$ ）において沸点を超えた。したがって、平均出力  $3 \sim 5 \text{ W}$  で表層部を蒸発させずに溶融させることが可能である。

## 5.2 表面観察

図 3 に、サンプル断面の TEM 画像を示す。Si ウエハには、機械研磨による厚さ約  $20 \text{ nm}$  のアモルファス層および深さ約  $50 \text{ nm}$  の転位層が存在していることがわかる。図 4 にレーザー照射後のウエハ表面を示す。ここで、図中の A, B, C は表 1 の条件にそれぞれ対応する。③以外において、レーザー照射部で色が変化した。このことから、表層部において溶融が生じたことが分かる。

表 1 レーザ照射条件

条件	A	B	C
波長	532 nm		
スポット径	85 $\mu\text{m}$		
パルス幅	19.0 ns	19.0 ns	35.5 ns
繰り返し周波数	70 kHz	70 kHz	140 kHz
走査速度	59.5 mm/s	119.0 mm/s	119.0 mm/s
平均出力	1.0, 3.0, 5.0, 7.0 W		
加工雰囲気	大気中		
走査回数	1 回		
ビームプロファイル	ガウス分布		

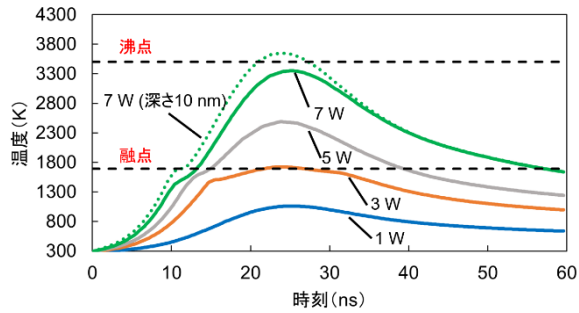


図 2 異なる出力におけるウエハの温度変化 (深さ 100 nm)

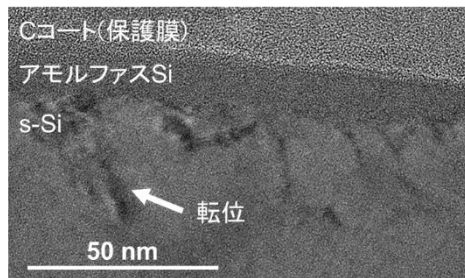


図 3 Si ウエハの断面 TEM 画像

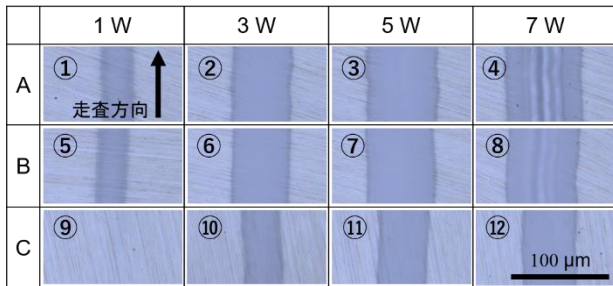


図 4 レーザ照射後の Si ウエハ表面

また 1 W (条件 A) の照射時に熔融が生じており、シミュレーションで得られた結果と異なる。シミュレーションではビームプロファイルフラットトップとしたが、実験で使用したレーザーはガウス分布である。そのため、実験時のピーク強度が大きく熔融が起きたと考えられる。

走査速度の影響について調査するため、条件 A, B を比較する。同じ平均出力において、これらの条件下では表面性状に大きな違いがない。したがって、本実験条件下において、59.5~119 mm/s の走査速度の変化は熔融領域の性状にほとんど影響がないと考えられる。しかし、走査速度を大きくするとパルス間距離が広がり、不均一な修復になることが予想される。

次に繰り返し周波数の影響を調査するために条件 A, C を比較する。ここで、2つの条件における単位面積当たりのパルス数は同じである。同じ平均出力においては A の方が熔融領域の幅が広く、より大きなエネルギーが吸収されたことが分かる。平均出力を一定にして繰り返し周波数を大きくすると、ピーク出力は小さくなる。したがって、条件 C では繰り返し周波数が大きいので、ピーク出力が小さくなる。その結果、熔融に必要なエネルギーに達するビームプロファイルの範囲が狭くなったため、熔融領域の幅が狭まったと考えられる。すなわち、繰り返し周波数の増加によって熔融深さが減少すると考えられる。

### 5.3 表面粗さ測定

図 5 にレーザー照射前後の算術平均表面粗さを示す。条件 C、平均出力 5 W のとき、最も平坦な表面 (0.71 nmSa) が得られ、照射前 (1.13 nmSa) と比較して 37% 表面粗さが減少した。次に平均出力の影響を調査するため、条件 A について述べる。平均出力 1 W のとき、いずれの条件においてもレーザー照射前より表面粗さが悪化した。平均出力を増加させると表面粗さが減少し、さらに出力を増加させると表面粗さは再び悪化した。ここで、平均出力が低いときにレーザー照射前より表面粗さが悪化したのは、熱膨張によるマイクロクラックの開きの影響と考えられる<sup>2)</sup>。照射前はアモルファス層の下に存在して計測されなかったマイク

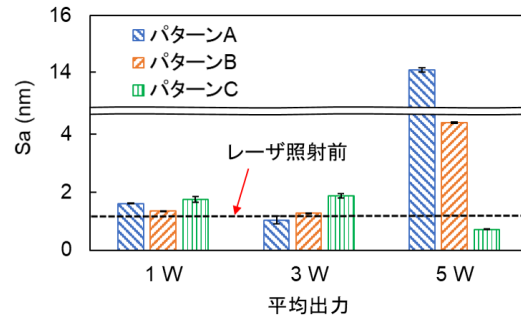


図 5 レーザ照射前後の表面粗さ変化

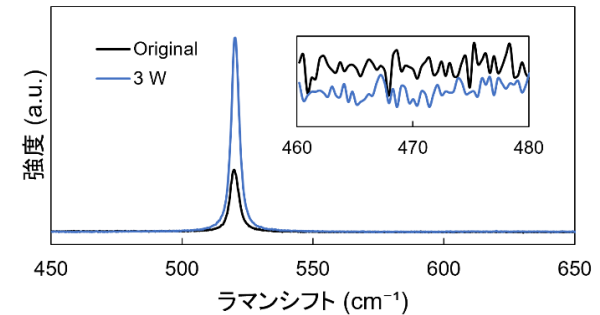


図 6 レーザ照射前後のラマンスペクトル (条件 A)

ロクラックが、レーザー照射により拡大し、表面粗さが増加したと考えられる。平均出力が十分に大きくなると熔融深さが増大し、これらのマイクロクラックが完全に修復され、表面張力により熔融表面が平坦化される。そして、平均出力をさらに大きくするとアブレーション加工が生じ、表面粗さが悪化する。

### 5.4 結晶構造評価

ラマン分光光度計を用いてレーザー照射前後の結晶構造評価を行った。図 6 に照射前および 3 W で照射した際のラマンスペクトルを示す。照射前後ともに単結晶 Si ピーク ( $521 \text{ cm}^{-1}$ ) が観察され、照射後にピーク強度が増加した。また、アモルファス Si のブロードピーク ( $470 \text{ cm}^{-1}$  前後) が照射後に減少した。またレーザー照射により半値幅 (FWHM) が約 20% 減少した。これらのことから、レーザー照射によってアモルファス Si が単結晶 Si に構造変化し、結晶性が向上したことがわかった。

## 6. 結論

機械研磨後の Si ウエハに対してレーザー照射を行い、加工欠陥の修復と表面平坦化を試みた。その結果、以下の結論を得た。

- (1) FEM 解析により、熔融深さとレーザー平均出力の関係が得られた。Si ウエハの熔融および蒸発が生じる平均出力を求め、レーザー修復に適した照射条件を導出した。
- (2) レーザ照射による表面熔融層の形成が確認され、算術平均表面粗さ 1 nmSa 以下の表面を得た。本研究の実験条件下では走査速度は熔融領域の大きさに影響を与えなかったが、繰り返し周波数の増加により熔融領域の幅が減少した。
- (3) レーザ修復によってウエハ表面のアモルファス層が単結晶に構造変化した。また半値幅が約 20% 減少し、結晶性が向上した。

以上より、レーザー照射によって機械研磨後の Si ウエハの平坦化および結晶化を同時に達成できる可能性を示した。

### 参考文献

- 1) T. Doi et al.: Advances in CMP/Polishing Technologies for the Manufacture of Electronic Devices, William Andrew, White Lake, Michigan, (2011) 15-110.
- 2) K. Niitsu et al.: Effects of deep subsurface damages on surface nanostructure formation in laser recovery of grinded single-crystal silicon wafers, *Precis. Eng.*, 62 (2020) 213.
- 3) M. Darif et al.: Numerical Simulation of Si Nanosecond Laser Annealing by COMSOL Multiphysics, COMSOL Conference, (2008).
- 4) M. A. Green et al.: Self-coefficient optical parameters of intrinsic silicon at 300 K including temperature coefficients, *Sol. Energ. Mat. Sol. C*, 92 (2008) 1305.