

問題 1-14 シリコンウェーハの自重応力と熱応力

図 1a の直径 $d=300\text{mm}$ 、厚さ $h=750\mu\text{m}$ の 12 inch (300 mm) 単結晶シリコンウェーハをリング状に支持 (中心から $l\text{mm}$ の位置) して、熱処理することを考える。このシリコンウェーハは、最高 1200°C の温度で熱処理されるが、面内の温度差による熱応力や、自重による曲げ応力によって塑性変形が生じると、表面に作られた半導体素子が転位によって、電氣的に破壊されてしまうため、強度設計が必要である。

単結晶シリコンは、室温では脆性破壊起こすが (引張り強さ 300MPa)、おおむね 500°C 以上になると延性破壊を起こすことがわかっている。降伏応力は温度によって異なり、おおむね $\sigma_Y=4.27\times 10^{-3}\exp(0.7\text{eV}/k_B T)$ [MPa] の式で表されることがわかっている (図 1b 参照)。ただし、 $k_B=8.6173\times 10^{-5}\text{eV/K}$ である。シリコンのヤング率 E は 160GPa 、ポアソン比 ν は 0.26 (厳密には、ヤング率・ポアソン比も温度に依存するが、ここでは無視してよい)、密度は $\rho=2.3828[\text{g}/\text{cm}^3]$ 、線膨張係数 α は 4.0×10^{-6} である。

ただし、実際は、支持している接触部近傍で接触による局所的な応力集中が生じ、接触部近傍のメッシュを細かく切れば切るほど応力値は発散してしまう。ここでは、接触部の曲率半径を大きく取ることによって、応力集中の効果を十分に低減する設計を別途考えることとし、本課題の検討の範囲からは除外せよ。

(1) 最初に自重による応力のみを考える

(1-1) 最外周で支持した場合 ($l=150\text{mm}$) の自重のよる解析を行い、メッシュサイズの評価、オーダーエスティメーション (変位と応力) を行え。ただし、自重を分布荷重 ($p=\rho gh$: g は重力加速度) に置きかえた解析について、円板の材料力学の式との比較を通してオーダーエスティメーションを行うこと。

(1-2) (1-1) の解析結果より、高温での延性破壊の評価を行い、最高プロセス温度を設定せよ。ただし、安全率を 3 と設定せよ。

(1-3) 支持位置 (l) を変更することによって、応力を低減し、プロセス温度を上げることが出来るか、最適な l が存在するかどうか考察せよ。降伏が始まる場所についても応力のラインプロットを用いてチェックせよ。

(1-4) 次世代の半導体ウェーハとして直径 $d=450\text{mm}$ のウェーハが計画されている。最適な位置でウェーハを保持するとして、このウェーハの厚さ h は何 μm 程度が適当か設計せよ。ここでは有限要素法を使う必要はない。

※等分布荷重 p を受ける円板の最大応力と最大たわみ (いずれも円板中心で生じる) は、板厚を t 、半径を R 、ヤング率を E 、ポアソン比を ν とおいて、以下の式であらわされる。

$$\sigma_{\max} = \frac{3(3+\nu)R^2 p}{8t^2}, \quad w_{\max} = \frac{(5+\nu)R^4 p}{64(1+\nu)D} \quad ; D = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)}$$

(2) 次に、熱応力と自重による応力の双方を考える。

シリコンウェーハは図 2 のような、縦型拡散炉の中に入れられ、外部のヒーターによって輻射によって加熱される。その際、中心の温度は端部の温度より低くなるため、面内で温度分布が生じる（厚さ方向には均一）。温度分布は式(1)のような半径 r の二次関数で近似できると仮定出来るとする。端部の温度 T_e が 1200°C、中心 T_c が 1199°C となるケースを考える。 R はウェーハの半径である。

$$T(r) = T_c + (T_e - T_c) \left(\frac{r}{R} \right)^2 \quad \dots\dots\text{式(1)}$$

また、円板の熱応力は式(2)より与えられる（機械工学便覧 α3-61）。

$$\sigma_r = \alpha E \left(\frac{1}{R^2} \int_0^R T(r) r dr - \frac{1}{r^2} \int_0^r T(r) r dr \right)$$
$$\sigma_\theta = \alpha E \left(\frac{1}{R^2} \int_0^R T(r) r dr + \frac{1}{r^2} \int_0^r T(r) r dr - T(r) \right) \quad \dots\dots\text{式(2)}$$

(2-1) ウェーハ内の温度分布と熱応力分布を求めよ（グラフ化せよ）。

(2-2) 最外周で支持する場合 ($l = 150 \text{ mm}$) を考える。自重による応力と熱応力を足し合わせて、ミーゼス相当応力を算出せよ。そして、最もミーゼス相当応力が高い場所をウェーハの上面と下面について求め、その理由を考察せよ。

(2-3) 支持位置 (l) を変更することによって、ミーゼス相当応力を最も低い場所を見つけよ。また、どの位置でミーゼス相当応力が最大になるか？

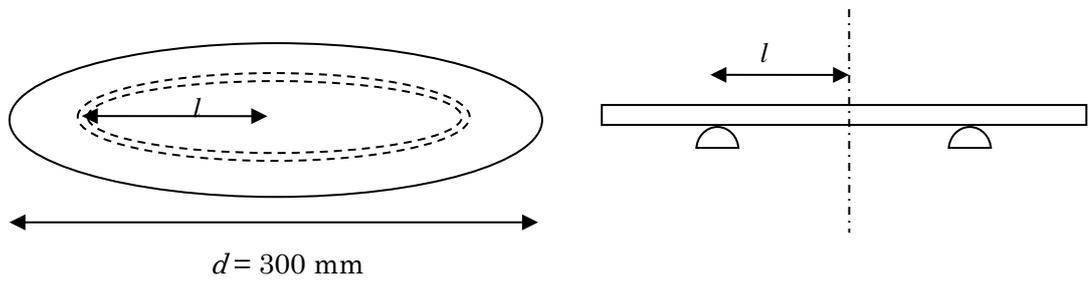


図 1a

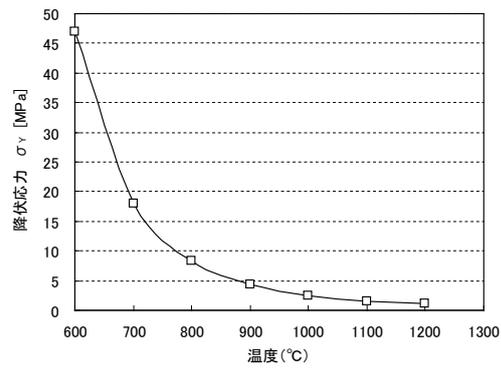


図 1b シリコンの降伏応力の温度依存性

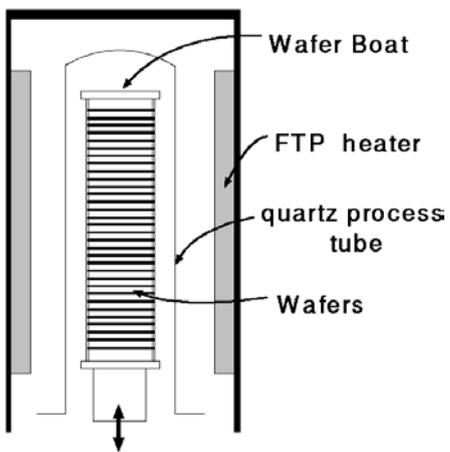


図 2 縦型拡散炉

(略解)

解答)

(1-1)

支持位置 ($l=150\text{mm}$) の場合の結果

たわみは材力 0.0959 mm , FEM 0.0958 mm 、応力は材力 0.856 MPa (積分点値 0.83) , FEM 0.854 MPa となり、材料力学と有限要素法で一致する。

(1-2) 1000°C が限界である。

(1-3) 支持位置の変更

$l=105\text{mm}$ で、 1200°C まで使用可能。この値は、支持位置の外側の重量と内側の重量が等しくなる位置である。

(1-4) h は $9/4$ 倍 (1.6875mm 程度) にする必要がある。

(2-1)

(2-2) 最外周支持

自重による圧縮応力は中心が一番高いが、引張の熱応力でミーゼス相当応力は低下する。端部 (エッジ) は、 $\sigma\theta$ が、自重、熱応力ともに圧縮となり、ミーゼス相当応力は高くなる。中心も端部もほぼ等しい値となる。※下面のほうが応力が高いため、実際には下面から降伏する。

(2-3) $l=105\text{mm}$ で支持した場合。

下面は中心とエッジの応力がほぼ等しくなる。中心で 0.34MPa

上面は支持部とエッジの応力がほぼ等しくなる。支持部で 0.325MPa

※下面、上面、エッジ、支持部、中心、すべてで応力値がバランスして小さくなっている。