

理論第3問

ウェハー製作

ウェハー製作はシリコンからの半導体チップの生産に関連している。現代技術では 20 以上の過程があるが、薄いフィルムが付着に限って考えてみよう。

ウェハー製作の過程において、いろいろな物質の薄いフィルムがシリコン・ウェハーの表面に付着する。付着過程の前、基盤表面は非常にきれいであるとする。酸素や他の元素の存在により汚染層が形成される。汚染層形成の割合は、基盤表面への気体分子衝突の割合で決まる。単位体積あたりの分子数を n とすると、基盤の単位面積あたりに衝突する気体分子の衝突の割合(単位時間あたりの衝突数)は、

$$J = \frac{1}{4} n \bar{v} \quad \dots \textcircled{1}$$

で与えられる。ここで、 \bar{v} は、気体分子の平均の速さである。

(a) 気体分子が v と $v + dv$ の間の速さをもつ割合(確率)を $W(v)dv$ と書くと、それはマクスウェル・ボルツマン分布、

$$W(v) = 4\pi \left(\frac{M}{2\pi RT} \right)^{3/2} v^2 e^{-\frac{Mv^2}{2RT}}$$

にしたがうとする。ここで、 M は気体 1 モルの質量、 T は気体の絶対温度、 R は気体定数である。このとき、気体分子の平均の速さは、

$$\bar{v} = \int_0^{\infty} v W(v) dv = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}}$$

で与えられることを示せ。

(b) 圧力が低いとき、気体は理想気体とみなされるとして、気体分子の衝突の割合が、

$$J = \frac{P}{\sqrt{2\pi mkT}}$$

と表されることを示せ。ここで、 P は気体の圧力、 m は分子の質量、 k はボルツマン定数である。

(c) 真空における酸素の残余圧力を 133 Pa, 酸素気体を近似的に半径 3.6×10^{-10} m の球形として、300 °Cにおいて表面に酸素の 1 分子層を形成するのにどれだけの時間がかかるか概算せよ。その際、シリコン・ウェハー表面に衝突する酸素分子はすべて付着するとし、また、酸素分子は層状に並んで張り付くとする。

(d) 実際には酸素分子のすべてがシリコンと反応するわけではない。モデル化するには、反応分子は、反応前の活性化エネルギーより大きなエネルギーをもつ必要があることを考慮に入れねばならない。物理的には、この活性化エネルギーによって、シリコンと酸素分子間の新たな化学結合が作られる前に、シリコン原子間の結合が壊されるということを示している。反応に対する活性化エネルギーを 1eV として、再び、前問(c)の温度で酸素分子の 1 層が形成されるのにかかる時間を概算せよ。問(a)のように、気体の酸素分子にマクスウェル分布(図 1)を仮定し、単位面積あたりで考えよ。

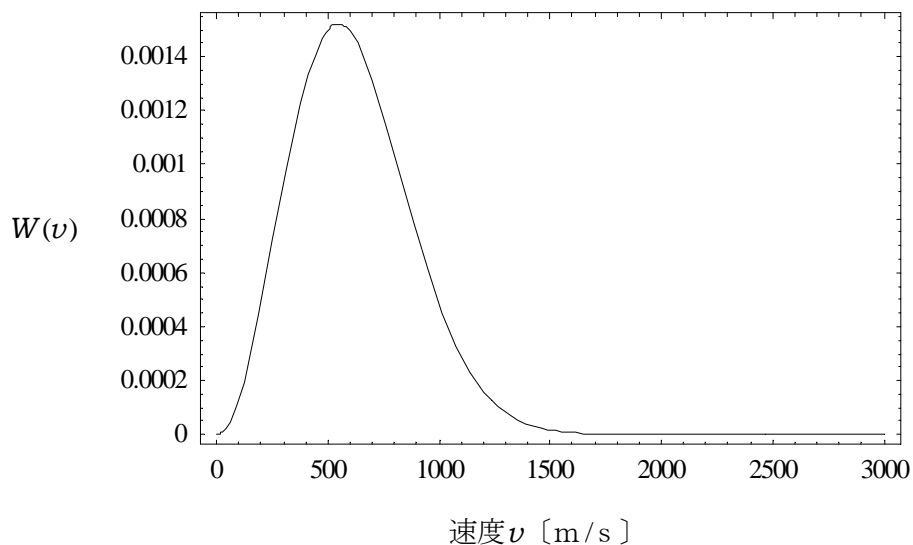


図1

- (e) 石版(リトグラフ)製作の過程で, シリコン・ウェハは, 屈折率 $\mu=1.40$ の1層の透明ポリマー(フォト・レジスト)で一様にコーティングされる。このフォト・レジストの厚さを測定するために, ウェハに波長 $\lambda=589\text{nm}$ の平行な単色光を照射する。コーティング層に垂直入射させるとき, フォト・レジストのある最小の厚さ d で反射光の打ち消し合いが起こる。このとき, d , μ と λ の間に成り立つ関係式を求めよ。また, 与えられたデータを用いて d を計算せよ。ここで, シリコンの屈折率は1.40より大きいとし, 多重反射は無視せよ。

以下のデータが与えられる: 酸素1モルの質量は, 32g/mol

ボルツマン定数は, $k=1.38\times 10^{-23}\text{J/K}$

アボガドロ数は, $N_A=6.02\times 10^{23}\text{1/mol}$

積分公式:
$$\int x^3 e^{-kx^2} dx = -\frac{1}{2} e^{-kx^2} \left(\frac{1}{k^2} + \frac{x^2}{k} \right)$$

理論第3問 【解答】

ウェハー製作

(a) マクスウェル分布の確率密度関数 $W(v) = 4\pi \left(\frac{M}{2\pi RT}\right)^{3/2} v^2 e^{-\frac{Mv^2}{2RT}}$ より,

$$\begin{aligned} \bar{v} &= \int_0^{\infty} v W(v) dv = \int_0^{\infty} 4\pi \left(\frac{M}{2\pi RT}\right)^{3/2} v^3 e^{-\frac{Mv^2}{2RT}} dv \\ &= 4\pi \left(\frac{M}{2\pi RT}\right)^{3/2} \int_0^{\infty} v^3 e^{-\frac{M}{2RT}v^2} dv = 4\pi \left(\frac{M}{2\pi RT}\right)^{3/2} \cdot \frac{4R^2 T^2}{2M^2} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}} \end{aligned}$$

(b) 圧力 P , 体積 V , 温度 T の理想気体の全分子数を N とすると, 状態方程式

$$PV = \frac{N}{N_A} RT = NkT \text{ より, 単位体積あたりの気体分子数 } n \text{ は,}$$

$$n = \frac{N}{V} = \frac{P}{kT}$$

衝突の割合 J は, ①式を用いて,

$$J = \frac{1}{4} n \bar{v} = \frac{1}{4} \frac{P}{kT} \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}} = P \sqrt{\frac{8RT}{16\pi k^2 T^2 M}} = \frac{P}{\sqrt{2\pi mkT}}$$

ここで, $R = N_A k$, $M = N_A m$ を用いた。

(c) 酸素分子が密に詰まるとして, 面積 $(2r)^2 \text{ m}^2$ あたり 1 個の分子が付着するから, 単位面積に付着する分子数 n_1 は,

$$n_1 = \frac{1}{4 \times (3.6 \times 10^{-10})^2} = 1.9 \times 10^{18} \text{ 1/m}^2$$

$T = 273 + 300 = 573 \text{ K}$, $P = 133 \text{ Pa}$ において, 単位面積あたり酸素分子が単位時間に衝突する回数すなわち付着する分子数 J は,

$$\begin{aligned} J &= \frac{P}{\sqrt{2\pi mkT}} \\ &= \frac{133}{\sqrt{2\pi \times \frac{32 \times 10^{-3}}{6.02 \times 10^{23}} \times 1.38 \times 10^{-23} \times 573}} = 2.6 \times 10^{24} \text{ 1/(m}^2 \cdot \text{s)} \end{aligned}$$

よって, 付着に要する時間 T_1 は,

$$T_1 = \frac{n_1}{J} = \underline{0.7 \times 10^{-6} \text{ s}} = \underline{0.7 \mu\text{s}}$$

この付着時間は, 実際の過程に比べて短すぎる。

(d) 活性化エネルギー 1 eV をもつ酸素分子の速さ v_1 は,

$$\frac{1}{2}mv_1^2 = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J} \quad \therefore \quad v_1 = \sqrt{\frac{2 \times 1.6 \times 10^{-19}}{32 \times 10^{-3} / 6.02 \times 10^{23}}} = 2454 \text{ m/s}$$

温度が $T = 573 \text{ K}$ のとき、速さ $v = 2454$, $2454 + 500$, $2454 + 1000 \text{ m/s}$ をもつ酸素分子の割り合い(確率密度)は、密度関数 $W(v)$ を用いて、

$v = 2454 \text{ m/s}$ のとき、

$$W(2454) = 4\pi \left(\frac{32 \times 10^{-3}}{2\pi \times 6.02 \times 10^{23} \times 1.38 \times 10^{-23} \times 573} \right)^{3/2} \times 2454^2 \\ \times \exp \left[-\frac{32 \times 10^{-3} \times 2454^2}{2 \times 6.02 \times 10^{23} \times 1.38 \times 10^{-23} \times 573} \right] = 1.356 \times 10^{-10}$$

$v = 2954 \text{ m/s}$ のとき、 $W(2954) = 2.219 \times 10^{-14}$

$v = 3454 \text{ m/s}$ のとき、 $W(3454) = 6.383 \times 10^{-19}$

これらの値より台形公式を用いて近似すると、 $v = 2454 \text{ m/s}$ 以上の速さをもつ酸素分子の割合 f は、

$$f = \frac{500}{2} \{ 1.356 \times 10^{-10} + 2 \times 2.219 \times 10^{-14} + 6.383 \times 10^{-19} \} = 3.39 \times 10^{-8}$$

よって、求める付着時間 T_2 は、

$$T_2 = \frac{T_1}{f} = \frac{0.7 \times 10^{-6}}{3.39 \times 10^{-8}} = 20.6 \text{ s} \doteq \underline{\underline{2 \times 10 \text{ s}}}$$

(e) コーティング層表面およびシリコン表面での光の反射(屈折率の小さい物質から大きい物質へ入射するときの反射)では、共に位相は変化しない。反射光が打ち消しあう最小の

コーティング層の厚さ d は(図 a)、層内の光の波長 $\lambda' = \frac{\lambda}{\mu}$ を用いて、

$$2d = \frac{\lambda'}{2} \quad \therefore \quad d = \frac{\lambda}{4\mu} = \frac{589}{4 \times 1.40} = \underline{\underline{105 \text{ nm}}}$$

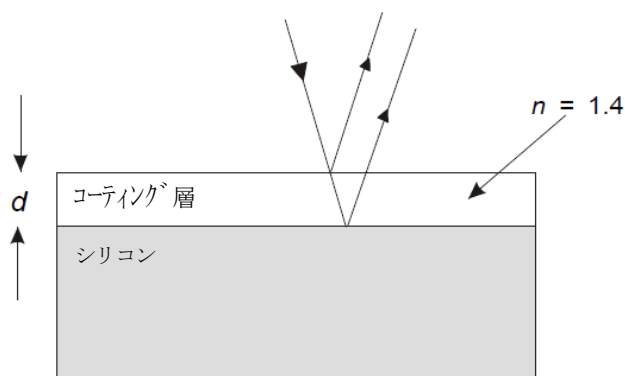


図 a

【参考】 ①式の導出

基盤表面にはいろいろな方向から分子が飛び込む。いま、法線と角 θ と $\theta + \Delta\theta$ の間の方
向から基盤の単位面積あたりに飛び込む分子数 ΔJ は、角 θ と $\theta + \Delta\theta$ の間の方
向の速度をもつ単位体積あたりの分子数を Δn として、底面積
 $\cos \theta$ 、長さ \bar{v} の直方体(体積 $\bar{v} \cos \theta$)内の、法線と角
 θ と $\theta + \Delta\theta$ の間の方
向の速度をもつ分子数
 $\Delta n \cdot \bar{v} \cos \theta$ に等しい(図 b)。分子数 Δn の、あらゆる
方向の速度をもつ単位体積中の全分子 n に対す
る割合 $\frac{\Delta n}{n}$ は、単位長さを半径とする球面上で、球

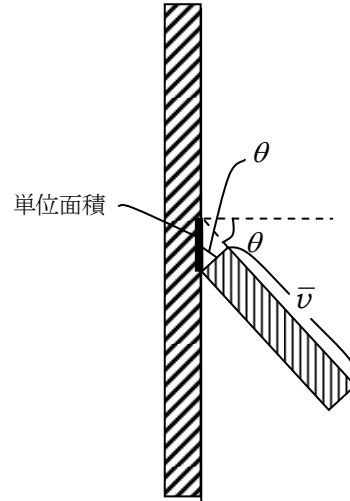


図 b

面の全表面積 4π に対する角 θ と $\theta + \Delta\theta$ で挟まれた
帯状表面の面積(図 c の影を付けた部分)の割合に等
しい。帯状領域の周の長さは $2\pi \sin \theta$ であるから、
その割合は、

$$\frac{\Delta n}{n} = \frac{2\pi \sin \theta \Delta\theta}{4\pi}$$

と書ける。したがって、基盤の単位面積あたり単位
時間に、右側から衝突する分子数 J は、 θ に関して

$0 \sim \frac{\pi}{2}$ の範囲で和をとって(積分して)、

$$\begin{aligned} J &= \sum \Delta J = \sum \Delta n \cdot \bar{v} \cos \theta = \sum n \bar{v} \cos \theta \cdot \frac{\Delta n}{n} \\ &= n \bar{v} \frac{1}{4\pi} \int_0^{\pi/2} 2\pi \cos \theta \sin \theta d\theta = \frac{1}{4} n \bar{v} \end{aligned} \quad \dots \textcircled{1}$$

と表される。

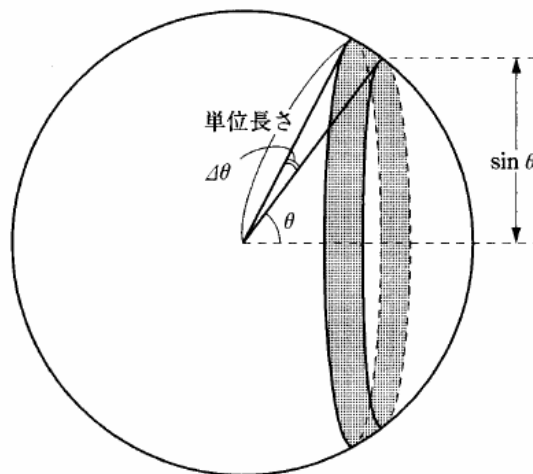


図 c