常温低圧ガスによる固体冷却に関する研究 (第1報)*

—伝熱特性評価装置の開発と装置性能評価—

高橋聡志** 宇田川真介*** 前野一夫† 豊田和弘† 平柳德行†† 白濱一郎†††

Study on Solid Cooling by Low-pressure Gas of Normal Temperature (1st report)

- Development of Evaluation Apparatus on Heat Transfer Characteristics and its Performance Estimation -

Satoshi TAKAHASHI, Shinsuke UDAGAWA, Kazuo MAENO, Kazuhiro TOYODA,
Noriyuki HIRAYANAGI and Ichiro SHIRAHAMA

The evaluation apparatus on heat transfer characteristic for low-pressure gas of normal temperature is developed with the object of improving in the numerical prediction accuracy for thermal deformation of the silicon wafer caused during exposure, and constructing of the novel wafer chuck systems with cooling effect by such gas condition in the Next-Generation Lithography exposure tools. As the first phase, the heat transfer characteristics between low-pressure helium gas and aluminum disc, which is well known as a vacuum equipment material, are evaluated using this apparatus. The heat transfer coefficients of low-pressure helium gas are obtained as by curve fitting for experimental data using finite element analysis. These obtained heat transfer coefficients show good agreement with theoretical data, except high-pressure condition corresponding to the bending of aluminum disc. The cooling effect of low-pressure helium gas on the silicon wafer is confirmed using developed apparatus.

Key words : heat transfer, low gas pressure, finite element method, wafer heating, next-generation lithography, Knudsen number

1. 緒 言

半導体デバイスの高集積化に伴い、次世代リソグラフィ技術は45nmルール以降の微細加工に対応し、その露光装置の候補としてElectron Projection Lithography (EPL)やExtreme Ultra Violet Lithography (EUVL)が挙げられている¹⁾。45nmルール以降の微細加工を達成するためには、それを妨げる様々な誤差要因を厳密にコントロールする必要がある。その誤差要因の一つに、吸収される露光エネルギーによって生じるシリコンウェハの非定常な熱変形がある。ウェハの露光中におけるこの熱変形は、転写パターンの位置ずれや像ボケの直接的な原因となるため、有限要素法(FEM)を用いた熱変形量に対する予測研究が行われており、その予測精度向上のための解析技術が種々提案されている^{2)~5)}。同時に、熱変形量そのものを低減させる冷却手法の研究は、装置性能を向上させる上で重要である。次世代露光装置のEPLやEUVLは真空環境下で使用されるため、大気環境下で使用する現行の露光装置(KrFまたはArFエキシマレーザを光源とする露光装置)のように、前提として与えられるウェハと周囲気体間の対流による熱移動がないため熱放射が第一義的な熱移動形態となる。そこで、ウェハ冷却方法の一つとしてウェハを保持するチャックの伝熱特性向上が考えられている。チャック材料やウェハチャック間の接触面積拡大等のチャック自身が持つ伝熱特性向上に加えて、ウェハ裏面とチャック間に低圧ガス(ヘリウムまたは窒素等)導入による冷

却方法が有力視されている⁶⁾。

一方、Laudonら⁷⁾は、X線露光用マスクのプラズマエッチング工程で生じるメンブレン応力の均一化と吸収体応力を低減するために、低圧ヘリウムガスを使用した冷却システムを採用し、プラズマ環境下(約240℃)での窒化シリコンメンブレンとヘリウムガス間の伝熱特性を詳細に調べている(ヘリウムガス圧力:約133Pa,ヘリウムガス温度:約-16℃,ガス流入ギャップ長さ:1mm)。Laudonらの報告によれば、低圧ヘリウムガスの静止・流動状態による冷却効果の違いが示されているが、各実験状態によってヘリウムガス圧力が異なるため純粋に静止・流動状態の違いの評価とはなっていない。また、半導体デバイス製造プロセスの一つであるシリコンウェハのドライエッチング工程では、低圧ヘリウムガスによる冷却方法が既に採用されており⁸⁾、Smithによってその伝熱特性が議論されている⁹⁾。しかし、リソグラフィ工程における露光中のウェハ温度はほぼ常温付近であり、この環境下での低圧ガスによる冷却効果と伝熱特性の詳細な検討はなされていない。

著者らは、次世代露光装置の露光中におけるウェハの非定常な熱変形量予測技術の開発を進めている⁵⁾。また、有力視されている低圧ガスによるウェハ冷却効果の検証やその熱伝達特性を把握し、露光装置用チャックシステムの構築及びウェハ熱変形量の予測精度向上を目指している。その第一段階として、常温低圧ガスの静止・流動状態における伝熱特性が評価可能でかつ実際のチャックシステムを想定した装置を開発した。本報では、まず開発した装置の性能評価を行うために、真空装置材料として多用されるアルミニウムを用いて低圧ヘリウムガスとの間の伝熱特性を調べた。得られた伝熱データをFEMによる解析結果と比較し、伝熱特性として熱伝達係数を算出した。また、実際にシリコンウェハを用い低圧ヘリウムガスによるウェハの冷却効果を確認した。

* 原稿受付 平成16年10月5日

** 正会員 (株)ニコン (東京都品川区西大井3-6-1)

*** 千葉大学自然科学研究科 (千葉県千葉市稲毛区弥生町1-33)

† 千葉大学工学部 (千葉県千葉市稲毛区弥生町1-33)

†† (株)ニコン (埼玉県熊谷市大字御稜威ヶ原201-9)

††† (株)レヨー工業 (東京都府中市清水が丘1-9-24)

2. ガス分子による伝熱特性

定常状態における平行二平面間にガスが満たされた場合の伝熱量 q は、ニュートンの冷却の法則から、

$$q = hA(T_2 - T_1) \quad (1)$$

と表される。ここで、 h は熱伝達係数、 A は二平面間での伝熱面積、 T_1 、 T_2 はそれぞれ二平面温度 (ただし、 $T_2 > T_1$) である。熱伝達係数 h はガスの伝熱特性を表し、ガス分子の平均自由行程 λ と二平面間距離 (ギャップ長 d) によって、以下1) ~ 3) の様に分類される^{10)~12)}。なお、平均自由行程 λ はガス分子がマクスウェルの速度分布をもつ時、

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2}n\delta^2} \quad (2)$$

であり、 n は数密度、 δ は分子直径である。また、 n は、ボルツマン定数 κ 、ガスの絶対温度 T_g 、ガス圧力 p とした時、 $n = p / (\kappa T_g)$ の関係がある。

1) 高いガス圧力 ($\lambda \ll d$) の場合

$$h_1 = \frac{k}{d} \quad (3)$$

$$k = \frac{9\gamma - 5}{4} \eta C_v$$

2) 低いガス圧力 ($\lambda \sim d$) の場合

$$h_2 = \frac{k}{d + 2g} \quad (4)$$

$$g = \frac{2 - \alpha}{\alpha} \cdot \frac{2\varepsilon}{\gamma + 1} \cdot \lambda$$

$$\varepsilon = \frac{9\gamma - 5}{4}$$

3) 非常に低いガス圧力 ($\lambda > d$) の場合

$$h_3 = \alpha \Lambda_0 p \sqrt{\frac{273.2}{T}} \quad (5)$$

$$\Lambda_0 = \frac{1}{2} \left(\frac{\gamma + 1}{\gamma - 1} \right) \sqrt{\frac{R_0}{2\pi}} \frac{1}{\sqrt{273.2M}}$$

ここで、 γ は比熱比 (定圧比熱/定容比熱 = C_p/C_v)、 η は粘性係数、 Λ_0 は絶対温度 273.2K における自由分子伝導度であり、 R_0 は気体定数、 M は気体分子量、 p はガス圧力である。 α は熱的適応係数と呼ばれ、各平面において α_1 、 α_2 とすれば、

$$\alpha = \frac{\alpha_1 \alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2 - \alpha_1 \alpha_2} \quad (6)$$

となる。一般にガス圧力が低い場合、固体表面温度とガス分子温度に不連続性 (温度飛躍) が生じるが、その不連続性を考察し、ガス分子が固体表面に衝突する際のエネルギー授受の程度を示す係数として、熱的適応係数 α が Knudsen により導入された。熱的適応係数 α は、ガス種、固体材質とその表面状態によって異なる値をとる事が実験により知られており、 $0 \leq \alpha \leq 1$ である。式 (1) ~ (6) より熱伝達係数 h は、 $\lambda \ll d$ の場合ガス分子同士の衝突が支配的となり、ギャップ長 d に依存しガス圧力 p に依存しない。一方、 $\lambda > d$ の場合は、自由分子流の領域で分子間衝突が無視され固体壁面との衝突が支配的となり、ギャップ長 d には依存せずガス圧力 p に依存する。中間の $\lambda \sim d$ の場合は、ギャップ長 d 及びガス圧力 p 双方に対して依存性を示すことがわかる。

3. 実験装置と方法

3.1 実験装置

Fig.1 Cross-sectional schematic diagram of gas cooling apparatus

本研究では、次世代露光装置のウェハチャックシステムを想定し、主に低いガス圧力の領域 ($\lambda \sim d$) の伝熱特性が評価可能な実験装置を開発した。図1に、その概略図を示す。式 (4) で定義される伝熱特性 (熱伝達係数 h_2) を決定するパラメータは、ガス種、ガス圧力、固体材質、ギャップ長であり、これらのパラメータを変更可能な装置とした。固体材質の変更は、試料となる $\phi 100\text{mm}$ ディスクを Pyrex[®] リングに紫外線硬化型樹脂で接着したものを製作し、それを交換する事で可能とする。ガス圧力は、給気側 (inlet) に設置したマスフローコントローラ (MFC) によって調整、設定する。また、給気側と排気側 (outlet) に対し意図的に圧力差をつける事で、ガスの静止と流動状態を作り出し、その流量を MFC で計測した。本装置におけるギャップ長 d は、試料ディスクと冷却プレート (アルミ製) 間の距離となるが、試料ディスクを接着した Pyrex[®] リングと冷却プレート間に設置するスペーサを交換することでギャップ長を変更可能としている。また、ガス導入加圧時のディスクの撓みによるギャップ長変位は、冷却プレートに内蔵した二つの静電容量型非接触変位センサ (試料ディスク中心から径方向に 11mm 及び 30mm に設置) によってモニタ可能である。熱源は波長 365nm の UV 光を用い試料ディスク上面から照射、試料ディスク裏面と冷却プレート上面との間に低圧ガスを流すことで冷却する。その際、試料ディスク上面、冷却プレート上面及び Pyrex[®] リング側面に取り付けた温度センサ (RTD: 白金測温抵抗体、クラス 1/3B, 三導線式) によって温度変化を測定した。アルミ製冷却プレートは、温調された液体冷媒によって温度コントロールされ、本装置は真空チャンバ内 (圧力 $1.3\text{E}-2\text{Pa}$ 以下) に設置される。

3.2 実験方法と条件

装置の基本性能を把握するため、導入ガスはヘリウム、ディスク材質は冷却プレートと同じアルミとし、表面状態を同じにするため共にラップ仕上げとした。設定したギャップ内ガス圧力 p_g は、0, 133, 399, 665Pa、ギャップ長 d は、200, 900 μm である。また、周囲環境と冷却プレートは 296.2K に温調している。上記ヘリウムガス圧力及びギャップ長におけるクヌードセン数 ($\text{Kn} = \lambda/d$) は、式 (2) から求めた λ から (但し、ボルツマン定数 $\kappa = 1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$ 、ヘリウムガス温度 $T_g = 296.2\text{K}$ 、ヘリウム分子直径 $\delta = 2.2 \times 10^{-10} \text{m}$)、 $\text{Kn} = 0.03 \sim 0.71$ の範囲となり、連続流 ($\text{Kn} < 0.01$) と分子流 ($\text{Kn} > 10$) の中間的流れに相当する。

同じギャップ内圧力で、静止・流動状態における伝熱特性を

Table 1 Experimental data of flowing helium cases

		p_s Pa		
		133	399	665
$d=200 \mu\text{m}$	Δp Pa	159.6	399.0	665.0
	Q_c Pa·m ³ /s	4.9E-3	3.0E-2	8.2E-2
	Q_s/Q_d %	15	7	3
$d=900 \mu\text{m}$	Δp Pa	133.0	359.1	558.6
	Q_c Pa·m ³ /s	4.6E-3	3.6E-2	9.3E-2
	Q_s/Q_d %	14	6	4

 Fig.2 Relation between C_d and p_m for each gap length and several helium gas pressures

比較するために、非接触変位センサから出力されるアルミディスクのギャップ長変位 Δd をモニタしながら給気側と排気側の圧力差 ($\Delta p = p_{in} - p_{out}$) を調整した。加わるガス圧力によって生じるギャップ長変位 Δd が静止・流動状態共に同じで、真空チャンバ内圧力が一定の時、設定したギャップ内圧力は等しいと考えられる。本実験において設定した流動条件を、得られた実験データから以下に示す。表 1 に、流動状態における各設定圧力 p_s 、ギャップ長 d での補正流量 Q_c ($=Q_d[\text{流動状態流量}] - Q_s[\text{静止状態流量}]$)、給排気圧力差 Δp 及び Q_d に対する Q_s の比 (Q_s/Q_d) の実験値を示した。また、給排気平均圧力 p_m ($= (p_{in} + p_{out})/2$) と式 (7) から求めたコンダクタンス C_d の関係を図 2 に示した。図 2 からコンダクタンス C_d は、中間流 ($0.01 < Kn < 10$) にみられる平均圧力 p_m に対する依存性があり、また同じ設定圧力 p_s では、ギャップ長 d が長いほど C_d が大きくなっていることがわかる。

$$C_d = \frac{Q_c}{\Delta p} \quad (7)$$

ここで、各設定圧力 p_s (静止または流動状態) によって生じるギャップ長変位の実験値 Δd と、式 (8)¹³⁾ で表される円板の軸対称曲げの撓み w の理論値を比較し、図 3 に示した。

$$w = \frac{pa^4}{64D} \left(1 - \frac{r^2}{a^2} \right)^2 \quad (8)$$

$$D = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)}$$

式 (8) は円板周辺を完全固定、圧力 p は等分布荷重を仮定しており図 3 では設定圧力 p_s に相当する。ここで、 a は固定端までの円板半径、 r は円板中心を原点とした半径方向座標、 D は板の曲げ剛さを表し、 E はヤング率、 t は板厚、 ν はポアソン比である。使用したアルミディスクは、 $a=40\text{mm}$ 、 $E=69.6\text{GPa}$ 、 $t=500 \mu\text{m}$ 、 $\nu=0.36$ である。図 3 から実験値と理論値は良い一致を示している。これは、設定した実験条件 (表 1) によるギャップ内圧力が静止・流動状態共にほぼ同じであり、さらに等分布荷重に近い圧力分布となっている事を示している。この時の真空チャンバ内圧力は一定である。

 Fig.3 Relation between Δd (Theoretical data: w) and p_s at each position of radial direction

 Fig.4 Schematic of RTD sensors arrangement and $18 \times 18\text{mm}$ irradiation area on $\phi 100\text{mm}$ disc

試料ディスクに対する UV 光照射領域と RTD の配置を図 4 に示す。なお、UV 光吸収熱量は、各々の UV 光垂直入射反射率を実測し算出している¹⁴⁾。アルミディスクの吸収熱量は図 4 の照射領域において 738.6W/m^2 、それ以外の領域で真空チャンバ壁等の反射光によるものが 1.6W/m^2 、同様にシリコンウェハは 848.1W/m^2 、 0.7W/m^2 である。UV 光の照射時間は 600sec とし、その後自然放冷している。

4. 有限要素 (FE) モデル及び解析条件

実験から得られる温度データから低圧ヘリウムガスの伝熱特性 (熱伝達係数: h) を算出するために、図 5 に示した非定常熱伝導 FE モデルを作成した。実験装置の対称性を考慮して、 $1/4$ モデルとしている。モデル化されたアルミディスク、Pyrex[®] リング、アルミ製冷却プレートは、全て 3 次元の 8 節点ソリッド要素を使用し、解析には I-DEAS TMG Thermal Analysis (カナダ MAYA Heat Transfer Technologies 社製) を用いた。各物性値を表 2 に示す。

Fig.5 Transient thermal FE model (quarter model)

Table 2 Material properties for FE analysis

	Density ρ kg/m ³	Thermal conductivity k , W/(m·K)	Specific heat C_p , J/(kg·K)
Aluminum disc	2680	138	921
Pyrex ring	2230	1	730
Aluminum cooling plate	2720	172	921

Fig.6 Experimental temperature variations of aluminum disc for several helium gas pressures on the static condition

与えた境界条件として、アルミディスク上面は周囲環境に対する熱放射条件、アルミディスク下面と冷却プレート間にはギャップ内ヘリウム圧力 $p_s=0$ の時は熱放射のみ、ガス導入時 ($p>0$) は熱放射及び熱伝達条件を課した。熱放射条件は (9) 式で表される平行二平面間の熱放射伝達係数として与えた。

$$h_4 = \frac{\sigma(T_2^2 + T_1^2)(T_2 + T_1)}{1/\epsilon_1 + 1/\epsilon_2 - 1} \quad (9)$$

ここで、 σ はステファン・ボルツマン定数で $\sigma = 5.669 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 、アルミディスクと冷却プレートの熱放射率は共に $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 0.03$ とした。また、ガスによる熱伝達条件は一様に課している。本来なら、実験条件として低いガス圧力 ($\lambda \sim d$) を設定しているため、図 3 に示したガス圧力によるアルミディスクのギャップ長変位 (Δd) を考慮した非一様の熱伝達条件を課すべきであるが、本解析では考慮していない。周囲環境及び冷却プレート下面は実験条件を想定して絶対温度 296.2K で固定とし、FE モデルの対称面およびその他境界は断熱条件とした。

5. 実験結果と解析結果

図 6 に、アルミディスクを使用した温度上昇測定実験の結果の例を示す。この場合の実験条件は、ギャップ長 $d=200 \mu\text{m}$ 、ギャップ内ヘリウムガス設定圧力 $p_s=0, 133, 399, 699 \text{ Pa}$ の静止状態で、アルミディスク表面 $r=15 \text{ mm}$ における 3 つの温度測定位置のデータを全て示している。設置した 3 つの各センサの温度上昇値 ΔT は、各 p_s において各々良く一致しており、装置の熱的な軸対称性が確認できる。ギャップ内圧力が高くなるに従い ΔT は小さくなり、 $p_s=399 \text{ Pa}$ と 655 Pa における ΔT に差はみられない。また、本実験条件では、 $p_s=133 \text{ Pa}$ 以上で 400sec 以降ほぼ一定の温度上昇となっているため定常状態に達していると考えられる。

図 7 に、各ギャップ長 (d) における静止・流動状態における最大上昇温度 ΔT_{max} (UV 照射時間 600sec 後の ΔT の平均値) と設定圧力 (p_s) との関係を示した。各ギャップ長における静止・流動状態における ΔT_{max} に差はほとんどみられない。これは、本実験で設定したガス条件 ($0.03 < \text{Kn} < 0.71$) では連続流領域 ($\text{Kn} < 0.01$) には達していない事、ヘリウムガス分子の速度に比

Fig.7 Relation between maximum value of ΔT and p_s at each gap length and flowing conditions of helium gas

較して MFC によって計測されたマクロなギャップ内ガス流速が十分小さい事、を表していると考えられる。一方、ギャップ長が短いほど ΔT_{max} が小さくなる傾向がみられ、(4) 式で表されるギャップ長に依存した伝熱特性が得られている。

FE 解析において、ギャップ内ヘリウムガス導入時の熱伝達係数 (h) 及びアルミディスクと Pyrex[®]リング間の接着層による熱抵抗は未知である。そこで、まず接着層の熱抵抗をギャップ内設定圧力 $p_s=0$ の温度上昇 (ΔT) 実験結果に対し FE 解析によってカーブフィッティングした結果を図 8 に示した。 $p_s=0$ におけるアルミディスク各測定位置と Pyrex[®]リングの温度上昇値 ΔT の実験結果と FE 解析結果は良い一致がみられ、この時の接着層の接触熱伝達係数は $400 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ であった。この得られた接着層の接触熱伝達係数を用い、同様にして各ヘリウムガス設定圧力における熱伝達係数 (h) をカーブフィッティングして求めた例を図 9 に示した。この場合の実験条件は、ギャップ長 $d=200 \mu\text{m}$ 、ギャップ内設定ガス圧力 $p_s=0, 133, 399, 699 \text{ Pa}$ の静止・流動状態で、温度測定位置はアルミディスク表面 $r=15 \text{ mm}$ である。

Fig.8 Curve fitting for experimental temperature rise values using FE analysis for $p_s=0$

Fig.9 Curve fitting for experimental temperature rise values using FE analysis for various pressure and flowing conditions of helium gas

Fig.10 Relation between gas heat transfer coefficient and aluminum disc-cooling plate gap for various gas pressure of helium

ギャップ長 $d=900 \mu\text{m}$ においても同様にしてヘリウムガスの熱伝達係数を算出した。得られた結果を各ギャップ長及びギャップ内圧力における熱適応係数 $\alpha=0.3$ の理論値 (式 (3) ~ (5)) と比較し、図 10 に示す。設定ガス圧力 $p_s=133, 399\text{Pa}$ では良い一致がみられるが、 $p_s=665\text{Pa}$ では差がみられる。この不一致の主な原因として、設定したギャップ長に加え高圧になればなる程、試料ディスクの変形によって大きくなるギャップ長変位が理論値では考慮されていないことが考えられる。

本報で開発した装置を使用して、 $\phi 100\text{mm}$ (4インチ) シリコンウェハに対し、アルミディスクと同様の温度上昇測定実験を行った結果の例を図 11 に示している。この場合の実験条件は、ギャップ長 (d) $200 \mu\text{m}$ 、ギャップ内ヘリウムガスは静止状態で、温度測定位置は $r=15\text{mm}$ である。温度上昇値 (ΔT) はアルミディスクより大きく顕著となるが、アルミディスク同様ギャップ内設定圧力が高くなる程 ΔT は小さくなり、この図よりシリコンウェハの常温付近での低圧ヘリウムガスによる冷却効果を確認することができる。

6. 結 言

本報では、次世代露光装置に搭載が有力視されている常温低圧ガスによるシリコンウェハ冷却チャックシステム構築及び露光中のウェハ熱変形の予測精度向上を目指し、常温低圧ヘリウムガスの伝熱特性が評価可能な装置を開発した。その第一段階として、開発した装置の性能評価を行うために常温低圧ヘリウムガスと真空装置で多用されるアルミニウム間の伝熱特性を明らかにする手法を確立した。また、本装置を用いてシリコンウェハの常温低圧ヘリウムガスによる冷却効果を確認した。得られた結果を以下に示す。

- (1) 開発した装置により、同じヘリウムガス圧力でガス静止・流動状態における伝熱特性の違いを評価可能であることを確認した。本報で設定した実験条件 ($0.03 < \text{Kn} < 0.71$) では、ガス静止・流動状態での低圧ヘリウムガスによる伝熱特性の違いはみられなかった。
- (2) 得られた温度上昇実験データから、各ヘリウムガス圧力における熱伝達係数を有限要素 (FE) 解析を用いカーブフィッティングにより求めた。ギャップ内設定圧力が 399Pa 以下の領域では、熱適応係数 $\alpha=0.3$ における理論値と良く一致した。一方、 665Pa 以上の高い領域では、試料ディスクの変形が主

Fig.11 Experimental temperature variations of silicon wafer for several helium gas pressures on static condition

な原因と考えられる理論値との差がみられた。

- (3) 本報で開発した装置を使用し、常温低圧ヘリウムガスによるシリコンウェハの冷却効果を確認した。

謝 辞

本研究を進めるに当たり、株式会社ニコンの宮崎将哉氏、三木裕一朗氏、木村聡氏、佐々木健至氏には有限要素解析を行う上で助言、協力を頂いた。また、セテック株式会社の井村昭氏には実験装置改良にあたり貴重な助言を頂いた。ここに感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) International Technology Roadmap for Semiconductors 2003 Edition, organized by International SEMATECH.
- 2) B.Kim, R.L.Engelstad, E.G.Lovell, S.T.Stanton, J.A.Liddle, G.M.Gallatin: Finite element analysis of SCALPEL wafer heating, J. Vac. Sci. Technol. B Nov/Dec 1999, 17, 6 (1999) 2883.
- 3) J.Chang, C.J.Martine, R.L.Engelstad, E.G.Lovell: Thermomechanical global response of the EUVL wafer during exposure, Proceedings of SPIE Emerging Lithographic Technology VI 2002, 4688 (2002) 755.
- 4) J.Chang, R.L.Engelstad, E.G.Lovell: Comparison of EUV and optical device wafer heating, Proceedings of SPIE Emerging Lithographic Technology VII 2003, 5037 (2003) 690.
- 5) S.Takahashi, Y.Miki, K.Morita, N.Hirayanagi, T.Fujiwara, M.Tateishi, K.Maeno: Thermal and mechanical FEA (Finite Element Analysis) of wafer heating for EB stepper, Initiatives of Precision Engineering at the Beginning of a Millennium, Proceedings of 10th International Conference on Precision Engineering July 2001, Kluwer Academic Publishers, (2001) 829.
- 6) K.Suzuki, T.Fujiwara, K.Hada, N.Hirayanagi, S.Kawata, K.Morita, K.Okamoto, T.Okino, S.Shimizu, T.Yahiro: Nikon EB stepper: its system concept and countermeasures for critical issues, Proceedings of SPIE Emerging Lithographic Technology IV 2000, 3997 (2000) 214.
- 7) M.F.Laudon, K.A.Thole, R.L.Engelstad: Thermal analysis of an x-ray mask membrane in a plasma environment, J. Vac. Sci. Technol. B Nov/Dec 1995, 13, 6 (1995) 3050.
- 8) 樽松保美, 吉田達彦: 絶縁エッチング装置「I-4 100SV II SD」, 電子材料, 3 (1999) 79.
- 9) D.L.Smith: VLSI Electronics Microstructure Science, edited by N.G.Einspruch, Academic New York, 8 (1984) 260.
- 10) S.Dushman: Scientific Foundation of Vacuum Technique, 2nd edition, John Wiley & Sons, New York, (1962).
- 11) 林主税: 実験物理学講座 4 真空技術, 共立出版 (1985).
- 12) T.A.Delchar (石川和雄 訳): 真空技術とその物理, 丸善 (1995).
- 13) 渋谷寿一, 本間寛臣, 斎藤憲司: 現代材料力学, 朝倉書店 (1986).
- 14) 宇田川真介: 次世代半導体製造用電子ビーム露光装置の気体冷却模擬実験用露光源系の研究, 千葉大学大学院自然科学研究科修士論文 (2003).