

Ontwerp en temperatuurregeling voor nanometerprecisie

De huidige IC-productiemachines van ASML draaien op een dergelijke accuratesse dat een positioneringsnauwkeurigheid in de orde van een nanometer is benodigd. Dit stelt zeer hoge eisen aan stijfheid en dynamica, maar zeker ook aan de thermo-mechanica van het ontwerp. Daarbij dienen naast de thermische uitzetting ook andere thermische en thermo-mechanische kenmerken te worden meegenomen. Tevens is het van belang de wijze van thermisch conditioneren af te stemmen op het thermo-mechanisch gedrag en vice versa. Slechts dan vindt een goede afweging plaats en kan het beste concept worden gekozen.

• *Sjef Box* •

Technisch gezien speelt zich in het hart van een waferscanner, rondom de projectielens, een zeer interessant schouwspel af. Het origineel (reticle) en het substraat (wafer) worden op nanometerprecisie met een snelheid in de orde van een meter per seconde bewogen; het reticle aan de bovenzijde van de projectielens, de wafer aan de onderzijde in tegengestelde richting. Aan het einde van de slag keren de bewegingsrichtingen om en wordt opnieuw het reticle gescand en afgebeeld op de wafer. Dit gaat net zo lang door tot de hele wafer is belicht. ASML-machines doen dit met een snelheid van meer dan 100 wafers per uur.

Om een gevoel voor de fysica te geven: de afmetingen van de projectielens zijn afhankelijk van het type machine, maar betreffen typisch een lengte van een meter en een diameter

van enkele tientallen centimeters; de waferdiameter is 30 cm en het aantal afbeeldingen per wafer is van de orde grootte honderd, bepaald door het IC-ontwerp van de klant.

Om de benodigde snelheden en versnellingen te kunnen halen, zijn sterke actuatoren nodig voor de aandrijving van de tafels waarop de wafer en het reticle zijn bevestigd. In een beperkte ruimte worden daardoor vele kiloWatts gedissipeerd, terwijl enkele centimeters verder een thermische stabiliteit op milliKelvin-niveau en lager wordt vereist.

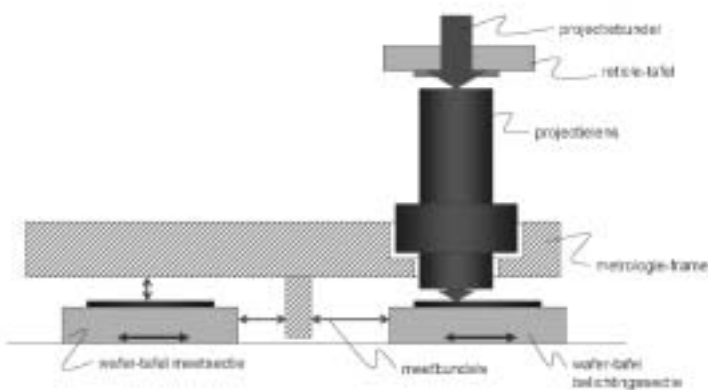
De standaardoplossing voor een ontwerp voor het ultraprecies positioneren is vaak het gebruik van materialen met een zeer lage thermische uitzettingscoëfficiënt. Hierdoor worden de eisen met betrekking tot de temperatuur gerelaxeerd. Dit hoeft echter niet altijd de beste oplossing te zijn. Aan mate-

rialen met een lage uitzettingscoëfficiënt kleven vaak ook nadelen, die materiaal-, productie- of kostprijstechnisch niet opwegen tegen het relaxeren van de thermische specificaties. Aan de hand van een voorbeeld uit de praktijk wordt dit geïllustreerd voor het ontwerp van een metrologie-frame voor de TWINSCANTM machine van ASML.

ASML Twinscan

Al enkele jaren brengt ASML de Twinscan op de markt. Bij deze machine wordt de locatie van de wafer ten opzichte van de wafertafel en tevens de hoogtekaart van de wafer bijzonder nauwkeurig bepaald op het meetgedeelte van de machine; Figuur 1 geeft een schematisch overzicht van de machine. Hierna beweegt de tafel inclusief de wafer van het meetgedeelte naar het projectiegedeelte van de machine, waar de wafer wordt belicht. Hierbij worden de zojuist gemeten geometrische data gebruikt om de wafer zo nauwkeurig mogelijk met zes vrijheidsgraden onder de projectielens te positioneren.

Door gebruik te maken van twee wafertafels kan gelijktijdig een meting en een belichting plaatsvinden. Hierdoor wordt het duurste deel van de machine, de optiek, vrijwel continu en dus zo efficiënt mogelijk gebruikt. De productiesnelheid ligt daardoor bijzonder hoog.



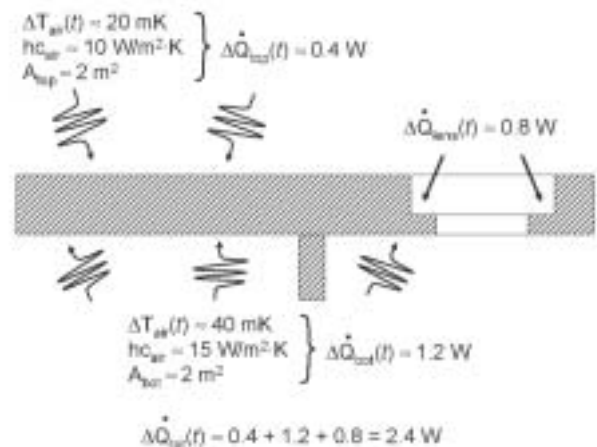
Figuur 1. Schematisch overzicht van de ASML Twinscan machine.

Het metrologie-frame

In het hart van de machine bevindt zich het metrologie-frame. Dit frame verbindt de projectielens met de sensoren die de positie van de tafels ten opzichte van de lens en weer andere sensoren bepalen. Een vervorming van het metroframe tussen lens en sensor, of sensors onderling, resulteert daardoor rechtstreeks in een meetfout. Vandaar dat de specificaties voor de thermische drift hiervan gedurende het meten of belichten van

een wafer in de orde van 1 nanometer liggen. Omdat de machine ook stabiel dient te blijven bij een relatief lage productiesnelheid wordt een typische korte-termijn stabilisatietijd van 5 minuten aangehouden. In de meeste gevallen wordt aan de lange-termijn specificatie automatisch voldaan, indien de korte-termijn specificatie wordt gehaald. Daarom wordt in dit verhaal alleen naar de korte-termijn specificatie gekeken.

Het metrologie-frame moet met name stabiel zijn gedurende het meten en het belichten van een wafer. Het zijn daarom vooral de veranderingen van de warmtebelasting op dit frame die gedurende of bij het opstarten van deze processen tot thermo-mechanische driften leiden, die op hun beurt meetfouten geven. Een eerste-orde afchatting van de fluctuaties in de warmtebelasting op een Twinscan metrologie-frame is weergegeven in Figuur 2.



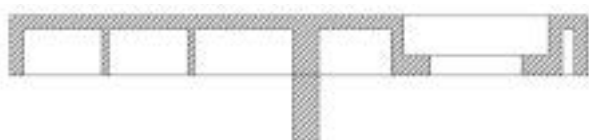
Figuur 2. Fluctuerende warmtebelasting op Twinscan metrologie-frame.

Aan de bovenzijde fluctueert de omringende lucht typisch met 20 mK. Met een warmteoverdrachtscoëfficiënt van ongeveer 10 W/m²·K en een bovenoppervlak van ongeveer 2 m² resulteert dat in een warmtebelastingsfluctuatie aan de bovenzijde van ongeveer 0,4 W. Door de snelle bewegingen en de hoge vermogensdissipatie van de wafertafels aan de onderzijde zijn zowel de luchttemperatuurfuctuaties alsook de effectieve warmteoverdrachtscoëfficiënt hoger. Hierdoor zal de vermogensfluctuatie aan de onderzijde ongeveer 1,2 W bedragen. Ook het transmissieverlies in de projectielens leidt tot vermogensfluctuaties, bijvoorbeeld bij het starten van productie of na het wisselen van het reticle (origineel). De typische fluctuatie van de warmtebelasting van de projectielens bedraagt 0,8 W. De totale fluctuatie van de warmtebelasting van het metrologie-frame bedraagt daardoor ongeveer 2,4 W.

Opmerking: Naast de hiervoor genoemde warmtebelastingen zijn er ook nog componenten die rechtstreeks op het metrologie-frame een fluctuerende warmtebelasting creëren. Deze zijn relatief klein en worden voor de eenvoud hier buiten beschouwing gelaten.

Alternatieve materialen

Het traditioneel ontwerp van het metrologie-frame is van invar en weegt typisch 1500 kilogram. Het gewicht is belangrijk in verband met het isoleren van trillingen van buitenaf. Het traditionele frame bestaat uit een gelaste platenconstructie (zie Figuur 3).



Figuur 3. Schematische weergave van het traditioneel platenframe van invar.

De nadelen van een dergelijk frame zijn:

- zeer hoge kostprijs;
- lange levertijd (typisch zes maanden).

Met name vanwege de zeer hoge prijs is gekeken of een alternatief ontwerp mogelijk is. Uit deze studie bleek dat een massief aluminium ontwerp het interessantste alternatief is; zie Figuur 4. In Tabel 1 worden enkele belangrijke eigenschappen van beide materialen met elkaar vergeleken. Opvallend is meteen de ongeveer 13 keer grotere thermische uitzettingscoëfficiënt. Hierdoor heeft dit ontwerp initieel tot veel verbazing geleid. Ook uit een eerste-orde afchatting van de thermische drift lijkt een aluminium metrologie-frame veel slechter dan het traditionele ontwerp.

Tabel 1. Materiaaleigenschappen van invar en aluminium.

		Invar	Aluminium ¹
Dichtheid	ρ [kg/m ³]	8030	2660
Specifieke warmte	C [J/kg·K]	500	900
Warmtegeleidingscoëfficiënt	k [W/m·K]	14	122
Thermische uitzettingscoëfficiënt	CTE [1/K]	$1,8 \cdot 10^{-6}$	$24 \cdot 10^{-6}$

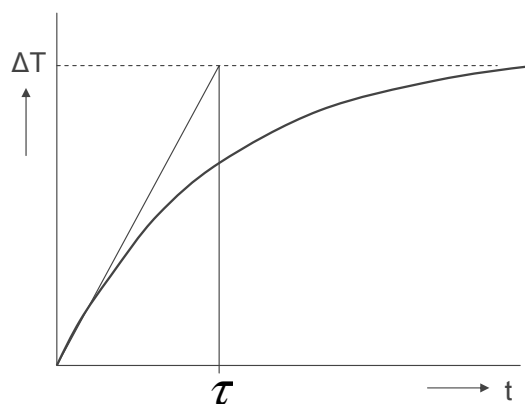
¹ Zuiver aluminium is constructie- en productietechnisch niet geschikt. De hier weergegeven eigenschappen zijn van aluminium dat is gelegeerd in verband met een goede verspaanbaarheid; effect hiervan is met name een sterke afname van de warmtegeleidingscoëfficiënt.



Figuur 4. Massief metrologie-frame van aluminium.

Thermo-mechanisch gedrag

Bij een eerste-orde afchatting van de temperatuurdift wordt ervan uitgegaan dat het systeem zich bij benadering gedraagt als een eerste-orde systeem. In dat geval zal het metrologie-frame in thermisch evenwicht bij een stapvormige verandering van de warmtebelasting een typisch exponentieel verloop van de temperatuur in de tijd vertonen; zie Figuur 5.



Figuur 5. Eerste-orde gedrag van een thermisch systeem.

Meteen na de stapvormige verandering is de opwarming alleen een functie van deze verandering en de thermische capaciteit van het frame. Voor deze initiële uniforme temperatuurverandering geldt dan:

$$\Delta Q_{MF} = m_{MF} \cdot C_{invar} \cdot \frac{dT(t_0)}{dt}$$

$$2,4 = 1500 \cdot 500 \cdot \frac{dT(t_0)}{dt}$$

$$\frac{dT(t_0)}{dt} = 3,2 \cdot 10^{-6} \text{ K/s}$$

Omdat de thermische tijdconstante van het metrologie-frame vele malen groter is dan de korte-termijn stabilisatietijd van 5 minuten (dit wordt later bevestigd), kan deze initiële temperatuurverandering worden gebruikt om de opwarming na 5 minuten te bepalen:

$$\Delta T_{\text{invar}}(t = 5 \text{ min}) = 5 \cdot 60 \cdot 3,2 \cdot 10^{-6} = 1,0 \cdot 10^{-3} \text{ K}$$

De typische lengte van de meetbundels bedraagt 0,5 m en met de thermische uitzettingscoëfficiënt van invar kan de uniforme expansie worden bepaald (later wordt gecontroleerd of deze berekening geldig is voor dit ontwerp):

$$\Delta L_{\text{invar}}(t = 5 \text{ min}) = L_{\text{meting}} \cdot CTE_{\text{invar}} \cdot \Delta T(t = 5 \text{ min}) = 0,5 \cdot 1,8 \cdot 10^{-6} \cdot 1 \cdot 10^{-3} = 0,9 \cdot 10^{-9} \text{ m}$$

De uniforme expansie voor het metrologie-frame van invar bedraagt dus ongeveer 1 nm en valt binnen de specificatie. Indien we dezelfde exercitie uitvoeren met een aluminium metrologie-frame van eveneens de vereiste 1500 kg, is de opwarming na 5 minuten:

$$\Delta T_{\text{alu}}(t = 5 \text{ min}) = 0,53 \cdot 10^{-3} \text{ K}$$

Echter met de uitzettingscoëfficiënt van aluminium is de uniforme lengteverandering hiermee gelijk aan:

$$\Delta L_{\text{alu}}(t = 5 \text{ min}) = L_{\text{meting}} \cdot CTE_{\text{alu}} \cdot \Delta T(t = 5 \text{ min}) = 0,5 \cdot 24 \cdot 10^{-6} \cdot 0,53 \cdot 10^{-3} = 6,4 \cdot 10^{-9} \text{ m}$$

Dit is duidelijk ver buiten specificatie en op basis hiervan kan worden geoordeeld dat aluminium dus niet geschikt is als materiaal voor het metrologie-frame. Toch is deze conclusie niet terecht, omdat daarbij wordt voorbijgegaan aan een totaal verschillend thermo-mechanisch gedrag van beide materialen en de mogelijkheden die daarbij horen.

Naast de uniforme thermische expansie zijn ook van belang de thermische tijdconstante τ , de thermische indringdiepte δ en de verhouding tussen de interne en de externe thermische weerstand van een object zoals gedefinieerd in het Biot-getal. De thermische tijdconstante kan worden berekend als:

$$\tau = \frac{m \cdot C}{\sum hc \cdot A}$$

Waarbij τ = thermische tijdconstante [s]

m = massa [kg]

C = soortelijke warmte van het materiaal [J/kg·K]

hc = warmteoverdrachtscoëfficiënt [W/m²·K]

A = oppervlak [m²]

Voor de thermische indringdiepte (gedefinieerd als de maximale indringdiepte vanaf het oppervlak naar binnen van een fictief lineair temperatuurverloop met dezelfde thermische

energie als het werkelijke temperatuurverloop) bij een constante warmteflux geldt:

$$\delta(t) = \sqrt{\pi \cdot \frac{k}{\rho \cdot C} \cdot t}$$

Hierin is $\delta(t)$ = thermische indringdiepte [m]
 k = warmtegeleidingscoëfficiënt [W/m·K]
 ρ = dichtheid van het materiaal [kg/m³]

Het Biot-getal is gedefinieerd als

$$Bi = \frac{hc_{\text{extern}} \cdot L}{k}$$

waarbij Bi = Biot-getal [-]

hc_{extern} = de externe warmteoverdrachtscoëfficiënt [W/m²·K]

L = karakteristieke afmeting [m]

k = warmtegeleidingscoëfficiënt van het materiaal [W/m·K]

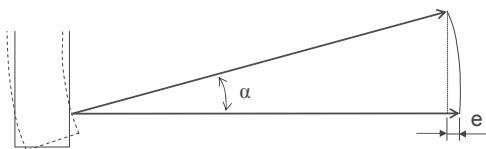
Als vuistregel wordt vaak gehanteerd dat een object een min of meer uniforme temperatuur heeft als het Biot-getal kleiner is dan 0,1, oftewel de thermische weerstand naar de omgeving is minimaal een orde groter dan de inwendige weerstand.

Vergelijking van alle bovenstaande kenmerken geeft een beter beeld van het thermo-mechanisch gedrag van beide materialen; zie Tabel 2.

Tabel 2. Vergelijking van de thermo-mechanische eigenschappen van invar en aluminium.

	Invar	Aluminium	Verhouding aluminium/invar
Uniforme uitzetting na 5 min.	0,9 nm	6,4 nm	7,4
Thermische tijdconstante	4,2 hr	7,5 hr	1,8
Thermische indringdiepte na 5 min.	0,057 m	0,22 m	3,9
Biot-getal	0,46	0,05	0,11

Dan blijkt dat de thermo-mechanische eigenschappen van beide materialen behoorlijk verschillen. Uit het Biot-getal van het invar frame blijkt dat een significante niet-uniformiteit van de temperatuur over de meetlengte te verwachten is. Door de platenconstructie wordt de inwendige thermische weerstand bovendien nog verder vergroot, waardoor de niet-uniformiteit van de temperatuur nog groter zal zijn. Daar komt nog bij dat door de beperkte thermische indringdiepte nog meer niet-uniformiteit zal optreden in deze niet-stationaire situatie. Doordat ook de stijfheid van een dergelijk platenframe sterk niet-uniform is, zullen de meetfouten niet zozeer door homogene vormveranderingen van het frame worden veroorzaakt, maar juist door lokale hoekveranderingen; zie Figuur 6. Omdat bij deze lokale effecten de verhouding tussen thermische capaciteit en warmtetransport volledig anders kan zijn dan bij de afschatting van de thermische tijdconstante van het gehele frame, kunnen deze effecten bovendien een totaal verschillend tijdgedrag hebben.

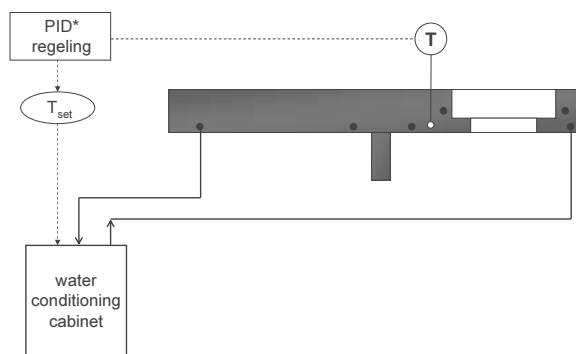


Figuur 6. Meetfout door lokale rotatie van de meetbundel.

Door de lagere dichtheid van aluminium kan dit frame volledig massief worden gemaakt (zie Figuur 4), waardoor afgezien van de materiaaleigenschappen de interne thermische weerstand veel lager is. Met de combinatie van de thermo-mechanische eigenschappen zoals weergegeven in Tabel 2 zullen bij dit ontwerp de meetfouten niet worden veroorzaakt door lokale effecten, maar juist door homogene deformaties.

Thermische conditionering

Indien wordt uitgegaan van een maximale drift van 1 nm per 5 min voor het metrologie-frame zal dus een temperatuurstabiliteit benodigd zijn van 0,08 mK per 5 min. Met de eerder beschreven fluctuerende warmtebelasting op het frame betekent dit dat een actieve temperatuurregeling benodigd is. In een Twinscan zijn echter al watersystemen actief om de temperatuur van kritische componenten thermisch te conditioneren. Het aluminium metrologie-frame kan worden opgenomen in dit watersysteem. Een aanpassing van het regelalgoritme is hiervoor wel noodzakelijk omdat hierin nu ook de temperatuur van het metrologie-frame gebruikt dient te worden; zie Figuur 7.



Figuur 7. Regelalgoritme waarin de temperatuur van het metrologie-frame wordt meegenomen.

Juist vanwege de thermische eigenschappen van aluminium is een actieve waterconditionering bijzonder effectief. De inwendige geleiding en de thermische indringingsnelheid zijn dusdanig groot dat het gehele frame zeer goed kan worden geconditioneerd. Tevens zorgt de relatief grote thermische capaciteit van aluminium ervoor dat temperatuurfuctuaties van zowel de omgeving als van het koelwater zeer goed worden gedempt. Dit geeft een zeer goede basis voor een goedwerkende temperatuurregeling. Een ander voordeel van dit concept is dat het metrologie-frame nu ook dient als thermische stabilisator voor de luchtstromingen rondom het frame, de sensoren en de projectielens. Tevens wordt het deel van de projectielens dat zich in het metrologie-frame bevindt beter geconditioneerd.

Introductie van aluminium

Voor alle Twinscan machinetypes kan het aluminium metrologie-frame worden ingevoerd, waardoor een zeer grote reductie van de kostprijs kan worden bereikt. Hierdoor wordt tevens de levertijd teruggebracht van enkele maanden naar enkele weken. Het op deze manier toepassen van materialen voor het ontwerp van nauwkeurige frames voor IC-productiemachines is door ASML gepatenteerd.

Auteursnoot

Sjef Box is senior designer bij ASML in Veldhoven.

Informatie

www.asml.com