

Optimisation de l'homogénéité de la température d'un substrat de silicium chauffé dans un système thermique rapide (RTP : Rapid Thermal Process) par analyse spectrale des propriétés radiatives

Pierre-Olivier LOGERAIS^{1*}, Raouf KHELALFA¹, Olivier RIOU¹,
Anne BOUTEVILLE²

¹Centre d'Études et de Recherche en Thermique Environnement et Systèmes (CERTES)
Université Paris-Est – IUT de Sénart – rue Georges Charpak – 77567 Lieusaint

²Laboratoire Arts et Métiers ParisTech d'Angers (LAMPA)
2, boulevard du Ronceray – 497035 Angers Cedex 01

*(auteur correspondant : pierre-olivier.logerais@u-pec.fr)

Résumé – Les procédés thermiques rapides sont utilisés dans l'industrie de la microélectronique pour différentes étapes clés de la fabrication des composants. Ils impliquent un chauffage par lampes infrarouges du substrat de silicium avec comme contrainte majeure l'obtention d'une température parfaitement homogène à la surface du substrat. Dans la présente étude, le transfert de chaleur dans un système thermique rapide est modélisé par la méthode des volumes finis. L'équation de transfert radiatif est résolue avec la méthode Monte-Carlo pour l'échantillonnage et le traçage des rayons. L'influence des propriétés radiatives du hublot de quartz dans les échanges de chaleur est appréciée en modifiant celles du substrat. Les températures obtenues sont expliquées grâce à l'analyse de l'absorptivité, de l'émissivité et de la réflectivité des surfaces suivant la longueur d'onde du rayonnement. Cette analyse permet d'expliquer le lien entre la température du substrat et celle du hublot, mais également de mettre en évidence une optimisation au moyen d'un filtre sur la surface inférieure du hublot de quartz.

Nomenclature

A_i	aire d'un patch i , m^2	<i>Symboles grecs</i>	
I	intensité radiative, W	$\alpha_{\theta,\lambda}$	absorptivité hémisphérique totale
I_b	intensité radiative pour le corps noir, W	δ_{ij}	symbole de Kronecker
M_{ij}	matrice d'échange	ε	émissivité
\vec{n}	vecteur unitaire normal à la surface	ε_j	émissivité du patch j
q_i	densité de flux radiatif pour un patch i , $W.m^{-2}$	$\varepsilon_{\theta,\lambda}$	émissivité hémisphérique totale
Q_i	flux de chaleur radiatif pour un patch i , W	κ	coefficient d'absorption
S_ϕ	terme de sources	Ω	direction de propagation du faisceau
r	position	ϕ	variable étudiée
t	temps, s	$\Phi(\Omega)$	fonction de phase
T	température, K	ρ	densité, $kg.m^{-3}$
T_j	température moyenne du patch j , K	ρ	réflectivité
\vec{V}	vecteur vitesse	σ	coefficient de diffusion
		Γ	coefficient de diffusion, $m^2.s^{-1}$
<i>Constante</i>			
	σ	Constante de Stephan-Boltzmann, $5,669.10^{-8} W.m^{-2}.K^{-4}$	

1. Introduction

Les procédés thermiques rapides (RTP : Rapid Thermal Processes) sont très utilisés dans la fabrication des composants de microélectronique pour assurer différents types de recuits (diffusion, activation des dopants, oxydation, siliciuration...). Dans les années 1980, l'utilisation de fours conventionnels a commencé à devenir un frein à la miniaturisation des composants en raison de leur trop grande inertie. Pour assurer des traitements thermiques de faibles durées, les procédés thermiques rapides ont fait leur apparition avec un chauffage assuré par des lampes infrarouges et une paroi de réacteur souvent maintenue à basse température. Même si la technologie est aujourd'hui mature, la difficulté majeure reste celle de l'obtention d'une température parfaitement homogène à la surface des substrats de silicium (wafers). Il est en effet nécessaire d'assurer un traitement thermique identique en surface avec des écarts de température inférieurs à quelques K tout au plus pour que les composants répondent aux critères de qualité. Cet enjeu devient d'autant plus crucial que la durée de chauffage tend à diminuer pour des températures élevées des substrats dont la taille va augmentant pour répondre aux besoins croissants du marché. Des solutions ont bien sûr été mises en place pour uniformiser la température du substrat mais elles ne parviennent pas à le faire de manière totalement efficace. Parmi ces solutions, citons le pilotage des lampes, le refroidissement du hublot de quartz, l'utilisation d'un suscepteur ou d'un anneau de garde ou encore la mise en rotation du substrat.

Depuis une vingtaine d'années, le développement de l'informatique a permis de mettre au point des méthodes de simulations numériques performantes permettant de mieux comprendre les procédés et de les optimiser. Concernant les procédés thermiques rapides, la simulation numérique se révèle être un moyen intéressant de réduire le nombre d'essais expérimentaux et d'étudier la sensibilité de différents paramètres sur le profil thermique du substrat afin de mieux cerner les phénomènes existants et d'apporter des solutions innovantes permettant d'uniformiser la température.

Le présent travail se situe dans cette démarche où il s'agit de mieux appréhender les transferts de chaleur, essentiellement par rayonnements, intervenant lors du chauffage du substrat de silicium dans un système thermique rapide. Pour ce faire, le modèle d'un équipement thermique rapide, validé dans une étude précédente, est considéré [1]. Les premières simulations numériques de ce système ont permis de montrer que la présence du hublot de quartz conditionnait en grande partie la forme du profil de température du substrat de silicium en raison d'échanges radiatifs entre la surface inférieure du hublot et celle du substrat [2-3]. La présente étude a pour objectif d'expliquer ces échanges radiatifs entre le substrat chauffé et le hublot de quartz. Pour cela, les propriétés radiatives du substrat sont modifiées et l'influence de chacune des modifications sur la température est appréciée. Les résultats sont ensuite interprétés en s'appuyant sur les propriétés radiatives des surfaces participantes. L'approche conduit à une solution pour optimiser la température du substrat de silicium.

2. Modélisation

2.1. Système thermique étudié

Le système thermique rapide modélisé est un équipement de type AS-One 150 principalement destiné au recuit et commercialisé par l'entreprise AnnealSys (Montpellier). Il est représenté Figure 1. Le four contient un banc de dix-huit lampes infrarouges à halogène. Le réacteur est de forme cylindrique avec une paroi maintenue à 300 K au moyen d'une circulation d'eau. Un substrat de silicium de diamètre 150 mm (6 pouces) est placé dans le réacteur. Un hublot en quartz assure l'étanchéité du réacteur tout en laissant passer le rayonnement infrarouge provenant des lampes permettant ainsi le chauffage du substrat de silicium. Un système de pompage des gaz permet d'assurer la basse pression et un panneau de contrôler l'injection et l'échappement. Ici, le substrat de silicium est placé dans une atmosphère d'azote à une pression de 300 Pa.

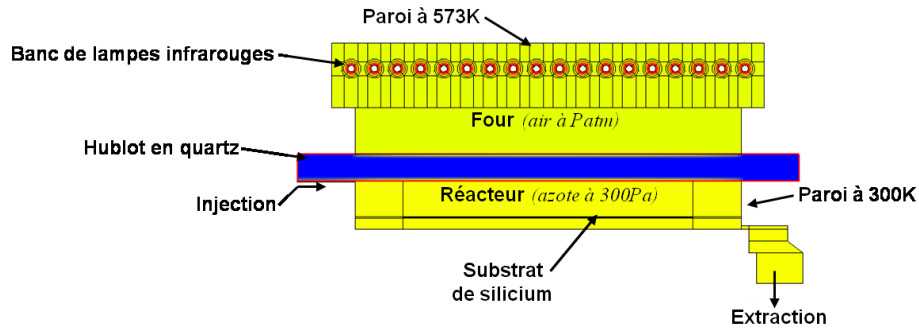


Figure 1 : Modèle de l'équipement thermique rapide.

2.2. Équations

Les équations de conservation qui gouvernent les différents transferts de masse et de chaleur sont résolues avec la méthode des volumes finis [4]. Ces équations ont pour formulation générale :

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho\phi\vec{V}) = \text{div}(\Gamma.\overrightarrow{\text{grad}}\phi) + S_\phi \quad (1)$$

où $\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t}$ est le terme transitoire ; $\text{div}(\rho\phi\vec{V})$ est le terme de convection ; $\text{div}(\Gamma.\overrightarrow{\text{grad}}\phi)$ est le terme de diffusion ; S_ϕ est le terme de sources.

L'équation de transfert radiatif pour un milieu qui émet, absorbe et diffuse de l'énergie par rayonnement s'écrit en régime permanent :

$$\Omega.\overrightarrow{\text{grad}}(I(r,\Omega)) = -(\kappa + \sigma)I(r,\Omega) + \kappa I_b(r) + \frac{\sigma}{4\pi} \int_{\Omega'=4\pi} I(r,\Omega').\Phi(\Omega' \rightarrow \Omega) d\Omega' \quad (2)$$

où

- $\Omega.\overrightarrow{\text{grad}}(I(r,\Omega))$ est le gradient d'intensité dans la direction de propagation Ω ;
- $-(\kappa + \sigma)I(r,\Omega)$ représente respectivement les pertes dues à l'absorption κ et à la diffusion σ ;
- $\kappa I_b(r)$ correspond à l'émission du corps noir ;
- $\frac{\sigma}{4\pi} \int_{\Omega'=4\pi} I(r,\Omega').\Phi(\Omega' \rightarrow \Omega) d\Omega'$ est le gain dû à la diffusion avec :

$$I(r,\Omega) = \varepsilon I_b(r) + \frac{\rho}{\pi} \int_{n.\Omega'} |n.\Omega'| I(r,\Omega') d\Omega' \quad (3)$$

L'équation de transfert radiatif (2) est résolue en considérant les rayons émis par chacune des surfaces du système. Les rayons émis d'une surface sont tracés jusqu'à ce qu'ils soient absorbés par la même surface ou une autre. Les surfaces portent le nom de « patches ». Le flux de chaleur radiatif pour un patch i est le bilan des rayonnements incidents provenant de tous les autres patches j et de sa propre émission. La solution discrète a alors pour expression :

$$Q_i = q_i A_i = \sum_{j=1}^{N_s} (M_{ij} - \delta_{ij} \varepsilon_j) \sigma T_j^4 A_j \quad (4)$$

Un paquet d'énergie ou photon, quand il est émis d'un patch i , subit plusieurs événements avant d'être absorbé par une surface : absorption, émission, réflexion (diffuse, spéculaire ou partiellement spéculaire) et transmission. Chacun de ces événements dépend de la longueur d'onde du rayon,

de sa direction de propagation, de l'orientation des patchs rencontrés et des propriétés radiatives des surfaces. Ces dernières sont connues à partir des indices de réfraction complexes. La détermination des longueurs d'onde, de la direction et du tracé des rayons est réalisée avec la méthode Monte-Carlo [5]. Le caractère aléatoire de l'émission diffuse est également reproduit grâce à cette méthode. On se restreint à un nombre de photons faible, seulement quelques millions, comparé au nombre réel qui est extrêmement grand. Ces photons doivent alors être représentatifs d'un groupe et leurs trajectoires doivent être parfaitement aléatoires, d'où le choix de la méthode Monte-Carlo.

3. Simulations numériques

Les simulations numériques du système thermique rapide sont réalisées en utilisant le logiciel CFD'Ace. On choisit volontairement de se placer dans la situation où le chauffage n'est pas optimisé pour apprécier la sensibilité du paramètre que l'on modifie. Les calculs sont réalisés pour différentes puissances de chauffage (10 à 30%) dans le régime permanent. Puisque l'objectif est de mieux comprendre les échanges radiatifs entre le substrat de silicium et le hublot de quartz, les simulations numériques sont effectuées en modifiant la propriété radiative du substrat. Les quatre cas traités sont indiqués dans le Tableau 1 où figure aussi les ordres de grandeur de l'émissivité, de l'absorptivité et de la réflectivité. On rappelle que l'émissivité hémisphérique totale $\varepsilon_{\theta,\lambda}$ est égale à l'absorptivité hémisphérique totale $\alpha_{\theta,\lambda}$ quelle que soit la longueur d'onde λ considérée selon la loi de Kirchhoff.

Cas n°	1	2	3	4
Coefficient	Cas sans substrat (paroi du réacteur réfléchissante)	Silicium	Réflecteur parfait	Corps noir
Émissivité $\varepsilon_{\theta,\lambda}$ = absorptivité $\alpha_{\theta,\lambda}$	0,25	0,7	0	1
Réflectivité ρ	0,75	0,3	1	0

Tableau 1 : Ordres de grandeur des propriétés radiatives.

4. Résultats

Les températures au centre du hublot et du substrat ont été relevées suivant la puissance de chauffage (Figure 2).

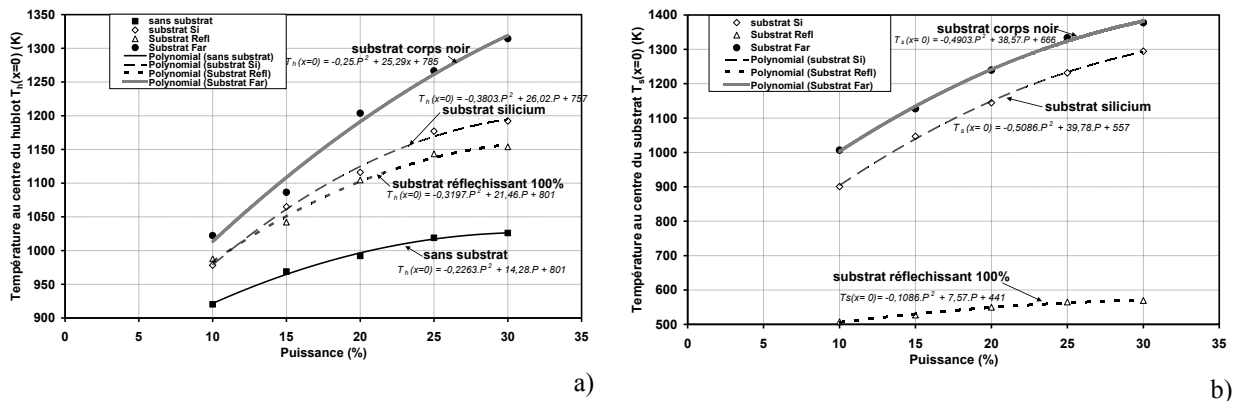


Figure 2 : Températures au centre du hublot (a) et du substrat (b) suivant la puissance pour les différentes propriétés radiatives du substrat.

Le substrat et le hublot sont les plus chauds dans le cas où le substrat a la propriété d'un corps noir. Les températures du substrat et du hublot suivent donc les propriétés d'absorption et d'émission du substrat. Plus elles ont des coefficients élevés, plus les températures seront grandes. Le hublot est donc chauffé par le rayonnement émis par le substrat.

Lorsque le substrat a la propriété d'un réflecteur parfait, sa température est d'environ 520 K. Comme le substrat réfléchit dans tout le domaine spectral, on s'attendait à obtenir une température proche de 300 K. Le substrat est chauffé par convection car il y a de l'azote chaud dans le réacteur.

La température du hublot est plus élevée dans le cas où il la réflectivité du substrat est totale. Lorsqu'on considère une absence de substrat, le rayonnement réfléchi par la paroi vers le hublot élève sa température mais de façon moindre car la réflectivité est moindre.

5. Analyse et optimisation

L'émissivité et la réflectivité du substrat, voire celle de la paroi du réacteur ont donc un effet direct sur la température du hublot. Pour établir une analyse plus fine, les propriétés radiatives des surfaces selon la longueur d'onde sont mises à profit. La Figure 3 montre ces propriétés en incidence normale [6], les valeurs restant dans les mêmes ordres de grandeur pour des incidences obliques.

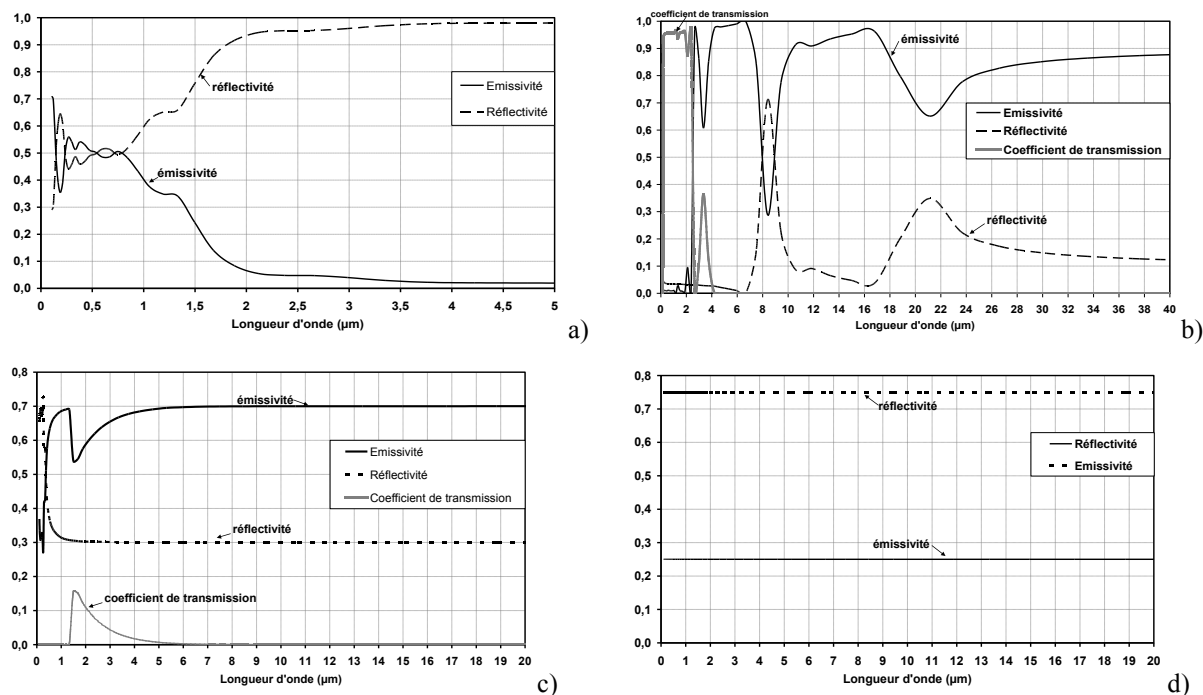


Figure 3 : Propriétés radiatives du tungstène des lampes à halogène (a), du quartz du hublot (b), du silicium du substrat à 1000 K (c) et de l'acier de la paroi du réacteur (d) [6].

Le cas où le substrat a les propriétés radiatives du corps noir et celui où il a celles du silicium sont d'abord confrontés. Lorsque le substrat a la propriété d'un corps noir, il absorbe tout le rayonnement émis par les lampes qu'il reçoit. C'est pour cela qu'il est plus chaud que dans le cas du silicium où l'absorptivité est de 0,7. Une fois le rayonnement absorbé, le substrat chaud émet dans tout le domaine spectral. L'émissivité du corps noir est supérieure à celle du silicium, 1 contre 0,7 dans tout le domaine infrarouge. Or, le hublot absorbe fortement au-delà de 2,6 μm . Le hublot est donc chauffé par le rayonnement émis par le substrat au-delà de 2,6 μm . La température du hublot est donc plus élevée dans le cas du substrat ayant les caractéristiques d'un corps noir du fait de l'émissivité plus importante. En définitif, la température du hublot suit l'émissivité du substrat.

Comparons le cas sans substrat à celui où le substrat est parfaitement réfléchissant. Le hublot absorbe avec un faible pourcentage, environ 5%, le rayonnement centré aux alentours de 1 μm émis par les lampes. Il peut absorber dans cette même proportion le rayonnement réfléchi par la paroi du réacteur. Comme les calculs ont été réalisés en régime permanent, donc pour un temps supposé infini, le hublot a donc eu le temps d'absorber assez de rayonnement pour atteindre une température élevée. La température du hublot est plus élevée quand le substrat est parfaitement réfléchissant. Celui-ci renvoie plus de rayonnements que dans le cas où il n'y a pas de substrat. La paroi du réacteur a en effet une réflectivité moins importante (0,75). La paroi absorbe donc le reste du rayonnement (absorptivité de 0,25). Mais une fois absorbé, le rayonnement émis par la paroi est faible car sa température est faible (300 K). Le substrat de silicium réfléchit 30% du rayonnement qu'il reçoit des lampes. Le hublot absorbe avec un faible taux (5%) dans ce domaine. Par conséquent,

le rayonnement des lampes centré aux alentours de $1\ \mu\text{m}$ qui est réfléchi par le substrat chauffe le hublot mais de manière beaucoup moins importante que le rayonnement émis par le substrat.

Ces raisonnements nous ont conduits à envisager un filtre sur la surface inférieure du hublot de quartz pour rééquilibrer les flux radiatifs en renvoyant les rayonnements infrarouges au-delà de $2,6\ \mu\text{m}$ vers le bord du substrat. Les simulations confirment que ce filtre permet d'uniformiser la température du substrat de silicium (Figure 4).

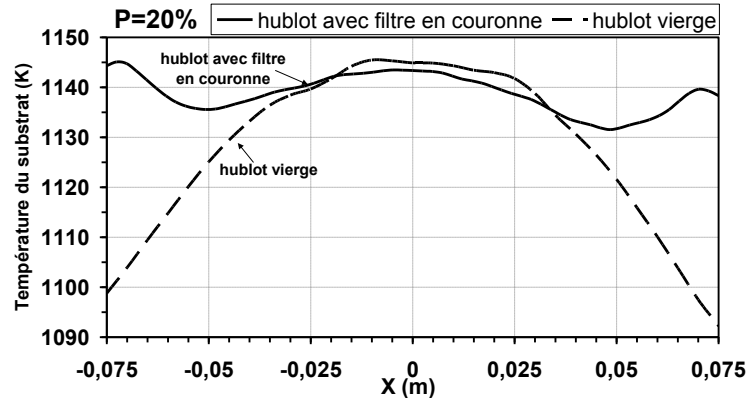


Figure 4. Profils de température du substrat de silicium avec et sans le filtre.

6. Conclusion

Le chauffage d'un substrat de silicium par les lampes infrarouges dans un système thermique rapide est étudié. Les transferts radiatifs sont modélisés avec la méthode des volumes finis et l'équation de transfert radiatif est résolue avec la méthode Monte-Carlo. Les simulations numériques menées en régime permanent sans optimisation pour différentes propriétés du substrat ont permis d'apprécier la relation étroite entre la température du substrat de silicium et celle du hublot de quartz. Un mécanisme d'échange par émission-absorption et réflexion des rayonnements est mis en évidence grâce à l'analyse des propriétés radiatives des surfaces suivant la longueur d'onde. En sélectionnant et redirigeant les rayonnements infrarouges au-delà de $2,6\ \mu\text{m}$ à l'aide d'un filtre sur la surface inférieure du hublot de quartz, les simulations montrent qu'il est possible de rééquilibrer les flux et donc d'uniformiser la température du substrat de silicium.

Références

- [1] P.O. Logerais, D. Chapron, J. Garnier, A. Bouteville, Validation of a Rapid Thermal Processing model in steady-state, *Microelectronic Engineering*, 85 (2008) 2282-2289.
- [2] P.O. Logerais, M. Girtan, A. Bouteville, Influence of the quartz window in a Rapid Thermal Processing apparatus, *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 8(1) (2006), 139-143.
- [3] P.O. Logerais, D. Chapron, A. Bouteville, Transient simulations of a Rapid Thermal Processing apparatus, *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 9(4) (2007) 1082-1086.
- [4] S.V. Patankar *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow* Hemisphere Publishing Corporation, McGraw-Hill Book Company, New York (1980).
- [5] M.F. Modest, *Radiative Heat Transfer*, McGraw-Hill, New York (1993).
- [6] E.D. Palik, *Handbook of Optical Constants of Solids*, Academic Press, New York (1998).

Remerciements

Nous remercions l'entreprise AnnealSys et notamment son directeur M. Franck Laporte pour son aide et la mise à disposition de l'équipement AS-One 150 pour réaliser la présente étude.