

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE ABOU - BEKR BELKAID DE TLEMCENFACULTE DES SCIENCES  
DEPARTEMENT DE PHYSIQUE



UNITE DE RECHERCHE MATERIAUX ET ENERGIES RENOUVELABLES (URMER)



## MEMOIRE

Pour obtenir le grade de

### MASTER EN PHYSIQUE

Spécialité : *Physique Energétique ; Système et Matériaux*

Par

BABA AHMED Zeyneb

Sur le thème

## SIMULATION NUMERIQUE D'UN FOUR RECUIT RAPIDE PAR LOGICIEL COMSOL

Soutenu publiquement le 23/06/2015, devant le Jury composé de :

<b>Encadreur</b>	<b>Pr CHABANE SARI N.E.</b>	(Univ. Tlemcen)
<b>Co-encadreur</b>	<b>Dr CHIALI Anisse</b>	(EPST Tlemcen)
<b>Président</b>	<b>Pr OULD-Abbes amina</b>	(Univ. Tlemcen)
<b>Examinatrice</b>	<b>Pr RAHMOUN Khadîdja</b>	(Univ. Tlemcen)

Année universitaire : 2014 - 2015

# REMERCIEMENTS

---

En préambule à ce mémoire je remercie « DIEU » qui m'a aidé et m'a donné la patience et le courage durant ces longues années d'étude.

Pour commencer, ces remerciements vont tout d'abord au corps professoral et administratif de la Faculté des Sciences et Technologie, en particulier le département de physique, pour la richesse, le sérieux et la qualité de leur enseignement et qui déploient de grands efforts pour assurer à leurs étudiants une formation actualisée.

Je tiens à remercier sincèrement Messieurs, Pr. **CHABANE SARI Nasr-Eddine** et Dr **CHIALI Anisse** mes encadreurs, qui ont toujours été disponibles et à l'écoute. Je leur ai reconnaissance pour leur soutien, leur précieuses aides et le temps qu'ils m'ont consacré.

Madame **Abbes** et Madame **RAHMOUN** Vous nous avez l'honneur d'avoir accepté d'être membres du jury en tant que présidente et examinatrice. Veuillez trouver ici l'expression de mon grand respect et mes vifs remerciements.

On remercie vivement les membres du laboratoire URMER, pour le sérieux de ces employés.

Ces quelques mois de sacrifices n'ont pas pu porter leurs fruits sans le soutien inconditionnel de ma mère, ni les précieux conseils et encouragements de mon fiancé, mes frères et sœur ni la tendresse de ma grande mère qui est mon pilier et ma source de sagesse.

Je souhaite adresser mes remerciements les plus sincères aux personnes qui m'ont apporté leur aide et qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire ainsi qu'à la réussite de cette formidable année universitaire.

# DEDICACES

---

*On dit souvent que le trajet est aussi important que la destination. Les cinq années d'étude m'ont permis de bien comprendre la signification de cette phrase. Ce parcours, en effet, ne s'est pas réalisé sans défis et sans soulever de nombreuses questions pour lesquelles les réponses nécessitent de longues heures de travail.*

*Je dédie ce modeste travail à celle qui m'a donné la vie, le symbole de tendresse, qui s'est sacrifiée pour mon bonheur et ma réussite, ma mère. A mon regretté père, école de mon enfance, qui a été mon ombre durant ces années d'études. Ce travail est le fruit des sacrifices consentis pour mon éducation.*

*Je dédie ce travail à mon adorable sœur et copine TALEB Imene, celle qui donne sans retour, celle qui s'est trouvée proche de moi quand j'en ai eu le plus besoins celle qui m'a aidé a concrétisé ce projet je la remercie. A mes frères Ilyes, Mohammed, Abd El Hadi et enfin notre sucre d'orge Djawed qui m'ont soutenue durant le long de mon travail. A mes copines toutes celles qui m'ont soutenues moralement. A mes tentes et oncles, à mes cousins et cousines, à ma grand-mère, qui a toujours prié pour moi, je demande dieu le tout puissant de nous la gardé en vie le plus longtemps possible.*

*Je dédie ce travail à mon fiancé EL OUCHEDI Ghouti, je le remercie pour sa présence à mes côtés, sa patience et son sens de l'humour, ainsi qu'aux membres de sa famille.*

**BABA AHMED Zeyneb**

# RESUME

Le procédé thermique rapide (RTP : Rapid Thermal Process) est très utilisé dans la fabrication des composants de microélectronique. Il correspond à plusieurs étapes clés comme les recuits d'implantation, de siliciuration, d'oxydation, de nitruration et le dépôt de couches minces par CVD (ChemicalVaporDeposition). Il consiste à chauffer un nombre restreint de substrats de silicium par des lampes infrarouges permettant ainsi des durées de traitement très courtes. L'enjeu majeur est d'obtenir une température uniforme à la surface du substrat.

Le but de cette étude est de mieux comprendre les relations entre le chauffage par les lampes infrarouges et le profil de température d'un substrat de silicium dans un système thermique rapide, le système AS-One 150, en vue d'améliorer l'uniformité de la température du substrat de silicium.

La modélisation du système est réalisée en deux et trois dimensions. La modélisation approfondie d'une lampe infrarouge est aussi effectuée pour mieux cerner les paramètres des lampes à entrer dans les modèles en deux et trois dimensions. Les modélisations ont été réalisées à l'aide du logiciel COMSOL. Les équations de conservation de la masse et de la chaleur ont été considérées et l'équation de transfert radiatif est résolue selon un schéma utilisant la méthode Monte-Carlo. Les modèles sont validés en confrontant les profils de température du substrat et les températures des filaments à des mesures expérimentales.

## Mots-clés

Procédé thermique rapide (RTP), modélisation, simulation numérique, COMSOL, profil de température, uniformité de température, lampe infrarouge, substrat de silicium, AS-One 150.

# TABLE DES MATIERES

---

DEDICACES

REMERCIEMENT

RESUME

TABLES DES MATIERES

LISTE DES FIGURES

INTRODUCTION GENERAL

**CHAPITRE I : GENERALITE SUR LE PROCEDE THERMIQUE RAPIDE (RTP)**

**I.1. INTRODUCTION.....5**

**I.2. Généralités sur le procédé thermique rapide (RTP : Rapid Thermal Process).....6**

I.2.1. Principe.....6

I.2.2. Applications.....9

**I.3. État de l'art sur l'uniformité de la température du substrat de silicium.....10**

**I.4. État de l'art sur la modélisation numérique du chauffage du substrat de silicium.....13**

**I.5. Problématique de ce mémoire .....13**

**I.6. Conclusion.....14**

**CHAPITRE II : FOUR Recuit Thermique**

**II.1. INTRODUCTION.....16**

**II.2. Description.....17**

II.2.1. Recuit Thermique Rapide (RTA) .....18

II.2.2. Oxydation Thermique Rapide (RTO).....	18
II.2.3. Thermique Diffusion (RTD).....	19
II.2.4. Salinisation .....	20
II.2.5. Sulfuration.....	21
II.2.6. Nitruration.....	21
II.2.7. Silicium.....	22
II.2.8. Cristallisation .....	22
II.2.9. Semi-conducteur .....	23
<b>II.3. Avantages et inconvénients.....</b>	<b>24</b>
II.3.1. Avantages.....	24
II.3.2. Inconvénients.....	24
<b>II.4. Applications.....</b>	<b>25</b>
II.4.1. Conduction.....	26
II.4.2. Convection.....	26
II.4.3. Radiation.....	26
<b>II.5. Conclusion.....</b>	<b>31</b>

## **CHAPITRE III : Etude thermique du four RTP (COMSOL)**

<b>III.1. INTRODUCTION.....</b>	<b>33</b>
<b>III.2. Présentation de la modélisation.....</b>	<b>34</b>
<b>III.3. Modèle Mathématique.....</b>	<b>35</b>
III.3.1. Modèle en deux dimensions.....	35
III.3.2. Modèle en deux dimensions.....	36

<b>III.4. Modélisation thermique du RTP.....</b>	<b>37</b>
III.4.1. Équations et données de la modélisation.....	37
III.4.2. Présentation de la forme générale de l'équation de conservation.....	38
III.4.3. Modélisation des écoulements.....	38
III.4.4. Modélisation des transferts de chaleur par conduction et convection.....	40
<b>III.5. Cas du transfert de chaleur par rayonnement.....</b>	<b>41</b>
III.5.1. Équation de transfert radiatif.....	42
<b>III.6. Logiciel COMSOL (cas pratique) .....</b>	<b>43</b>
III.6.1. Définition de modèle.....	44
III.6.2. Résultats et discussion.....	45
<b>III.7. Conclusion.....</b>	<b>46</b>

## **REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE**

## **CONCLUSION GENERALE**

# LISTE DES FIGURES

## CHAPITRE I

**Figure 1.1.** Principe du Procédé thermique rapide (RTP).....6

**Figure 1.2.** Exemple d'évolution de la température du substrat dans un procédé thermique rapide.....7

**Figure 1.3.** Schéma d'un four résistif.....8

**Figure 1.4.** Durées et températures des applications RTP.....9

**Figure 1.5.** Exemples de solutions pour améliorer l'uniformité de la température du substrat.....12

## CHAPITRE II

**Figure 2.1.** Four Recuit thermique.....13

**Figure 2.2.** Les différentes sources de Diffusion.....16

**Figure 2.3.:** Géométrie pour le calcul des facteurs de vue entre les deux surfaces,  $A_1$  et  $A_2$ .....24

**Figure 2.4.** Concept d'un système rapide de traitement thermique (RTP). (b) Appliquée Matériaux 300mm RTP system. (Courtoisie Appliquée Matériaux, Inc.).....25

## CHAPITRE III

**Figure 3.1** Modèles de l'AS-One 150 réalisés en deux et trois dimensions.....34

**Figure 3.2.** Géométrie en deux dimensions de l'AS-One 150 avec son maillage.....35

**Figure 3.3.** Géométrie en trois dimensions de l'AS-One 150 avec son maillage et les différentes parties de la construction.....36

**Figure 3.4.** Forme de base avec anticipation sur le maillage du substrat (en rouge).....37

**Figure 3.5.** Transfert de chaleur par rayonnement pour un élément de solide qui absorbe et diffuse.....41

<b>Figure 3.6.</b> Présenté du software COMSOL Version 5.0 utilisé pour la simulation de notre four de recuit thermique.....	42
<b>Figure 3.7.</b> La géométrie du modèle.....	43
<b>Figure 3.8.</b> La température de la lampe, d'un cachet, et le capteur après 10s de chauffage.....	44
<b>Figure 3.9.</b> Les transitoires de température de la lampe, la tranche de silicium, et le capteur, ainsi que avec la puissance d'irradiation de la surface du capteur.....	45

# INTRODUCTION

---

Le procédé thermique rapide (RTP : Rapid Thermal Process) est très utilisé dans la fabrication des composants de microélectronique. Il correspond à des étapes clés de la fabrication comme les recuits d'implantation, de siliciuration, d'oxydation, de nitruration et plus récemment dans le dépôt de couches minces.

L'origine du procédé thermique rapide remonte aux années 1980. Depuis la mise en place des premiers circuits intégrés, la technologie silicium s'efforce sans cesse de miniaturiser les composants semi-conducteurs afin d'améliorer les performances des circuits.

Dans les années 1980, l'utilisation de fours conventionnels a commencé à devenir un frein pour la miniaturisation des composants. Leur trop grande inertie n'autorisait pas des traitements de courtes durées pour les plaques de silicium. Ces plaques de silicium sont couramment appelées substrats (wafer en anglais). Actuellement, le procédé thermique rapide est utilisé avec succès pour ces traitements de courtes durées. Dans ce procédé, le chauffage des substrats de silicium est en effet réalisé par un banc de lampes infrarouges permettant des temps de réponse très courts.

Mais, le principal défi est d'avoir une bonne uniformité de la température sur toute la surface du substrat de silicium. Même si une nette amélioration a été obtenue depuis la création du procédé, cette condition reste bel et bien l'enjeu majeur. Il est en effet nécessaire d'assurer un traitement identique sur tout le substrat pour que les composants répondent de manière identique aux critères de qualité. L'étude du chauffage du substrat de silicium permet de mieux comprendre les phénomènes responsables des gradients de température constatés.

En parallèle, le développement de l'informatique a permis de mettre au point des méthodes de simulations numériques efficaces pour optimiser les procédés thermiques rapides.

Ce mémoire, au sein URMER de la faculté des Sciences de la Matière AboubakerBelkaid Tlemcen, s'inscrit dans ce cadre. Ses objectifs sont les suivant :

- Présentation de la technique de recuit thermique rapide
- Modélisation du comportement thermique d'un four RTP par le logiciel COMSOL.
- Réalisation d'un processus de recuit thermique en utilisant un four As-One.

Pour atteindre ces objectifs, la démarche suivante a été utilisée. Le système thermique rapide a été considéré. Une modélisation du système a été réalisée avec le logiciel COMSOL qui permet de restituer la géométrie et de simuler numériquement les phénomènes essentiellement thermiques qui y ont lieu, ainsi que les résultats trouvés.

Pour cela, ce mémoire est structuré en quatre parties principales, encadré par une introduction et une conclusion, qui reprend les principales observations, synthétise quelques recommandations et présente des perspectives à développer.

Le premier chapitre, concerne les généralités sur le procédé thermique rapide (RTP), les différents états de l'art du silicium, ainsi que la problématique de ce mémoire.

Le Deuxième chapitre, présente le four recuit thermique, depuis sa définition, passant par les avantages ainsi que les inconvénients et les applications de ce dernier.

Le troisième chapitre portera sur la modélisation du système thermique rapide par le logiciel COMSOL.

On énumèrera les résultats de ce dernier ainsi que les principales remarques.

# 1

---

## GENERALITE SUR LE PROCEDE THERMIQUE RAPIDE (RTP)

---

### INTRODUCTION

L'obtention d'une température uniforme sur toute la surface du substrat de silicium est le principal enjeu du procédé thermique rapide. Pour répondre à cette exigence, ces procédés peuvent être modélisés numériquement.

Dans ce chapitre, les différents aspects du procédé thermique rapide sont d'abord présentés : le principe, les applications, les intérêts et les difficultés, ainsi qu'une brève description du marché des équipements.

Dans les deux parties qui suivent, un état de l'art sur l'uniformité de la température du substrat de silicium et un autre sur la modélisation numérique des procédés thermiques rapides sont proposés.

Ce chapitre est conclu par la problématique de ce mémoire.

## I. Généralités sur le procédé thermique rapide (RTP : Rapid Thermal Process)

### 1. Principe

Le procédé thermique rapide — communément appelé RTP (Rapid Thermal Process) — consiste à chauffer un nombre restreint de substrats de silicium par des lampes infrarouges. Il peut s'agir d'un procédé de recuit ou d'un procédé de dépôt. On ne s'intéressera qu'au procédé de recuit.

Le schéma de la Figure 1-1 montre les différents éléments qui entrent dans ce procédé. Le substrat de silicium est placé dans une enceinte appelée « réacteur ». Le réacteur peut être maintenu à basse pression grâce à un système de pompage. Le substrat est chauffé par le rayonnement infrarouge émis par un ou plusieurs bancs de lampes placés dans le four.

Le hublot en quartz assure l'étanchéité du réacteur tout en laissant passer le rayonnement émis par les lampes. Les parois du réacteur sont maintenues à environ 300 °K pour éviter de contaminer le substrat. La température du substrat est contrôlée par l'intermédiaire d'un régulateur relié à une mesure pyrométrique.

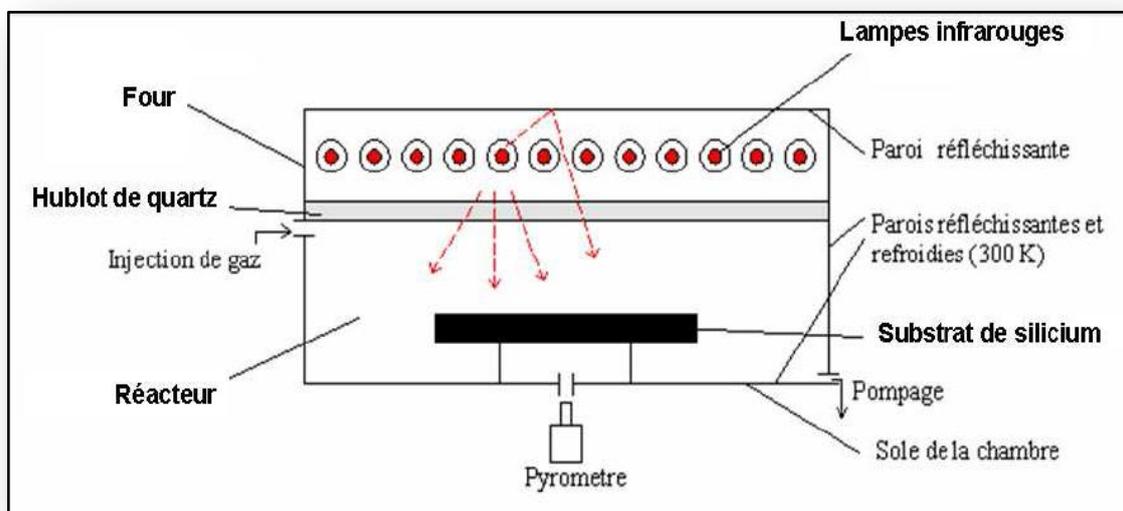
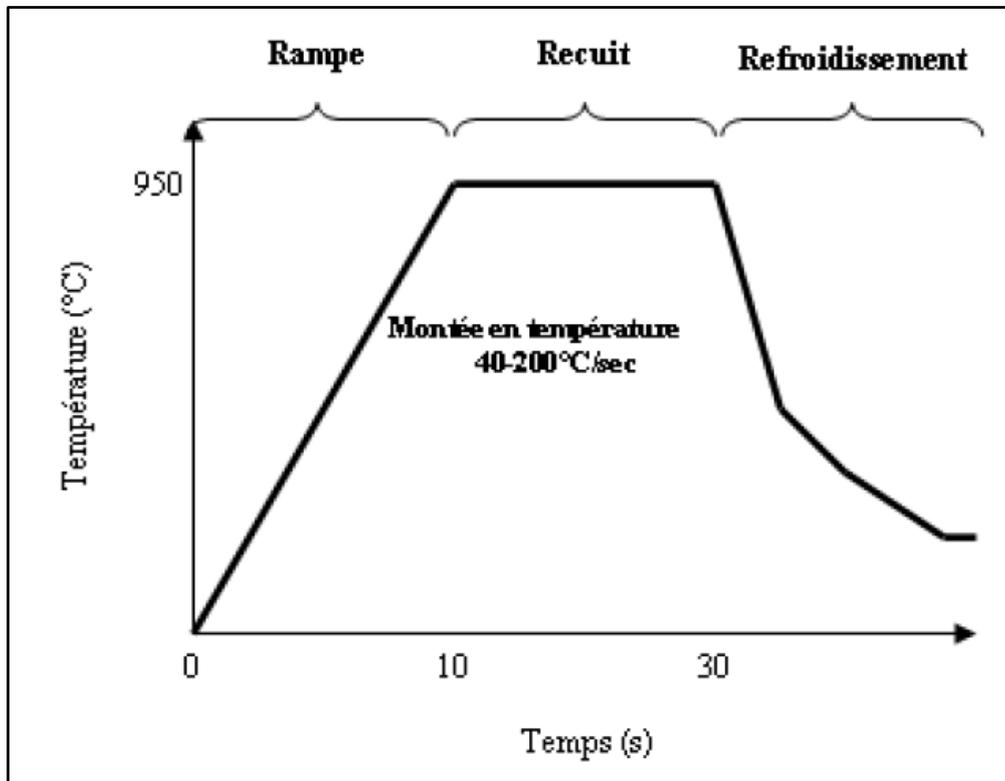


Figure 1.1. Principe du Procédé thermique rapide (RTP).

La Figure 1-2 montre un exemple d'évolution typique de la température du substrat. sa montée est de l'ordre de quelques **secondes**. Puis, le substrat est maintenu à la température du recuit pendant la durée requise. La puissance des lampes est ensuite coupée pour laisser le substrat revenir à sa température initiale.



**Figure 1.2.** Exemple d'évolution de la température du substrat dans un procédé thermique rapide.

L'intérêt du procédé thermique rapide peut être évalué en effectuant une comparaison avec le chauffage réalisé dans les fours résistifs conventionnels. La configuration d'un tel four est présentée par la Figure 1-3. Les substrats de silicium sont placés en grand nombre à l'intérieur d'un tube en quartz. La pression peut être maintenue basse à l'intérieur du tube grâce à un système de pompage. Une résistance chauffante est placée autour du tube.

Une bonne uniformité de la température des substrats est obtenue.

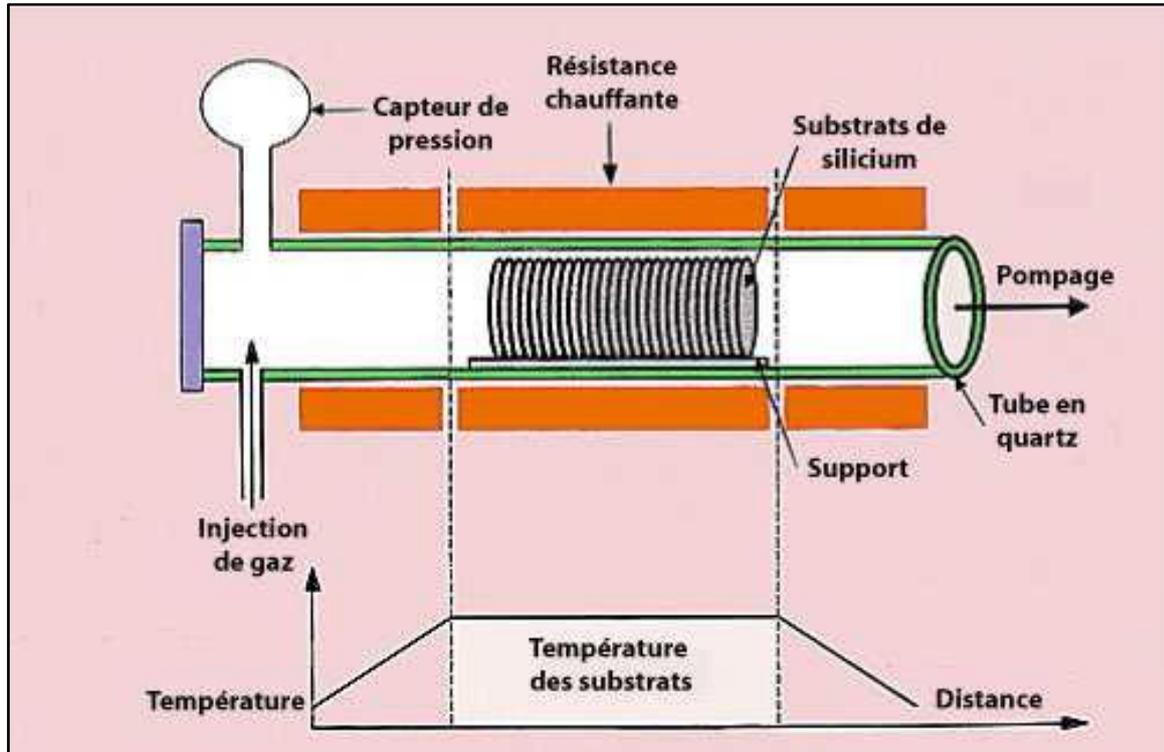


Figure 1.3. Schéma d'un four résistif.

Le procédé thermique rapide présente de nombreux avantages par rapport au four conventionnel. Il permet de diminuer le budget thermique des substrats car les durées de montée et de descente pour un four résistif sont très longues. Ces dernières se comptent en heures contre quelques secondes pour le procédé thermique rapide.

Les substrats sont traités dans de meilleures conditions de pureté car les parois du réacteur sont maintenues à basse température, environ 300 K, pour limiter leur « mémoire ». Les parois chaudes du tube de quartz du four conventionnel se recouvrent progressivement d'un dépôt qui finit par se détacher et polluer les substrats. Il présente aussi l'avantage d'avoir une flexibilité dans le traitement des substrats. Il permet également de limiter les pertes en cas de problème puisqu'un nombre restreint de substrats est traité à la fois.

La principale difficulté du procédé thermique rapide est celle d'obtenir une bonne uniformité de la température à la surface des substrats. Elle est due à la présence de gradients de température importants au sein des systèmes thermiques rapides. Le contrôle de la température des substrats avec une grande précision est une autre difficulté. D'autres difficultés peuvent être répertoriées comme :

- ✚ la bonne répétabilité de la température à la surface du substrat.
- ✚ la mesure pyrométrique difficile pour les températures d'utilisation les plus basses car l'émission du substrat est faible.
- ✚ la dégradation accélérée du matériel pour des puissances d'utilisation élevées.

## 2. Applications

Il existe plusieurs types de procédés thermiques rapides. Ils entrent dans les étapes de fabrication de différents composants de microélectronique. De nombreux exemples d'applications sont donnés dans l'ouvrage *Rapid thermal processing of semiconductors* (Borisenko et Hesketh 1997). Concernant la durée des procédés thermiques rapides, elle va de quelques secondes à 1000 secondes comme l'illustre le schéma de la Figure 1-4 (Mattson 2001). Ce schéma indique aussi les températures des substrats. Les applications les plus retrouvées sont commentées ci-dessous

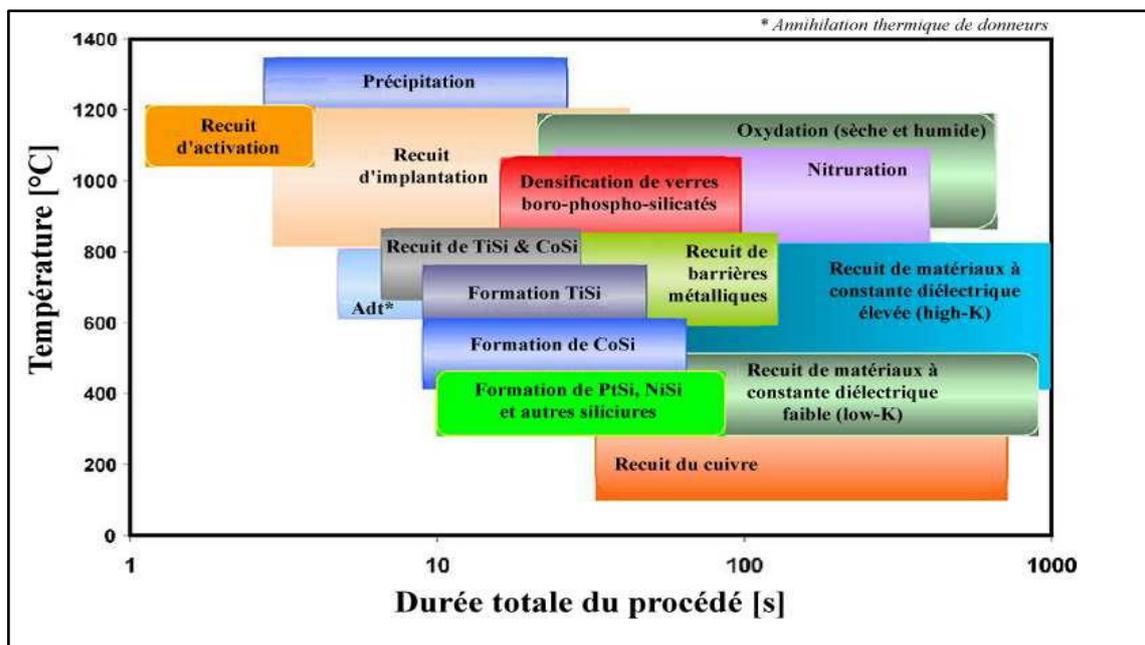


Figure 1.4. Durées et températures des applications RTP.

Le recuit rapide « simple » (Rapid Thermal Annealing : RTA) est utilisé pour la diffusion de dopants implantés en surface. Il permet également d'activer des dopants ou encore de réaliser des recristallisations pour guérir les endommagements dus à l'implantation ionique des

dopants. Réalisé sur des substrats mono ou polycristallin, ce type de recuit intervient dans la fabrication de diodes, de transistors MOS (Metal Oxide Semiconductor), de cellules solaires ... Il peut être utilisé dans la fabrication des diodes lasers sur des substrats d'arséniure de gallium GaAs (matériaux III-V).

Le recuit de siliciuration est effectué à des températures plus basses. Pour le nickel, la siliciuration se fait aux alentours de 250°C. Il consiste à faire diffuser des atomes métalliques (titane, tungstène, nickel, molybdène ...) dans une matrice de silicium. Il entre dans la fabrication des circuits intégrés de type VLSI (Very Large Scale Integration), les contacts ohmiques, les interconnexions, les barrières de diffusion ...

Le recuit d'oxydation (Rapid Thermal Oxidation : RTO) est réalisé à haute température soit par voie sèche, soit par voie humide. Comme le recuit de nitruration (Rapid Thermal Nitruration : RTN), il entre dans la fabrication des mémoires et des transistors à effet de champ de type MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor).

D'autres types d'applications peuvent être rencontrés comme le dépôt chimique à partir de la phase vapeur (Rapid Thermal Chemical Vapour Deposition : RTCVD). Il consiste à envoyer des espèces gazeuses qui réagissent sur la surface du substrat préalablement chauffé à une température pouvant aller de 200°C à plus de 1000°C. Au contact de la surface chaude, les gaz aboutissent à la formation d'un composé solide qui se dépose sur le substrat. Une couche mince est alors formée. Les co-produits gazeux de la réaction sont évacués. Le procédé RTCVD entre notamment dans la fabrication des transistors CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) des microprocesseurs.

## **II. État de l'art sur l'uniformité de la température du substrat de silicium**

Les difficultés pour obtenir une température uniforme à la surface du substrat ont différentes causes (*Yoshio et Doering 2000*).

Tout d'abord, le flux incident provenant des lampes n'est pas homogène sur le substrat. Il y a aussi la présence d'effets au bord du substrat. L'effet le plus important est celui du gradient thermique créé par les parois du réacteur qui sont maintenues relativement froides (de l'ordre

de 300 K). Comme autre effet, on trouve la convection dans le réacteur ou la trop faible réflectivité des parois du réacteur.

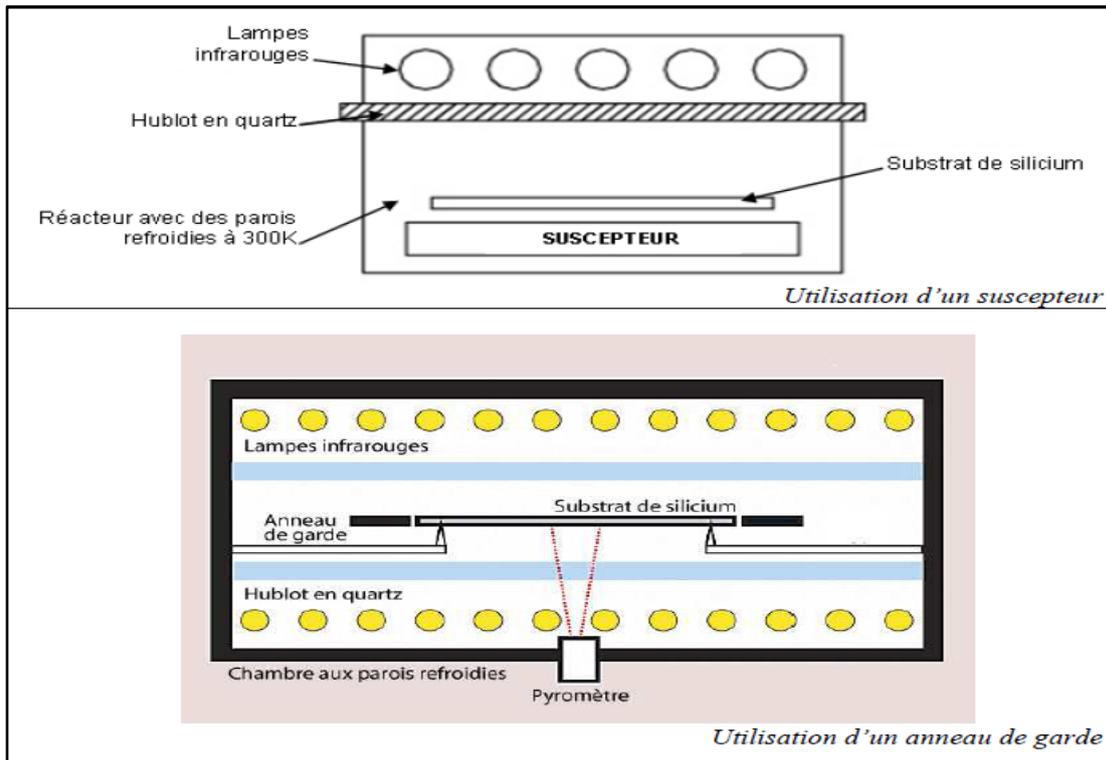
Une difficulté importante est l'élévation de la température du hublot de quartz qui joue sur l'uniformité de la température du substrat. Enfin, on peut signaler les problèmes de contamination, de vieillissement, de stabilité et de placement du substrat.

Des solutions ont été étudiées pour remédier à ces difficultés mais elles ne parviennent pas à le faire de manière totalement efficace. Quelques-unes de ces solutions sont illustrées par la Figure 1-5.

Le chauffage par plusieurs groupes de lampes pilotés séparément permet l'obtention d'un flux uniforme arrivant sur le substrat (*Silva Neto et al. 1998*) (*Acharya et al. 2001*). Cependant sa mise en œuvre pour un équipement nécessite une étude préalable très poussée.

La rotation du substrat permet d'homogénéiser la température circulairement mais l'écart de température entre le centre et le bord du substrat reste inchangé (*Tillman et al. 1998*).

L'utilisation d'un suscepteur permet une meilleure uniformité de la température puisqu'il y a une plus grande inertie thermique (*Yoo et al. 1998*). Cependant, l'ajout d'un suscepteur présente l'inconvénient de réduire le caractère rapide du chauffage. L'utilisation d'un anneau de garde placé autour du substrat permet de réduire les effets au bord (*Kakoschke et al. 1990*). Il présente plusieurs inconvénients comme une manipulation difficile des substrats lors du chargement, une augmentation de la taille du réacteur ou encore une augmentation du risque de contamination des substrats si il y a des dépôts sur l'anneau. Une réduction est aussi obtenue par l'augmentation de la réflectivité des parois du réacteur pour renvoyer le rayonnement au bord du substrat (*Knutson et al. 1993*).



**Figure 1.5.** Exemples de solutions pour améliorer l'uniformité de la température du substrat.

Une autre solution consiste à réduire les gradients thermiques au niveau du hublot. Cette réduction peut être effectuée par plusieurs méthodes.

L'utilisation d'un double hublot avec une circulation d'huile ou d'eau (*Slaoui et al. 2002*) est une solution. L'inconvénient en est que l'eau et l'huile absorbent une partie du rayonnement des lampes. Un refroidissement avec de l'air peut être utilisé (*Dassau et al. 2006*). Son efficacité est moindre car la conductivité thermique de l'air est plus faible.

Une autre solution consiste à utiliser une douche (*Yin et al. 2000*). Cette méthode est utilisée dans le cas d'applications impliquant une injection de gaz. Le gaz, à une température d'environ 300 K, est injecté dans le réacteur à travers des trous dans le hublot. Cette solution est complexe et ne s'applique pas à un recuit simple. Une autre idée fait l'un des objets du brevet de Timans et al. (*Timans et al. 2006*) : ils ont proposé un arrangement au niveau du hublot pour sélectionner les longueurs d'onde à réfléchir, permettant ainsi son refroidissement.

### **III. État de l'art sur la modélisation numérique du chauffage du substrat de silicium**

La modélisation d'un procédé d'un système thermique rapide est complexe car différents phénomènes interviennent en même temps : le chauffage du substrat, le contrôle de la température du substrat, les écoulements, les réactions chimiques et les structures des films traités. Dans une première approche, ces phénomènes peuvent être considérés indépendants. Ils peuvent être couplés par la suite. La modélisation numérique se focalise généralement sur un aspect.

Dans le cadre de la présente thèse, on se penche sur la modélisation numérique du chauffage du substrat de silicium. Ce dernier se fait essentiellement par un transfert de chaleur radiatif. Ce transfert a été modélisé de plusieurs façons.

En écrivant l'équation d'équilibre des flux, une relation entre la puissance des lampes et la température du substrat peut être obtenue (*Balakrishnan et Edgar 2000*). La réponse en température du substrat peut être représentée par un modèle du premier ordre (*Balakrishnan et Edgar 2000*).

Une autre manière de traiter le transfert radiatif consiste à poser l'équation d'équilibre des flux, puis à la résoudre à l'aide de la méthode des différences finies (*Dassau et al. 2006*)(*Chao et al. 2003*) ou par d'autres outils de simulation (*Plévert 1995*). Les trajectoires des rayons peuvent être tracées suivant d'autres méthodes. Citons la méthode DARTS (Direct Approach using Ray Tracing Simulation) (*Habuka et al. 2005*)(*Chang et Hwang 2006*). Il y a également celle des ordonnées discrètes (*Liu et Chen 2000*). Kersch et Morokoff ont proposé une résolution par la méthode Monte-Carlo (*Kersch et Morokoff 1995*). Différents systèmes de chauffage rapide ont été modélisés suivant cette résolution (*Kersch et Schafbauer 2000*) (*Bouteville 2005*)

### **IV. Problématique de ce mémoire :**

L'objectif de ce travail consiste à mieux comprendre les phénomènes impliqués dans le chauffage du substrat de silicium par les lampes infrarouges afin d'améliorer son uniformité de température.

La stratégie pour répondre à cette problématique est la suivante :

\_ Un système thermique rapide est modélisé par simulation numérique dans le cas d'un recuit sans débit de gaz. Le réacteur est considéré dans le cas d'un recuit car seul le chauffage du substrat par les lampes infrarouges fait l'objet de mémoire

Afin de mieux cerner les paramètres du chauffage infrarouge, la réponse en température du filament d'une lampe peut être déduite d'une modélisation plus poussée d'une seule lampe infrarouge du four.

\_ La modélisation réalisée doit être validée à l'aide de résultats expérimentaux de la température du substrat.

\_ Une fois l'étape de validation effectuée, différentes études peuvent être réalisées pour avoir une meilleure connaissance des phénomènes impliqués dans le chauffage du substrat. Par exemple, l'influence du hublot sur le profil de température du substrat peut être appréciée.

Des solutions pour améliorer l'uniformité de la température du substrat peuvent alors être proposées.

Le même schéma de la Figure I-7 peut être repris pour la modélisation poussée d'une lampe infrarouge du four. La modélisation de la lampe est d'abord réalisée, puis validée.

Ainsi, la relation entre la puissance fournie par les lampes et le chauffage du substrat peut être mieux connue.

## **V. CONCLUSION**

Dans ce présent chapitre nous avons donné un aperçu sur le procédé thermique rapide en présentant son principe ; Les avantages et les inconvénients qui lui sont associés et enfin les applications du (RTP).

# 2

---

## Four Recuit Thermique

---

### INTRODUCTION

Le traitement thermique est une succession d'opérations au cours desquelles un produit ferreux solide est soumis en totalité ou partiellement à des cycles thermiques pour obtenir un changement de ses propriétés et/ou de sa structure.

Le recuit consiste à chauffer la pièce à une température déterminée dite température de recuit (le choix de la température dépend des objectifs, elle peut aller de 450 à 1100°C), la maintenir à cette température pendant une durée donnée et refroidir à la vitesse adéquate afin d'obtenir après retour à la température ambiante un état structural du métal proche de l'état d'équilibre stable.

Le recuit permet notamment, d'éliminer ou réduit les contraintes résiduelles du métal liées à une action antérieure (déformation, soudure, etc.) ou un traitement thermique antérieur,

## I- Description



**Figure 2.1.** Four Recuit thermique.

**Figure 2.1.** Anneau

Notre four nous permet de réaliser les techniques et les applications suivantes

- RTA (Recuit Thermique Rapide)
- RTO (Oxydation Thermique Rapide)
- Diffusion thermique RTD
- Salinisation, sulfuration
- Recuit de semi-conducteurs composés
- Nitruration, Silicium
- Cristallisation et Densification

## 1. Recuit Thermique Rapide (RTA)

Le procédé de recuit rapide (sigle RTA en anglais) est un procédé de fabrication qui porte le wafer de silicium à haute température (jusqu'à 1200 °C ou plus) dans un temps particulièrement court, quelques secondes. Les wafers doivent être redescendus en température assez lentement, sinon ils se brisent à cause du choc thermique. De telles montées en température sont obtenues par des lampes à haute intensité ou par chauffage laser.

Ces procédés sont utilisés dans une large variété d'applications dans la fabrication de semi-conducteurs incluant l'activation des dopants, l'oxydation thermique, la mise en forme de métaux et le dépôt par voie chimique.

## 2. Oxydation Thermique Rapide (RTO)

L'oxydation thermique est un procédé qui utilise l'énergie thermique pour oxyder des substances. Les buts de ce type de procédé sont assez divers : destruction de substances dangereuses avec formation de substances inertes, production d'énergie (l'oxydation est en général une réaction exothermique), traitement de surface afin de modifier les propriétés d'un matériau, etc.

- Principe de l'oxydation :

Il existe plusieurs techniques pour obtenir un oxyde :

- 1 - l'oxydation thermique en présence d'oxygène, dite oxydation sèche,
- 2 - l'oxydation thermique par voie humide en présence d'oxygène et de vapeur d'eau,
- 3 - l'oxydation thermique vapeur en présence de vapeur d'eau uniquement,
- 4 - l'oxydation anodique, obtenue par voie électrochimique,
- 5 - l'oxydation plasma, réalisée à l'aide d'un plasma d'oxygène.

### 1- Four d'oxydation thermique humide (filière silicium)/tube quartz

- température maximum égale à 1150°C
- taille des substrats : 50 et 100 mm
- support 25 substrats
- procédé O<sub>2</sub> + H<sub>2</sub> torche
- épaisseur maximum 500 nm

**2 - Four d'oxydation thermique sèche (filière silicium)/tube quartz**

- température maximum égale à 1150°C
- taille des substrats : 50 et 100 mm
- support 25 substrats
- procédé  $O_2 + H_2$
- épaisseur maximum 100 nm

**3 - Four de recuit classique (métaux)/ tube quartz**

- température maximum égale à 1150°C
- taille des substrats : 50 et 100 mm
- support 25 substrats
- procédé  $ArH_2$ , Ar,  $N_2$  et  $O_2$

**4 - Four de recuit classique (diélectrique)/ tube SiC**

- température maximum égale à 1250°C
- taille des substrats : 50 et 100 mm
- support 25 substrats
- procédé Ar,  $N_2$

**5 - Four de recuit et oxydation rapide**

- recuit sous argon hydrogéné
- oxydation sèche  $O_2$
- température maximum égale à 1200°C
- possibilité de recuire des échantillons avec un diamètre maximum de 100 mm
- chauffage grâce à lampes halogènes
- vitesse de chauffage 200°C/s

**3. Diffusion Thermique (RTD)**

Des phénomènes de diffusion sont présents dans de très nombreux domaines de la Physique. La diffusion peut toujours être considérée selon deux approches : du point de vue ondulatoire, et du point de vue particulaire. La diffusion d'atomes d'impureté dans le silicium est une étape nécessaire pour la fabrication ou l'invention de dispositifs de semi-conducteur. Le traitement thermique rapide est une méthode pour la diffusion qui est largement utilisée pour la fabrication de cellules solaires.

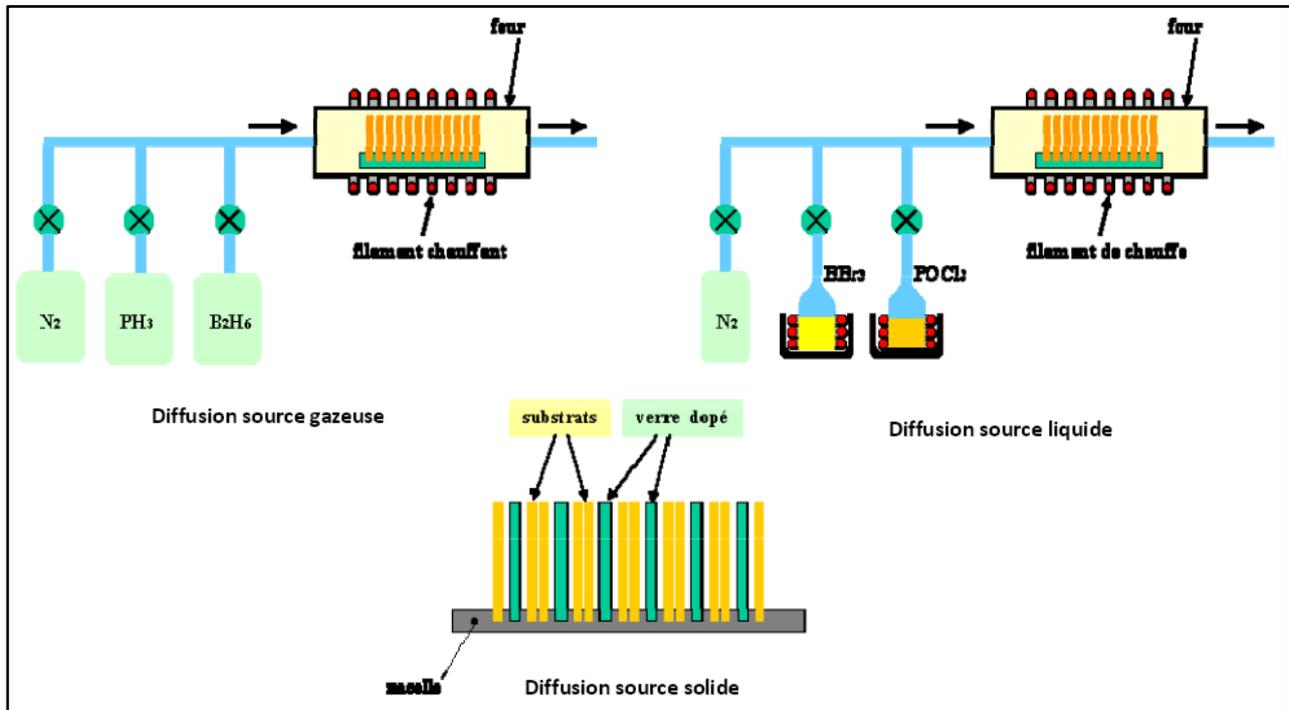


Figure 2.2 : Les différentes sources de Diffusion

#### 4. Salinisation

La salinisation est l'accumulation des sels dans les sols. Elle a pour principales conséquences une augmentation de la pression osmotique, une toxicité pour les végétaux due à l'accumulation de certains ions, dont  $Na^+$ , et une dégradation du sol. C'est une cause de dégradation de l'agriculture et de la biodiversité.

La salinisation des sols est une accumulation de sels solubles à la surface ou en dessous de la surface des sols, à des niveaux nuisibles pour la croissance des plantes et/ou les sols. Elle est due à l'évaporation de l'eau qui laisse sur place les sels qui étaient dissous dans l'eau. La salinisation est le résultat de l'ascension capillaire des eaux souterraines salines ou de l'irrigation avec des eaux salées.

#### 5. Sulfuration

La Sulfuration est l'une des origines probables de la corrosion. En chimie, la sulfuration désigne un procédé qui ajoute du soufre à un composé.

## 6. Nitruration

Le traitement (ou procédé) de nitruration est un traitement superficiel qui consiste à plonger des pièces en alliages ferreux spéciaux (aciers au chrome-aluminium) dans un milieu susceptible de céder de l'azote (autrefois appelé nitre) en surface, à une température comprise entre 300 °C et 580 °C où l'azote peut diffuser de la surface vers le cœur de la pièce. Une fois le traitement effectué on peut observer deux couches :

La couche de combinaison, en surface, d'une épaisseur approximative de 20 µm et la couche initiale celle du substrat. En revanche si le métal contient des éléments d'alliage. La couche de diffusion sera plus épaisse (100 à 1000 µm),

*Il existe 3 procédés :*

- la nitruration en phase liquide : bains de sels à base de cyanures
- la nitruration gazeuse : dissociation de l'ammoniac et décomposition au contact de l'acier.
- la nitruration ionique.

L'augmentation de la dureté en surface apporte des avantages certains : l'usure des pièces va être limitée, mais les pièces vont tout de même garder à cœur leurs caractéristiques mécaniques propres, en ce qui concerne la nitruration, la couche de combinaison a de bonnes propriétés de glissement ce qui peut être appréciable pour les roulements et les engrenages, cette couche pouvant être retirée si nécessaire. On utilise aussi ce procédé pour les tubes de canon de moyen calibre, dans la construction des machines-outils et des vérificateurs. Autres avantages, le durcissement est direct et ne comporte pas de trempe, les déformations sont très faibles et presque toujours faciles à prévoir (quelques microns), les surfaces restant vierges de toute trace d'oxydation, les pièces traitées peuvent être mises en service de suite, l'acier nitruré constitue une solution intéressante chaque fois qu'une très grande dureté doit être alliée à une bonne résistance à la corrosion, il remplace avantageusement l'acier inoxydable 18-8 qui présente une dureté relativement faible.

Par contre la nitruration présente les inconvénients suivants:

- La durée de l'opération est très longue: 100 heures pour atteindre une pénétration maximum de 1 mm,
- La couche nitrurée ne peut supporter aucune déformation plastique.

## 7. Silicium

Le silicium est un élément chimique, de symbole Si et de numéro atomique 14. C'est l'élément le plus abondant sur la Terre après l'oxygène (27,6%). Il n'existe pas à l'état libre mais sous forme de composés : sous forme de dioxyde de silice (dans le sable, le quartz, la diatomée, la cristoballite, etc) ou de silicates (dans les feldspath, la kaolinite, etc). C'est un faible conducteur d'électricité. Il est quasiment insoluble dans l'eau. Il est attaqué par l'acide fluorhydrique (HF) ou un mélange acide fluorhydrique (HF)/acide nitrique (HNO<sub>3</sub>) en fonction de la phase. En tant que semi-conducteur, le silicium est aussi l'élément principal utilisé pour la fabrication de cellules solaires photovoltaïques. Celles-ci sont alors montées en panneaux solaires pour la génération d'électricité.

On distingue trois niveaux de pureté du silicium, désignés en fonction de l'utilisation :

- silicium métallurgique (pureté 99 %), 2N noté MG-silicium (en anglais : metallurgical grade).
- silicium de qualité solaire (pureté 99,999 9 %) ,6N noté SoG-silicium (solar grade) ;
- silicium de qualité électronique (pureté 99,999 99 99 %), 9N noté EG-silicium (electronic grade).

## 8. Cristallisation

La cristallisation est une opération unitaire du génie chimique consistant à isoler un produit sous forme de cristaux. La cristallisation est l'une des opérations physiques les plus anciennes pratiquées, avec l'évaporation de l'eau de mer pour isoler le sel.

### ○ Les objectifs de la cristallisation

L'objectif de la cristallisation peut être :

- isoler un produit pour le récupérer sous forme solide ; c'est en quelque sorte l'inverse d'une distillation ;
- purifier un produit : lors de la cristallisation, les impuretés sont rejetées dans la phase liquide ;

- conférer au produit la bonne forme cristalline (morphologie, taille de particules, structure cristalline...) afin de l'étudier par différentes techniques comme la diffraction des rayons X ou pour lui assurer la stabilité et la biodisponibilité nécessaire dans le cas d'une substance pharmaceutique (v. polymorphisme et forme galénique) ;
  - dans le cas des polymères, accroître les propriétés mécaniques, voir Polymère semi-cristallin.
- **Les modes de cristallisation**

Plusieurs approches sont utilisées :

- transition de phase :
  - cristallisation à partir d'une phase vapeur : sublimation suivie par une condensation solide.
  - cristallisation à partir d'un milieu fondu : fusion suivie par une solidification.
- cristallisation à partir d'une solution :
  - cristallisation par refroidissement : l'abaissement de la température de la solution provoque la diminution de la solubilité du produit en solution ce qui induit sa cristallisation,
  - cristallisation par évaporation : l'évaporation du solvant provoque l'augmentation de la concentration du produit en solution ce qui induit sa cristallisation. C'est cette méthode qui est utilisée dans les marais salants,
  - cristallisation par relargage : l'addition d'un sel ou d'un contre-solvant (qui ne dissout pas ou peu le produit à cristalliser) miscible avec le solvant provoque le relargage du produit en solution ce qui induit sa cristallisation. Idéalement, le contre-solvant solubilise les impuretés.

## 9. Les semi-conducteurs :

La fabrication des systèmes à semi-conducteur englobe les différentes opérations donnant la possibilité de l'élaboration des composants électroniques ayant pour base des matériaux semi-conducteurs. Rentrent dans cette catégorie divers types de composants, une première approche permet déjà de différencier les composants discrets des circuits intégrés.

On peut aussi citer les systèmes semi-conducteurs réalisant aussi des fonctions mécaniques, telles les MEMS, qui utilisent les procédés standard permettant de la réalisation de circuits électroniques (pour des raisons de coûts d'investissement), ou bien utilisent des procédés spécifiques (lithographie électronique SCALPEL IPL EBL SPM, outils à champ proche AFM NIL ou  $\mu$ CP).

Les matériaux semi-conducteurs requièrent une grande qualité cristalline, c'est-à-dire qu'il faut le moins d'impuretés envisageable. Pour obtenir cette grande qualité, une méthode utilisée est de réaliser des couches de matériaux semi-conducteurs sous ultravide ( $10^{-10}$  Torr). Ce genre de vide est obtenu dans un bâti d'épitaxie par jets moléculaires. Ce bâti est généralement constitué de 3 chambres dans lequel le vide est perfectionné d'une chambre à l'autre grâce à des pompes de plus en plus élaborés (pompe à membrane, pompe turbo-moléculaire, pompe ionique, filament de titane). C'est par conséquent la dernière chambre, qui est la chambre de croissance qui possède le meilleur vide. Dans cette chambre, le support qui va servir à réaliser le composant (dans le cas d'une diode laser, ce peut être un support de GaSb), fait face à diverses cellules remplies d'éléments permettant de réaliser des semi-conducteurs (éléments III ou V du tableau de Mendeleïev, par exemple). Ces cellules sont fortement chauffées pour que le matériau puisse être envoyé sur le support sous forme gazeuse. C'est par conséquent pour cela que l'ultravide est nécessaire : la particule envoyée sur le support n'interagira pas avec une autre molécule parasite.

Les semi-conducteurs organiques offrent plusieurs avantages :

- Légèreté : pratique pour la portabilité
- Flexibilité : moins fragiles que les semi-conducteurs inorganiques qui doivent être déposés sur des substrats plans et rigides.
- Facilité de fabrication et auto-assemblage : les semi-conducteurs sont le plus souvent faciles et économiques à fabriquer en laboratoire. Le génie chimique peut mettre au point des molécules qui s'auto-assemblent. Ces méthodes de fabrication tranchent avec les processus onéreux et plus complexes des technologies inorganiques, chauffer à de très hautes températures par exemple.

Cette technologie présente aussi certaines limitations :

- Temps de vie : le temps de vie des systèmes d'affichage organique est plus court que celui des LCD respectant les traditions. Cela est dû au blanchiment (bleaching en anglais) des molécules organiques qui émettent la lumière de couleur.

- Jetable : l'industrie voit dans les semi-conducteurs organiques, grâce à leur faible coût ainsi qu'à leur facilité de fabrication, la possibilité de faire des systèmes électroniques jetables. Il y a lieu de se questionner sur l'aspect écologique de la chose.

## I. Avantages et inconvénients du four de recuit thermique

### Avantages:

- 1.) Le traitement d'un seul wafer de silicium offre une meilleure uniformité, en particulier pour les plaquettes de grandes tailles.
- 2.) le four permet de minimiser la distribution des dopants et aussi la réparation des dommages causés par l'implantation ionique.
- 3.) le fait de garder les parois du réacteur froides, le four permet à plusieurs processus de se produire sans contamination croisée.
- 4.) La photochimie peut être exploitée.

### Inconvénients:

- 1.) Les températures absolues sont presque jamais connues.
- 2.) Les conditions de non-équilibre thermique rendent la modélisation et la prévision difficile.
- 3.) le chauffage uniforme est plus critique que le traitement par four traditionnel en raison du taux élevé de rampe de chauffage.

## II. Applications

Les mécanismes du Flux de chaleur peuvent être liés à l'élévation de température, cela est régi par la loi ci-dessous :

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\dot{q}(T)}{(C_p) \times (\rho) \times (\text{thickness})}$$

(II-1)

Où:  $C_p$  est la chaleur spécifique (une mesure de la quantité d'énergie qu'un matériau peut absorber avant qu'elle ne se manifeste dans une augmentation de la température), et  $\dot{q}$  est la densité de flux de chaleur ( $W/cm^2$ ).

$$\dot{q}(T) = \frac{\text{Watts}}{\text{cm}^2} = \frac{\text{Joules}}{\text{Second cm}^2}$$

(II-2)

### Les Types de RTP

- 1.) Adiabatique: Laser Excimer impulsions (<math>\mu\text{s}</math>) recuire la peau fine de matériau => énormes gradients verticaux de température.
- 2.) Flux thermique: tracer un faisceau focalisé (électronique ou laser) sur une plaquette. => énormes gradients verticaux et latéraux.
- 3.) Isotherme: éclairage optique de la zone spot. => Les gradients de température minimale.

### LOIS PHYSIQUE ET RTP

il existe 3 types de mécanismes pour le flux de chaleur:

**1.) La Conduction:** est le flux de chaleur entre deux corps en contact intime. Le flux de chaleur par unité de surface dans un solide est exprimé en termes de conductivité thermique solides,  $k(T)$ , tel que,

$$\dot{q}(T) = k(T) \frac{\Delta T}{x} \quad \text{(II-3)}$$

Où  $K(T)$  est exprimé en Watts/(cm-K) et  $x$  étant l'épaisseur mesurée entre les deux corps.

### 2.) La Convection:

Est le cas du flux de chaleur entre deux corps à travers un milieu intermédiaire (un gaz dans notre cas).

Pour un gaz ayant un coefficient de transfert de chaleur efficace, la loi du Flux s'écrit comme suite :

$$\dot{q}(T) = h(T_{wafer} - T_{\infty}) \quad (\text{II-4})$$

Notez que ces deux expressions sont linéaires de la température

Où : h est exprimé en unités par des (Watts/cm<sup>2</sup>-K).

### 3.) La radiation:

Est le cas du flux de chaleur entre deux corps par le biais d'un rayonnement et l'absorption de la lumière.

Nous pouvons utiliser la radiation spécifique spectrale qui est égale à la puissance rayonnée par surface par unité de longueur d'onde.

$$M_{\lambda}(T) = \varepsilon(\lambda) \frac{c_1}{\lambda^5 \left( e^{\left( \frac{c_2}{\lambda T} \right)} - 1 \right)} \quad (\text{II-5})$$

$$c_1 = 3.7142 \times 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2, c_2 = 1.4388 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$$

Et  $\varepsilon(\lambda)$  est la longueur d'onde dépendant de l'émissivité

Si  $\varepsilon(\lambda)$  est indépendant de  $\lambda$ , alors la puissance totale rayonnée par unité de surface sera,

$$M(T) = \dot{q}(T) = \varepsilon \sigma T^4 \quad (\text{II-6})$$

Où :  $\sigma = 5.6697 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$

est la constante de Stefan-Boltzmann

**Remarque:**

1). Le changement d'unité de mètre et 2) La puissance rayonnée dépend de la température à l'arrière tandis que conduction et convection dépendent de la température de façon linéaire. Ainsi, le rayonnement est le mécanisme dominant à haute température tout en conduction et convection dominant le flux de chaleur à basse température.

L'émissivité est liée à l'absorption par la loi de Kirchhoff de la conservation de puissance qui indique que, à l'état d'équilibre (température constante et absorbée et puissance émise), la puissance absorbée par une plaque doit être égale à la puissance émise.

Le flux net de chaleur entre deux corps

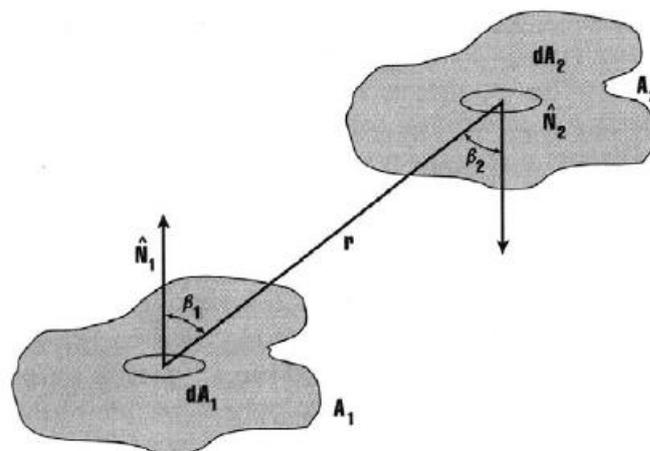
$$q_{1 \to 2} - q_{2 \to 1} = \sigma (\epsilon_1 T_1^4 - \epsilon_2 T_2^4) A_1 F_{A_1 \to A_2}$$

Là où

Est le facteur de vue

$$F_{A_1 \to A_2} = \frac{1}{A_1} \int_{A_1} \int_{A_2} \frac{\cos(\beta_1) \cos(\beta_2)}{\pi r^2} dA_1 dA_2 \tag{II-6}$$

Dans la plupart des surfaces de la vie réelle (même plaques plates ont des épaisseurs finies) cette équation n'est pas très utile, sauf si des calculs informatiques ou des hypothèses simplificatrices sont utilisés.



**Figure 2.3:** Géométrie pour le calcul des facteurs de vue entre les deux surfaces, A<sub>1</sub> et A<sub>2</sub>

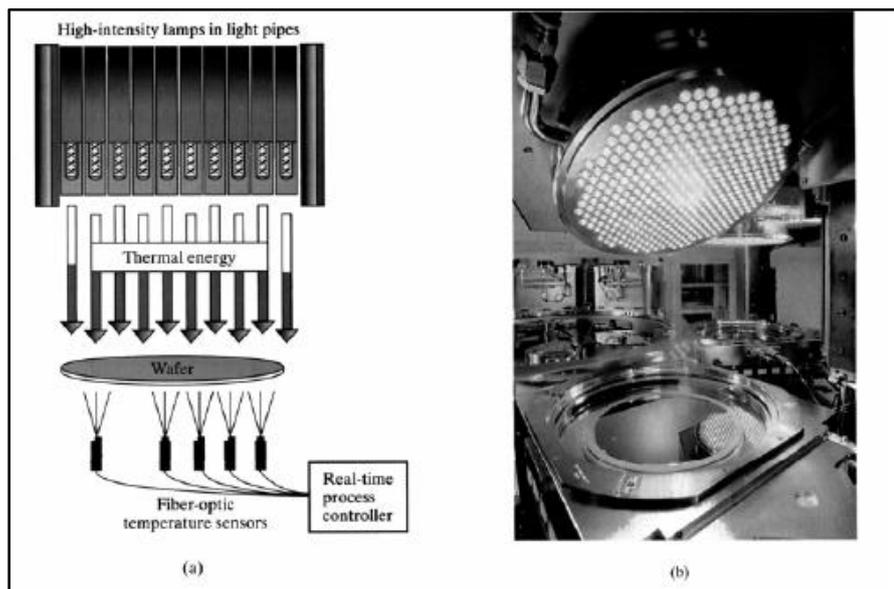
**Matériel pour RTP**

Bulbes peuvent être classés par leur «température de couleur», radiation spécifique spectrale

$$\lambda_{max} = \frac{0,2898 \text{ cm} \cdot \text{K}}{T}$$

La puissance par unité de surface émise par une ampoule de plus, plus la température de couleur (pic de coups d'existence à des longueurs d'onde plus faibles).

**Tungstène ampoules halogènes:** couleur modérée ~ températures densité de puissance de sortie moyenne. En tant que filament de tungstène devient chaud, le W se évapore et commence à recouvrir le verre. Les formes d'espèces halogènes volatiles (gaz à forte pression de vapeur) W-halogène composés qui diffusent vers le filament chaud, pause à part et redéposer W. Ainsi, la vie de l'ampoule est plus obtenue.



**Figure 2.4.** Concept d'un système rapide de traitement thermique (RTP). (b) Appliquée Matériaux 300mm RTP system. (Courtoisie Appliquée Matériaux, Inc.)

**Lampes de décharge d'arc électrique:** un tube de silice fondue contenant un gaz noble (ou mélanges) est allumé avec une impulsion de haute tension pour ioniser le gaz. Une fois l'ionisé bulbe peut transporter un courant continu énorme. L'effet est très source de lumière intense avec la température de couleur très élevée et les spectres de ligne de gaz discrète supplémentaire superposé

sur la radiation spécifique. Bas point de fusion des métaux tels qu'Hg sont également utilisés pour augmenter la puissance de sortie en certaines longueurs d'onde souhaitées.



### Questions d'uniformité:

Arrangements ampoules multizones sont utilisés pour fournir plus de puissance pour wafer bords pour compenser augmentation de la perte de puissance rayonnée et «facteurs de vue» optiques inférieurs. Perte des résultats d'uniformité dans activation de dopants incompatibles, propriétés diélectriques incompatibles, le stress incompatibles résultant en défaut génération et de nombreux autres problèmes.

### Mesure de la température:

*Le plus souvent dans les systèmes RTP d'aujourd'hui une combinaison de pyromètres, acoustique et dans certains cas rares thermocouples dans un suspect sont utilisés.*

1.) pyrométrie mesure l'intensité de la lumière dans une certaine largeur de bande d'exploitation émis à partir d'une plaquette et il se rapporte à la l'existence spectrale.

Les inconvénients sont que la transmission par les gaz de procédé et de la verrerie, des erreurs dans l'émissivité assumée, ramassage du rayonnement de fond des lampes eux-mêmes, et les interférences, même destructrice de couches déposées peut entraîner des erreurs dans la mesure. Plusieurs points de la plaquette doivent être échantillonnés pour régler son uniformité.

2.) Les mesures acoustiques: La vitesse du son est mesurée entre paires de broches de support de quartz la plaquette. La vitesse du son est une fonction linéaire de la température. Ainsi, avec étalonnages appropriés, la température à de nombreuses positions peut être mesurée.

3.) thermocouples dans un suspecter: Les matériaux de conductivité thermique élevée tel que du silicium, Sic ou Graphite suspecter peut être utilisé pour absorber la puissance de la lampe et ré-rayonner une distribution plus uniforme de la lumière à la plaquette à traiter. Dans cette configuration, un thermocouple (jonction métallique dissemblable métaux dont la différence des fonctions de travail produit une tension mesurable qui dépend de la température de la jonction métallique) peut surveiller la température du suspecter. La température de la plaquette peut se trouvent de l'existence totale.

### **III. conclusion**

Dans ce présent chapitre nous avons mis en évidence le fonctionnement du four de recuit thermique en explicitant ce qu'il peut nous offrir comme fonctionnalités ainsi que les phénomènes physiques avec les lois physiques appropriés.

# 3

---

## Etude thermique du four RTP (COMSOL)

---

### INTRODUCTION

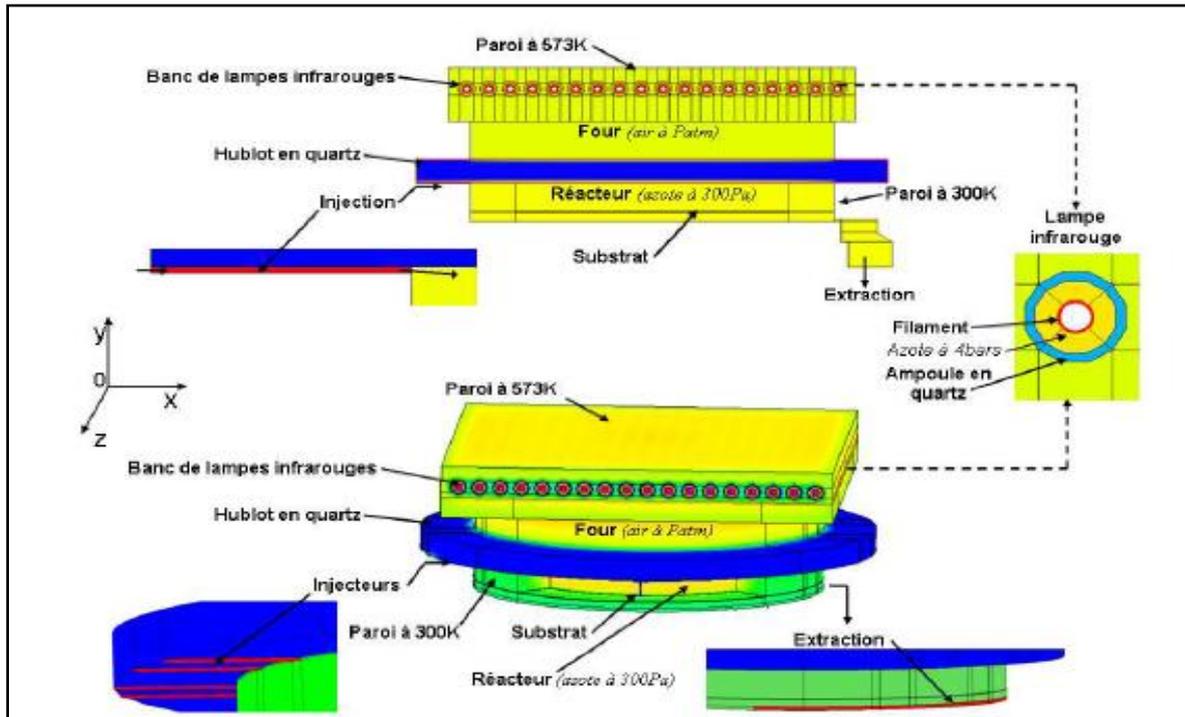
L'objectif de ce chapitre est de présenter la modélisation du système thermique rapide qui a été réalisée.

Deux modèles ont été réalisés : le premier, en deux dimensions (2D) et le second, en trois dimensions (3D).

Dans un premier temps, les modèles sont présentés. La construction de leurs géométries est ensuite décrite. Puis, les équations et les données sont détaillées. Comme le chauffage du substrat se fait principalement par rayonnement, la résolution de l'équation de transfert radiatif est présentée.

## I. Présentation de la modélisation

La modélisation a d'abord été réalisée en **deux dimensions**. La modélisation en **trois dimensions** a été faite après pour pouvoir comparer les résultats. Ces deux modèles sont présentés sur la Figure 3.1.



**Figure 3.1** Modèles de l'AS-One 150 réalisés en deux et trois dimensions

La géométrie en deux dimensions correspond à une coupe dans le plan (Oxy).

Le four où sont disposées les lampes infrarouges contient de l'air à la pression atmosphérique. Comme **le filament de la lampe** est constitué d'un nombre important de spires très rapprochées, sa représentation en trois dimensions a été approximée par **un cylindre creux** de température uniforme pour sa face externe.

## II. Modèle Mathématique

La construction des modèles est une étape longue, surtout pour le cas du modèle en trois Dimensions.

Elle nécessite une réflexion particulière car le choix du maillage va conditionner La bonne résolution numérique du problème.

Seule la géométrie du modèle en deux dimensions est ici décrite. Pour la réalisation de la géométrie en trois dimensions, la construction n'est pas détaillée mais son raisonnement est donné. À partir de ce dernier, il est facile de retrouver les détails de la construction.

### II.1. Modèle en deux dimensions

La Figure 3.2. Montre la géométrie réalisée avec son maillage. Dans son ensemble, ce dernier est régulier. Les cellules sont de forme carrée avec un côté proche de 2,5 mm. Cette taille ni trop grande ni trop faible permet de limiter les erreurs de discrétisation et d'arrondi de la résolution numérique.

À signaler que le maillage dans la région située entre l'injecteur et le bord gauche du substrat est légèrement distordu car il est plus resserré dans l'injecteur. En effet, le maillage est plus fin pour l'injecteur à cause de ses dimensions inférieures. Si on considère des écoulements, ils seront donc pris en compte avec précision

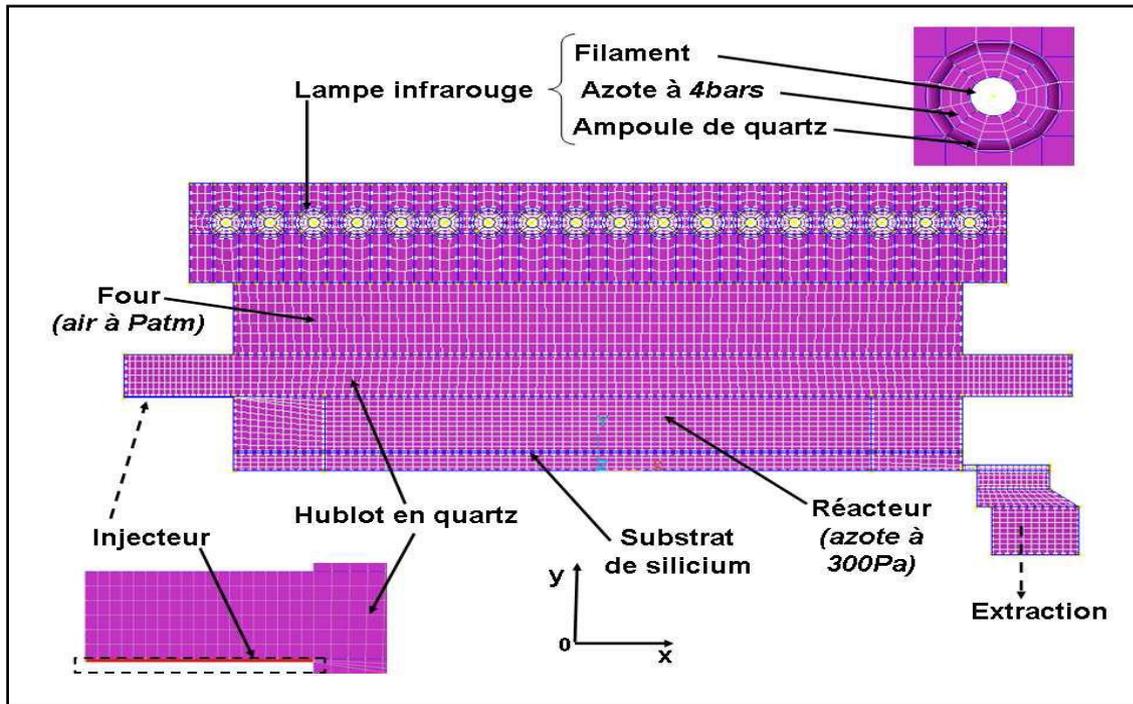


Figure 3.2. Géométrie en deux dimensions de l'AS-One 150 avec son maillage.

## II.2. Modèle en trois dimensions

La Figure 3.3. Donne les différentes parties à considérer dans la construction.

La construction est réalisée à partir d'une forme de base sauf pour la partie supérieure du four.

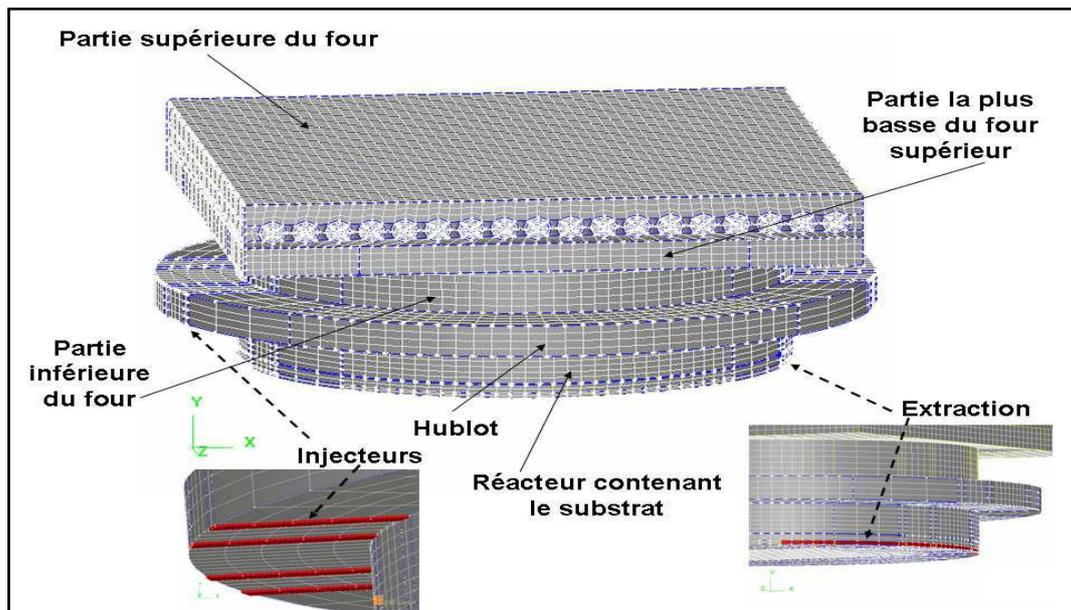
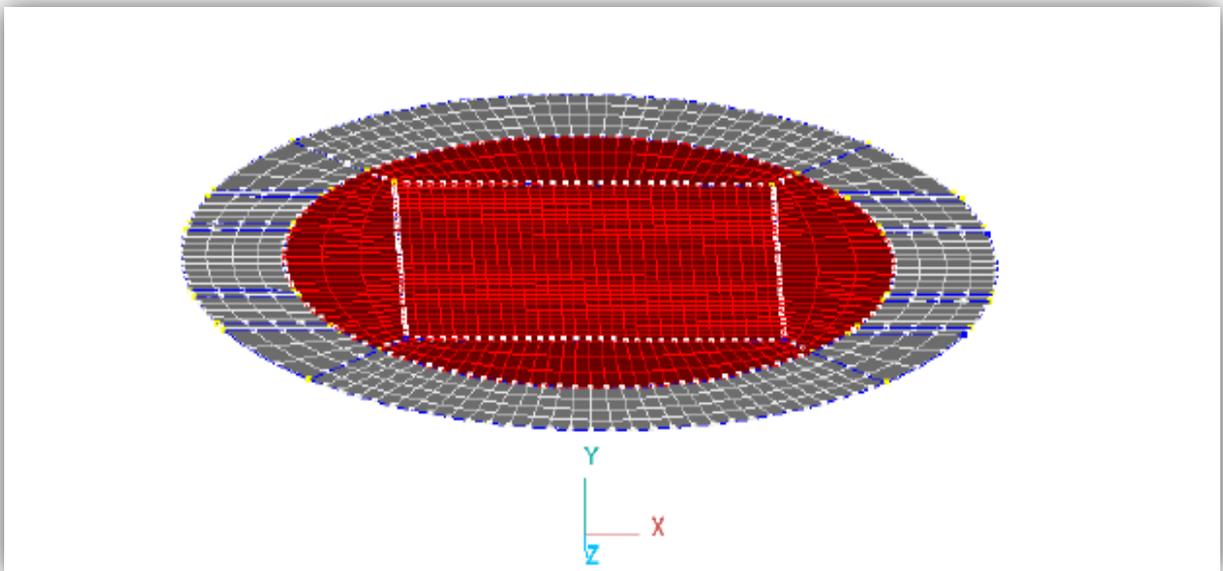


Figure 3.3. Géométrie en trois dimensions de l'AS-One 150 avec son maillage et les Différentes parties de la construction

La forme de base donnée par la Figure 3.4.a un diamètre égal à celui du réacteur.

Le disque en rouge à l'intérieur a le diamètre du substrat. Le carré qui y est inscrit permet d'avoir des cellules de tailles équilibrées pour le substrat. La taille des cellules est choisie ni trop grande ni trop faible pour limiter les erreurs de discrétisation et d'arrondi de la résolution numérique. Il faut bien penser à cette répartition car elle va conditionner la précision des résultats calculés de la répartition en température. Pour information, chacune des cellules a un volume proche de  $27 \text{ mm}^3$  (cube de  $3 \text{ mm}$  de côté). Il y a peu de cellules déformées.



**Figure 3.4.**Forme de base avec anticipation sur le maillage du substrat (en rouge).

### III. Modélisation thermique du RTP

#### III.1. Équations et données de la modélisation

La modélisation de chauffage du substrat de silicium par les lampes infrarouges dans le système thermique rapide nécessite de spécifier les équations de conservation qui régissent:

- Les écoulements en raison de la présence des gaz (l'azote dans le réacteur et les lampes, l'air dans le four)

- Les différents modes de transfert de chaleur. Ces modes sont la convection, la conduction et le rayonnement. Comme le transfert par rayonnement est prépondérant dans le chauffage du substrat de silicium

## III.2. Présentation de la forme générale de l'équation de conservation

Les équations de conservation ou équations de transport général gouvernent la plupart des phénomènes d'écoulements et de transferts thermiques. La forme générale d'une équation de conservation est :

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

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 ;

$S_{\phi}$  est le terme de source ;

$\phi$  correspond à la variable étudiée,  $\rho$  à la densité,  $\vec{V}$  à la vitesse et  $\Gamma$  est le coefficient de diffusion.

## III.3. Modélisation des écoulements

### III.3.1. Lois de conservation

Les écoulements sont régis par les lois de conservation suivantes :

- la conservation de la masse d'un fluide

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \vec{V}) = 0 \quad (\text{III-2})$$

où

$\frac{\partial \rho}{\partial t}$  est la variation de la densité  $\rho$  par rapport au temps ;

$\operatorname{div}(\rho \vec{V})$  est le terme convectif.

- **la seconde loi de Newton** : la masse multipliée par la variation de la vitesse par rapport au temps est égale à la somme des forces appliquées sur le fluide. Les forces de surface (forces de pression) et de volumes (forces de gravité, centrifuge etc.) peuvent s'exercer sur le fluide. Projetée sur l'axe des x, on obtient :

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \vec{V}u) = \frac{\partial(-p + \tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + S_{M_x} \quad (\text{III-3})$$

où

$p$  est la pression statique ;

$\tau_{ij}$  est le tenseur des contraintes ;

$u$  est la composante de la vitesse du fluide suivant x ;

$S_{M_x}$  est le terme de source.

Pour décrire les écoulements des fluides visqueux incompressibles présents dans le réacteur, l'équation III-3 peut être réécrite.

- **l'équation de Navier-Stokes**. Sa projection sur l'axe des x donne :

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{V}u) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \text{div}(\mu \overline{\text{grad}} u) + S_{M_x} \quad (\text{III-4})$$

où

$\mu$  désigne la viscosité dynamique du fluide.

### III.4. Modélisation des transferts de chaleur par conduction et convection

#### III.4.1. Équation de transfert de chaleur

L'équation de transfert de chaleur permet de rendre compte de la transmission de chaleur par conduction dans les solides et par convection dans les gaz. La résolution de l'équation de conservation de l'énergie, équation de conservation de l'enthalpie totale, permet d'évaluer les processus de transfert thermique mis en jeu pour le système considéré.

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho h_0)}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{V}h_0) = & \text{div}(k \cdot \overline{\text{grad}} T) + \frac{\partial p}{\partial t} + \left[ \frac{\partial(u\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(u\tau_{zx})}{\partial z} \right] \\ & + \left[ \frac{\partial(v\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(v\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(v\tau_{zy})}{\partial z} \right] \\ & + \left[ \frac{\partial(w\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(w\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(w\tau_{zz})}{\partial z} \right] \\ & + S_h \end{aligned} \quad (\text{III-5})$$

où

l'enthalpie totale massique est :

$$h_0 = i + \frac{p}{\rho} + \frac{1}{2}(u^2 + v^2 + w^2) \quad (\text{III-6})$$

$i$  est l'énergie interne massique. C'est une variable qui dépend de la densité  $\rho$  et de la température  $T$ ;

$u, v, w$  sont les composantes de la vitesse du fluide suivant  $x, y$  et  $z$ ;

$k$  est la conductivité thermique ;

$p$  est la pression statique ;

## IV. Cas du transfert de chaleur par rayonnement

La résolution de l'équation de transfert radiatif est réalisée en connaissant les propriétés optiques des surfaces et en utilisant la méthode Monte-Carlo (Mazumder et Kersch 2000).

### IV.1. Équation de transfert radiatif

L'équation de transfert radiatif pour un milieu qui émet, absorbe et diffuse de l'énergie par rayonnement (Figure III-5) est présentée dans le chapitre 8 de l'ouvrage Radiative HeatTransfer (Modest 1993). Elle s'écrit en régime permanent :

$$\vec{\Omega} \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(I(r, \Omega)) = -(\kappa + \sigma)I(r, \Omega) + \kappa I_b(r) + \frac{\sigma}{4\pi} \int_{\Omega'=4\pi} I(r, \Omega') \Phi(\Omega' \rightarrow \Omega) d\Omega' \quad (\text{III-7})$$

où

$\Omega$  est la direction de propagation du faisceau ;

$I(r, \Omega)$  est l'intensité du rayonnement. Elle est fonction de la position  $r$  et de la direction  $\Omega$  ;

$\kappa$  et  $\sigma$  sont respectivement le coefficient d'absorption et de diffusion ;

$I_b(r)$  est l'intensité du corps noir à la température du milieu ;

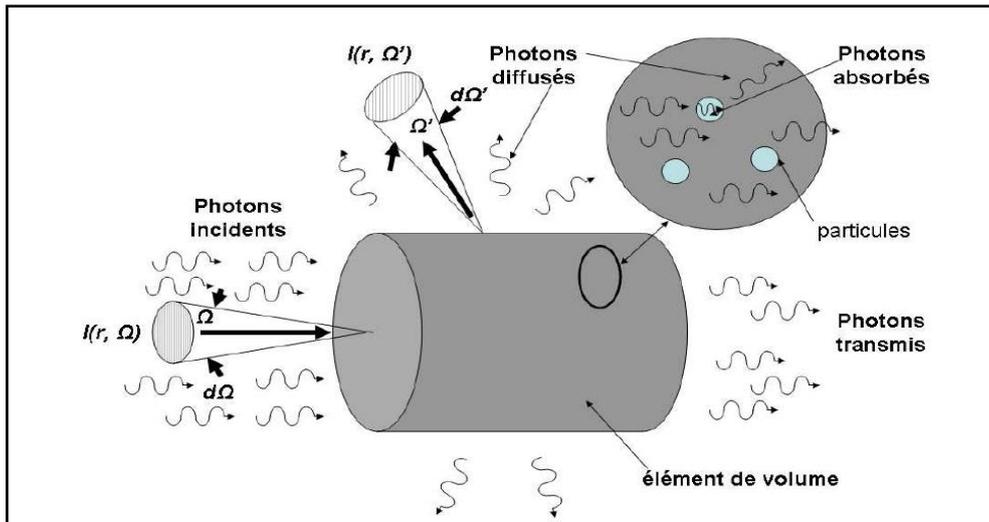
$\Phi(\Omega)$  est une fonction de phase du transfert de l'énergie de la direction d'arrivée  $\Omega'$  à la direction de sortie  $\Omega$  ;

$\vec{\Omega} \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(I(r, \Omega))$  est le gradient d'intensité dans la direction de propagation  $\Omega$  ;

$-(\kappa + \sigma)I(r, \Omega)$  représente respectivement les pertes dues à l'absorption  $\kappa$  et à la diffusion  $\sigma$  ;

$\kappa I_b(r)$  correspond à l'émission du corps ;

$\frac{\sigma}{4\pi} \int_{\Omega'=4\pi} I(r, \Omega') \Phi(\Omega' \rightarrow \Omega) d\Omega'$  est le gain dû à la diffusion.



**Figure 3.5.** Transfert de chaleur par rayonnement pour un élément de solide qui absorbe et diffuse.

À la surface, on a pour l'intensité :

$$I(r, \Omega) = \varepsilon I_b(r) + \frac{\rho}{\pi} \int_{n \cdot \Omega'} |n \cdot \Omega'| I(r, \Omega') d\Omega' \quad (\text{III-8})$$

avec

$I(r, \Omega)$  qui représente l'intensité de l'énergie du rayonnement quittant la surface ;

$\varepsilon$  est l'émissivité de la surface ;

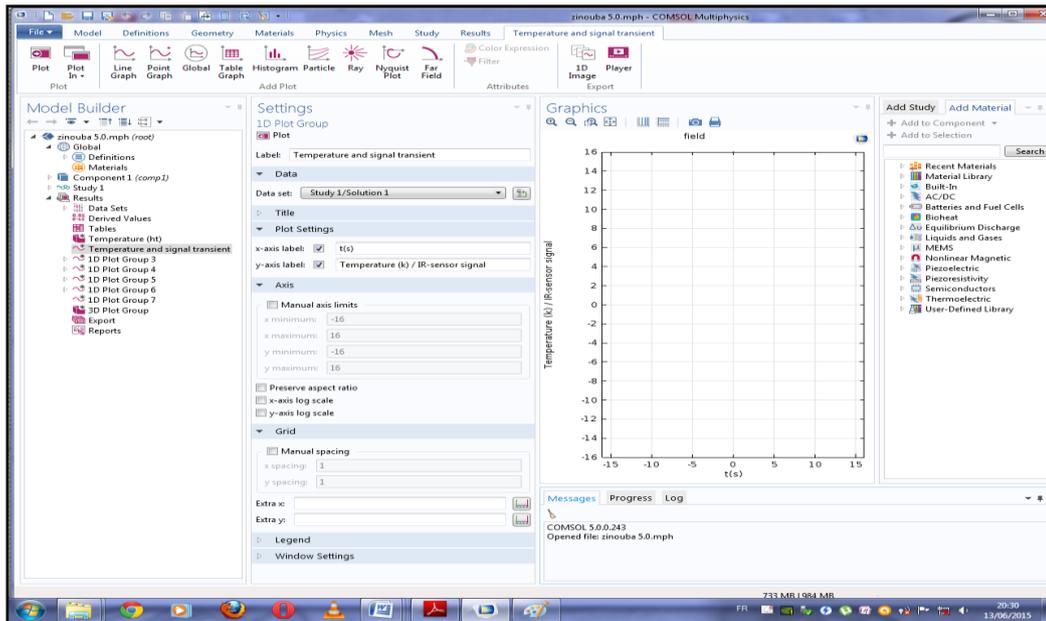
$\rho$  est la réflectivité de la surface ;

$\vec{n}$  est un vecteur unitaire normal à la surface.

## V. Logiciel COMSOL (cas pratique)

La figure ci-dessous présente le software que nous avons utilisé pour modéliser le four a recuit thermique rapide.

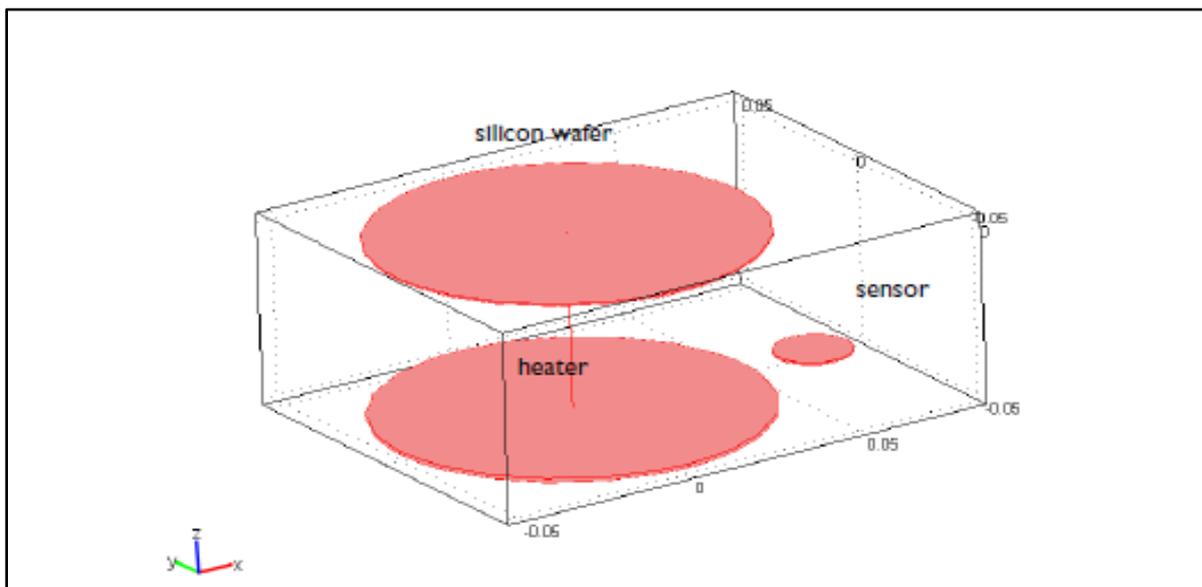
Le logiciel COMSOL version 5.0.0.243. Est un des plus utilisés par les chercheurs a fin de simuler les phénomènes liés aux matériaux et les différents techniques utilisés pour la technologie de la photolithographie.



**Figure 3.6.**Présenté du software COMSOL Version 5.0 utilisé pour la simulation de notre four de recuit thermique.

### V.1.Définition de modèle

Dans de nombreuses applications, RTA fait usage de chauffage à double face, dans lesquelles lampes infrarouges sont positionnées au-dessus et au-dessous de la tranche de silicium. Dans cet exemple, nous modélisons un dispositif de chauffage simple face, comme représenté sur la figure 3.7



**Figure 3.7.**La géométrie du modèle.

Les composants de la figure 3.7 sont contenus dans une chambre avec des murs à température contrôlée avec un point de 400K. Le modèle suppose que ce système physique est dominé par le rayonnement et le refroidissement par convection. Le refroidissement par convection de la plaquette et le capteur de gaz (à 400K) est modélisé en utilisant un coefficient de transfert de chaleur,  $h$  (dans cet exemple fixé à  $20 \text{ W / (m}^2 \cdot \text{K)}$ ). Le problème est régi par l'équation de la chaleur, donnée ci-après ainsi que ses conditions aux limites:

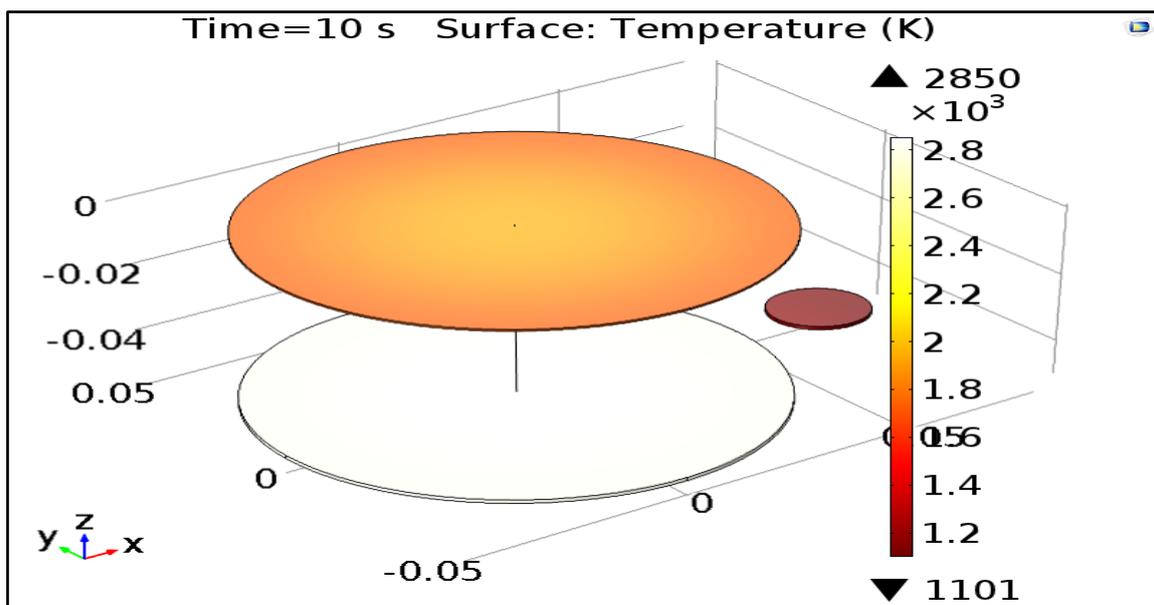
$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k \nabla T) = Q$$

$$-\mathbf{n} \cdot (-k \nabla T) = h(T_{\text{inf}} - T) + (\epsilon / (1 - \epsilon))(J_0 - \sigma T^4)$$

Voici  $\rho$  est la densité;  $k$  désigne la conductivité thermique;  $Q$  représente la source de chaleur de volume;  $\mathbf{n}$  est le vecteur normal de surface;  $T_{\text{inf}}$  est égale à la température du gaz de refroidissement par convection;  $\epsilon$  désigne l'émissivité de la surface;  $J_0$  est l'expression de la radiosité de surface (décrit plus en détail dans le Guide de l'utilisateur Module de transfert de chaleur); et  $\sigma$  est la constante de Stefan-Boltzmann.

**V.2. Résultats et discussion**

La figure 3.8 représente la répartition de la température après 10 s de chauffage.

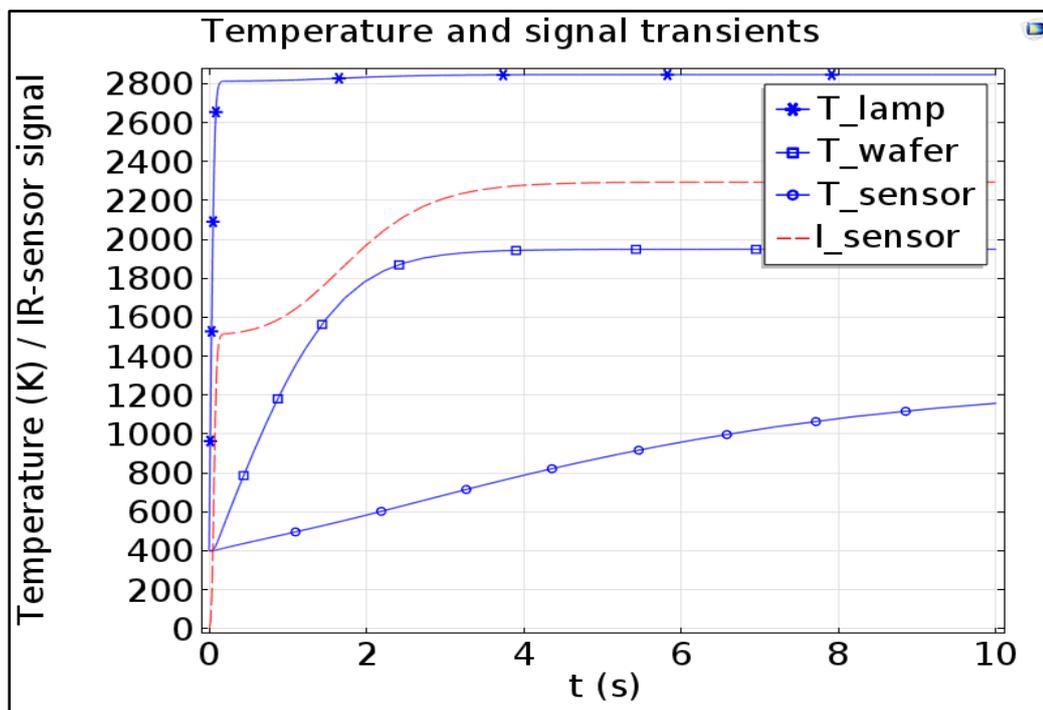


**Figure 3.8.** La température de la lampe, d'un cachet, et le capteur après 10 s de chauffage.

Après 10 secondes, la température de la plaquette et le capteur diffèrent de manière significative: la plaquette est à 1800K, alors que le capteur est à 1100K.

Notez que la distribution de la température dans la plaquette avec un delta de plusieurs centaines de degrés est presque uniforme, et que vous ne pouvez probablement pas faire beaucoup mieux par reconfiguration de la source de chaleur. Toutefois, une telle configuration n'est pas incluse dans ce modèle.

Afin d'étudier la façon dont la température de la sonde reflète celle de la surface de la plaquette, il est utile pour tracer la transition de la température de point central de la surface de la plaquette tournée vers la lampe ( $T_{\text{wafer}}$ ), ainsi que la température en un point situé sur la surface supérieure du capteur ( $T_{\text{sensor}}$ ) (voir Figure 3.9).



**Figure 3.9** Les transitoires de température de la lampe, la tranche de silicium, et le capteur, ainsi que avec la puissance d'irradiation de la surface du capteur.

La température de capteur reflète mal la tranche de silicium.

Cela signifie que le signal d'un thermocouple, placé n'importe où dans le domaine de la sonde de la figure (3.7), est peu d'utilité pour la régulation de ce processus.

- Le détecteur IR-transitoire correspond à la caractéristique de température de la plaquette tout à fait bien.
- Une amplification scalaire permet une mesure de la précision élevée de la température de la plaquette.
- Le facteur d'amplification précise dépend du système et soumis à une obligation d'étalonnage. Cependant, la méthodologie capteur IR présente également des inconvénients. Le signal IR dépend de l'émissivité de la tranche, qui varie avec la température rendant non linéaire de la réponse. En outre, le signal IR est très sensible à la géométrie modifications.

## Conclusion

Dans ce chapitre III nous avons présenté une modélisation du système thermique rapide par le logiciel COMSOL Multiphysics. Cette modélisation nous a permis de décrire les principales composantes du four. On a commencé par établir la géométrie du modèle.

En effet, ils sont contenus dans une chambre avec des murs à température contrôlée. Ceci suppose que le système physique est dominé par le rayonnement et le refroidissement par convection. Le refroidissement par convection de la plaquette et le capteur de gaz est modélisé en utilisant un coefficient de transfert de chaleur,  $h$ . En prenant en compte l'équation de la chaleur ainsi que ses conditions aux limites ; nous avons obtenu une représentation thermique de la répartition de la température après 10 s de chauffage.

La transition de la température de point central de la surface de la plaquette tournée vers la lampe ( $T_{wafer}$ ), ainsi que la température en un point situé sur la surface supérieure du capteur ( $T_{sensor}$ ).

On est arrivés aux conclusions suivantes :

- Le détecteur IR-transitoire correspond à la caractéristique de température de la plaquette tout à fait bien.
- Une amplification scalaire permet une mesure de la précision élevée de la température de la plaquette.

- Le facteur d'amplification précise dépend du système et soumis à une obligation d'étalonnage. Cependant, la méthodologie capteur IR présente également des inconvénients. Le signal IR dépend de l'émissivité de la tranche, qui varie avec la température rendant non linéaire de la réponse. En outre, le signal IR est très sensible à la géométrie modifications.

# Conclusion

---

La fabrication des dispositifs électroniques nécessite un usinage spécial et des étapes importantes à suivre, le recuit thermique est un des plus importants des processus dans le monde des sciences des matériaux et spécialement les semi-conducteurs.

Le chauffage d'un substrat de silicium dans un système thermique rapide (RTP : Rapid Thermal Process) est mieux connu. Les objectifs de ce travail sont les suivants :

Pour mieux comprendre les phénomènes impliqués dans la relation entre le chauffage des lampes et le profil thermique du substrat, on a décrit les principales composantes du four. On a commencé par établir la géométrie du modèle.

Comme hypothèse de départ, le système est dominé par le rayonnement et le refroidissement par convection. Le refroidissement par convection de la plaquette et le capteur de gaz est modélisé en utilisant un coefficient de transfert de chaleur. Nous avons obtenu une représentation thermique de la répartition de la température après 10 s de chauffage.

On est arrivés aux conclusions suivantes :

- Le détecteur IR-transitoire correspond à la caractéristique de température de la plaquette tout à fait bien.
- Une amplification scalaire permet une mesure de la précision élevée de la température de la plaquette.
- Le facteur d'amplification précise dépend du système et soumis à une obligation d'étalonnage. Cependant, la méthodologie capteur IR présente également des

inconvenients. Le signal IR dépend de l'émissivité de la tranche, qui varie avec la température rendant non linéaire de la réponse. En outre, le signal IR est très sensible à la géométrie modifications.

Comme perspectives, nous proposons de réaliser un processus de recuit thermique d'une plaquette de silicium en utilisant un système de recuit thermique rapide, type AS-One 150.

## Bibliographies

- [1] Pierre-Olivier Logerais, "Etude du chauffage d'un substrat de silicium dans un système thermique rapide ( RTP : Rapid Thermal Process ) Docteur I ' École Nationale Supérieure d ' Arts et Métiers," *Sciences-New York*, 2013.
- [2] Acharya, N., V. Kirtikar, S. Shooshtarian, H. Doan, P.J. Timans, K.S. Balakrishnan, K.L. Knutson, (2001), *Uniformity optimization techniques for rapid thermal processing systems*, IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, 14 (3), pp. 218-226.
- [3] Balakrishnan, K.S., T.F. Edgar, (2000), *Model-based control in rapid thermal processing*, Thin Solid Films, 365, pp. 322-333.
- [4] Borisenko, V. E., P.J. Hesketh, (1997), *Rapid thermal processing of semiconductors*, Plenum Press, New York.
- [5] Bouteville, A., (2005), *Numerical simulation applied to Chemical Vapour Deposition process, Rapid Thermal CVD and spray CVD*, Journal of Optoelectronics and Advanced Materials, 7 (2), pp. 599-606.
- [6] Chang, P.C., S.J. Hwang, (2006), *Simulation of a rapid surface heating for injection molding*, International Journal of Heat and Mass Transfer, 49, pp. 3846-3854.
- [7] Chao C.-K., S.Y. Hung, C.C. Yu, (2003), *The effect of lamps radius on thermal stresses for Rapid Thermal Processing system*, Journal of Manufacturing Science and Engineering, 125, pp. 504-511.
- [8] Dassau, E., B. Grosman, D.R. Lewin, (2006), *Modelling and temperature control of rapid thermal processing*, Computers and Chemical Engineering, 30, pp. 686-697.
- [9] Habuka, H., T. Wada, T. Sakurai, T. Takeuchi, M. Aihara, (2005), *Heat balance evaluation for rapid thermal processing system design*, Journal of the Electrochemical Society, 152 (12), pp. 924-928.
- [10] Kakoschke, R., E. Bussmann, H. Foell, (1990), *Modelling of wafer heating during rapid thermal processing*, Applied Physics A: Solids and Surfaces, 50, pp. 141-150.
- [11] Kersch, A., W.J. Morokoff, (1995), *Transport Simulation in Microelectronics*, Birkhauser, Bâle.
- [12] Kersch, A., T. Schafbauer, (2000), *Thermal modelling of RTP and RTCVD processes*, Thin Solid Films, 365(2), pp. 307-321.

- [13] Knutson, K., S.A. Campbell, F. Dunn, (1993), *Three dimensional temperature uniformity modelling of a rapid thermal processing chamber*, Materials Research Society Symposium Proceedings, 303, pp. 211-215.
- [14] Liu, J., Y.S. Chen, (2000), *Prediction of surface radiative heat transfer using the modified discrete transfer method*, Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals, 38 (4), pp. 353-367.
- [15] Mattson, B., P.J. Timans, S.P. Tay, D.J. Devine, J. Kim, (2001), Proceedings on 9th International Conference on Advanced Thermal Processing of Semiconductors-RTP 2001, p. 13., D.P. DeWitt, J. Gelpey, B. Lojek, Z. Nenyai (Eds.). Plévert, L., (1995), *Cristallisation par recuit rapide du silicium amorphe sur verre*, thèse de doctorat, Université de Rennes I.
- [16] Silva Neto, A.J., M.J. Fordham, W.J. Kiether, F.Y. Sorrell, (1998), *Rapid Thermal Processing*
- [17] *Furnace with Three Heating Zones*, Revista Brasileira De Ciencias Mecanicas/Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences, 20, pp. 532-541.
- [18] Slaoui, A., S. Bourdais, G. Beaucarne, J. Poortmans, S. Reber, (2002), *Polycrystalline silicon solar cells on multiple substrates*, Solar Energy Materials and Solar Cells, 71 (2), pp. 245-252.
- [19] Tillmann, A., S. Buschbaum, S. Frigge, U. Kreiser, D. Löffelmacher, T. Theilig, et al., (1998), *Modelling and Off-Line Optimization of a 300 mm Rapid Thermal Processing System*, Materials Science in Semiconductor Processing, 1, pp. 181-186.
- [20] Timans, J.P., et al., (2006), *Selective reflectivity process chamber with customized wavelength response and method*, brevet : United States Patent 7 115 837, 3 octobre, 2006.
- [21] Yin, C.P., C.C. Hsiao, T.F. Lin, (2000), *Improvement in substrate temperature uniformity and flow pattern in a lamp heated rapid thermal processor*, Journal of Crystal Growth, 217, pp. 201-210.
- [22] Yoo W.S., A.J. Atanos, J.F. Daviet, (1998), *Susceptor-based rapid thermal processing system and its suicide application*, Japanese Journal of Applied Physics, Part 2: Letters, 37(10 part A), pp. L1135-L1137
- [23] [http://www.annealsys.com/docs/ASOne\\_FR\\_AS0300B21-11-02-12-16.pdf](http://www.annealsys.com/docs/ASOne_FR_AS0300B21-11-02-12-16.pdf)
- [24] Dr. Alan Doolittle, G. Tech, "Rapid Thermal Processing Reading, " ECE 6450
- [25] <http://www.futura-sciences.com/magazines/matiere/infos/dico/d/physique-diffusion-1020/>

- [27] <http://www.linternaute.com/dictionnaire/fr/definition/diffusion/>
- [28] <http://www.aquaportail.com/definition-5313-salinisation.html>
- [29] [http://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaire\\_environnement/definition/silicium\\_si.php4](http://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaire_environnement/definition/silicium_si.php4)
- [30] [http://www.univ-setif.dz/Tdoctorat/images/stories/pdf\\_theses/facultes1/IOMP/OKBA%20FOUAD.pdf](http://www.univ-setif.dz/Tdoctorat/images/stories/pdf_theses/facultes1/IOMP/OKBA%20FOUAD.pdf)
- [31] [http://www.physique-et-matiere.com/fabrication\\_des\\_dispositifs\\_a\\_semi-conducteurs.php](http://www.physique-et-matiere.com/fabrication_des_dispositifs_a_semi-conducteurs.php)
- [32] Pierre-Olivier Logerais, "Etude du chauffage d'un substrat de silicium dans un système thermique rapide ( RTP : Rapid Thermal Process ) Docteur I ' École Nationale Supérieure d ' Arts et Métiers," *Sciences-New York*, 2013.
- [33][http://www.hellopro.fr/documentation/pdf\\_soc/2/4/2/491242\\_8897b9525c10661068de8fa13eb6923c.pdf](http://www.hellopro.fr/documentation/pdf_soc/2/4/2/491242_8897b9525c10661068de8fa13eb6923c.pdf)
- [34] <http://www.physique-et-matiere.com/semi-conducteur.php>
- [35] Azzam, R.M.A., N.M. Bashara, (1977), *Ellipsometry and Polarized Light*, Elsevier North-Holland, New York.
- [36] Caratini, Y., (1988), *Développement d'un four de recuit rapide, application à la croissance et à la nitruration de couches minces d'oxydes sur silicium*, thèse de l'Institut National Polytechnique de Grenoble.
- [37] CFD Research Corporation, (2007), *CFD'ACE (U) Module Manual*, Version 2007, Huntsville.
- [38] CFD Research Corporation, (2007), *CFD'ACE (U) User Manual*, Version 2007, Huntsville.
- [39] Glassbrenner, C.J., G.A. Slack, (1964), *Thermal Conductivity of Silicon and Germanium from 3°K to the Melting Point*, Phys. Rev, 134, 4 A, pp. 1058-1069.
- [40] Incropera, F., D.P. Dewitt, (1996), *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, John Wiley and Sons, New York.
- [41] Kersch, A., W.J. Morokoff, (1995), *Transport Simulation in Microelectronics*, Birkhauser, Bâle.
- [42] Mazumder, S., A. Kersch, (2000), *A fast Monte Carlo scheme for thermal radiation in semiconductor processing applications*, Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals, 37,

pp. 185-199.

[43] Modest, M.F., (1993), *Radiative Heat Transfer*, McGraw-Hill, New York.

[44] A.T. Fiory, "Methods in Rapid Thermal Annealing," *Proc. 8th Int'l Conf. Advanced Thermal Processing of Semiconductors* (RTP 2000), <http://web.njit.edu/~fiory/Papers/RapidThermalAnnealing00.pdf>, pp. 15–25.

**[45] Model Library path:**

Heat\_Transfer\_Module/Process\_and\_Manufacturing/thermal\_annealing