



ELSEVIER

Chemical Engineering Journal 72 (1999) 171–182

Chemical
Engineering
Journal

Application des réseaux de neurones à la modélisation des réacteurs de LPCVD: dépôt de silicium dopé in situ au bore

K. Fakh-Eddine, M. Cabassud*, M.V. Lann, J.P. Couderc

Laboratoire de Génie Chimique – UMR 5503 CNRS, Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs de Génie Chimique 18, chemin de la Loge, 31078, Toulouse-Cedex 4, France

Received 23 February 1998; received in revised form 14 May 1998; accepted 1 October 1998

Résumé

L'objectif de ce travail est de développer un modèle de simulation des réacteurs de LPCVD susceptible d'être utilisé pour l'estimation en ligne de l'épaisseur du semi-conducteur déposé sur chaque plaquette de la charge, en vue de la conduite de ces réacteurs. Pour cela, nous présentons une nouvelle approche de la modélisation des réacteurs de LPCVD. Le réacteur est fractionné en éléments de base, dont le fonctionnement est modélisé par un réseau de neurones. Dans une première partie, nous montrons que le modèle par réseaux de neurones est apte à simuler correctement le comportement du réacteur pour des conditions isothermes. Les résultats les plus intéressants sont la possibilité de garder le même réseau pour simuler des opérations non-isothermes, ainsi que lorsqu'on fait appel à des injecteurs de gaz réactifs dans le réacteur. Dans une dernière partie, nous montrons comment on peut utiliser ce modèle pour déterminer des conditions opératoires conduisant à des dépôts de même épaisseur sur toute la charge. © 1999 Elsevier Science S.A. All rights reserved.

Mots-clé: Semi-conducteur; Réacteurs; LPCVD

1. Introduction générale

L'utilisation du procédé de dépôt chimique à partir d'une phase vapeur (en abrégé CVD, pour chemical vapor deposition), pour élaborer diverses couches minces, d'isolants, de conducteurs ou de semi-conducteurs, devient de plus en plus fréquente et ce procédé joue un rôle essentiel dans l'industrie électronique et micro-électronique.

Parmi les appareils de CVD, le réacteur tubulaire horizontal à parois chaudes est utilisé de manière privilégiée. Son intérêt industriel ne cesse de croître, et il constitue l'outil d'usage le plus courant, notamment pour les opérations à basse pression (LPCVD) autour de 100 Pa. Ce type de réacteur fonctionne dans une gamme de température allant de 580°C à 630°C (pour le silicium). Il est composé d'un tube en quartz horizontal (Fig. 1), dont la chauffe est assurée par des résistances électriques, enroulées à sa périphérie et agencées en trois zones indépendantes. La régulation de la température est effectuée à $\pm 0.5^\circ\text{C}$ dans la zone centrale (zone isotherme du réacteur). Les portes avant et arrière du réacteur, en acier inoxydable, sont refroidies par circulation d'eau afin de garantir la tenue et la bonne

étanchéité des joints. Les gaz réactifs et gaz de dilution sont introduits, à une extrémité du réacteur et circulent jusqu'à l'autre extrémité où ils sont évacués par les dispositifs de pompage et de mise sous vide. Les substrats à recouvrir sont des plaquettes rondes et plates disposées parallèlement les unes derrière les autres sur un support appelé nacelle, et perpendiculaires à l'axe du cylindre et aux flux gazeux.

Les impératifs essentiels pour les industriels de la micro-électronique concernent l'uniformité d'épaisseur et la qualité des films, tant au niveau de chaque substrat que sur la totalité de la charge admise à l'intérieur du réacteur. Précisons que les couches minces sont souvent dopées, c'est à dire qu'on introduit une quantité contrôlée d'atomes d'une autre espèce afin de donner au silicium déposé la conductibilité électrique désirée.

Pratiquement jusqu'à aujourd'hui, la conception des équipements industriels, puis la sélection de leurs conditions d'exploitation ont été réalisées par des méthodes empiriques, à l'aide de séries longues, complexes et onéreuses d'essais expérimentaux. Si cette approche a permis des progrès considérables, il faut bien reconnaître qu'elle a atteint ses limites et ne permet plus de résoudre dans des conditions satisfaisantes, les problèmes de fabrication, de plus en plus complexes, qui résultent de la miniaturisation

*Corresponding author. Tel.: +33-5-62-25-23-00; fax: +33-5-62-25-23-18; e-mail: michel.cabassud@ensigct.fr

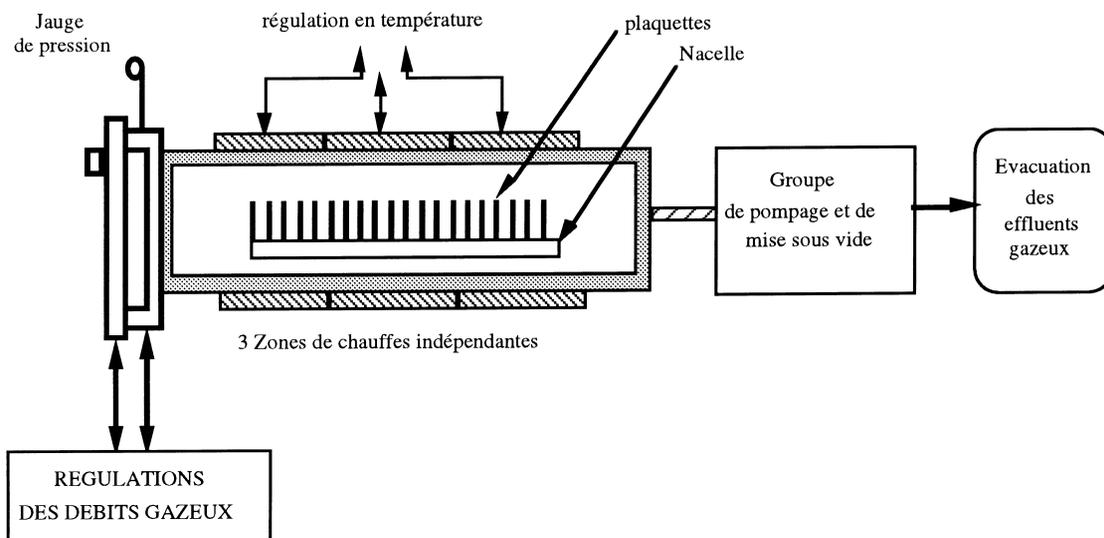


Fig. 1. Schéma de principe d'un réacteur tubulaire horizontal à murs chauds.

des composants électroniques, de l'augmentation des capacités de production et de la baisse continue des prix.

Dès le début des années 80, quelques groupes de chercheurs ont orienté leurs travaux vers une approche plus scientifique, qui analyse et met en équation les phénomènes physico-chimiques essentiels impliqués par la CVD et qui regroupe toutes ces connaissances pour constituer des modèles de simulation numérique de comportement de ces équipements. Après une longue phase de développement, cette approche semble devenir, aujourd'hui, opérationnelle, du moins pour certains types de dépôt d'usage très courant. Une des limitations, cependant, qui s'oppose à certaines utilisations pratiques, réside dans la longueur des temps de calcul.

L'objectif de ce travail est d'associer aux études que nous venons d'évoquer des réseaux de neurones avec l'objectif de créer ainsi une procédure permettant de réaliser des simulations avec des temps de calcul très courts et avec une grande capacité de traitement de données. L'intérêt étant de pouvoir utiliser le modèle en-ligne comme capteur logiciel.

2. Réseaux de neurones

Leur propriété de non-linéarité ainsi que leurs capacités de généralisation et de traitement d'informations brutes ou bruitées rendent les réseaux de neurones intéressants pour traiter de nombreux types de problèmes. En génie des procédés [1], les principaux domaines d'application sont la modélisation, la détection et le diagnostic de pannes ainsi que la commande des procédés [2].

Les réseaux de neurones que nous avons mis en oeuvre sont de type multicouche unidirectionnel. Ce type de réseau correspond à un "outil de traitement de l'information" composé de fonctions élémentaires non-linéaires identiques (les neurones) fortement connectées entre elles. Les neu-

rones sont organisés en couches (Fig. 2(a)) et un poids est associé à chaque connexion entre neurones. L'information est propagée à travers les couches, de la couche d'entrée vers celle de sortie. Ainsi, pour un vecteur d'informations en entrée donné, le réseau calcule le vecteur de sortie en fonction de l'ensemble des poids des connexions et à partir d'un ensemble de calculs intermédiaires réalisés par chaque neurone.

La sortie k de la couche 1 (y_k^1) (Fig. 2(b)) dépend des sorties de tous les neurones de la couche précédente et des poids associés au neurone k .

Si L représente le nombre de couches du réseau, et N_l le nombre de neurones de la couche d'indice l , les calculs réalisés par chaque neurone peuvent s'écrire:

$$y_k^l = f \left(\sum_{i=1}^{N_{l-1}} y_i^{l-1} W_{i,k}^{l-1} + W_{N_{l-1}+1,k}^{l-1} \right)$$

avec $l \in [2, L], k \in [1, N_l]$

$W_{i,k}^{l-1}$ correspond au poids associé à la connexion entre le neurone k et le neurone i de la couche précédente.

$W_{N_{l-1}+1,k}^{l-1}$ correspond au poids affecté à une entrée supplémentaire constante et égale à 1. Ce terme appelé biais est utilisé pour 'décaler' la fonction d'activation f .

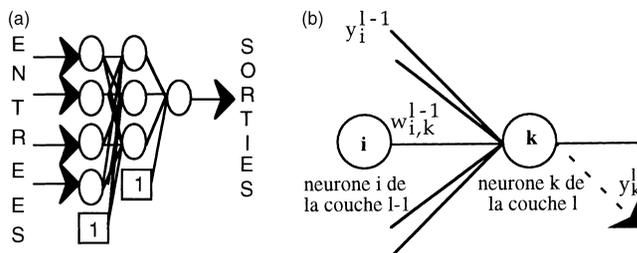


Fig. 2. (a) Structure d'un réseau multicouches, (b) Connexions au niveau d'un neurone.

La fonction f est généralement choisie continue et non-linéaire. Elle doit être dérivable pour pouvoir appliquer la ‘rétropropagation’. Dans ce travail, nous avons utilisé la fonction sigmoïde bornée entre 0 et 1.

$$f(x) = \frac{1}{1 + \exp(-x)}$$

Les neurones des couches intermédiaires (ou cachées) permettent d’augmenter le nombre de paramètres et le caractère non-linéaire du réseau.

De nombreuses applications ont montré les réelles capacités des réseaux de neurones à modéliser des phénomènes fortement non-linéaires, complexes ou bruités. La détermination des poids des connexions (‘apprentissage’ du réseau) repose sur la minimisation d’un critère (F) formé généralement de la somme des carrés des écarts entre les sorties du réseau (O) et les valeurs désirées (T) (apprentissage supervisé). Les données utilisées dans la phase d’apprentissage (base d’apprentissage) sont organisées sous forme de couples de vecteurs I - T où I représente le vecteur des entrées et T le vecteur des sorties désirées (ou cibles).

$$F = \frac{1}{2} \sum_{l=1}^{N_d} \sum_{k=1}^{N_s} (T_k(1) - O(1))^2$$

N_d est le nombre d’exemples et N_s correspond au nombre de sorties du réseau.

L’apprentissage peut être considéré comme une méthode d’identification paramétrique qui permet d’optimiser les valeurs des poids du réseau. Plusieurs algorithmes itératifs ont été développés, parmi lesquels l’algorithme de rétropropagation du gradient reste le plus utilisé [3]. Cet algorithme est facile à implanter mais présente l’inconvénient d’être relativement lent surtout pour des réseaux de grande taille.

Dans le présent travail, cette méthode a été remplacée par la technique de quasi-Newton [4]. Cet algorithme nécessite la valeur de la fonction objectif F et le vecteur des dérivées premières évalué au point solution courant. Ces dernières ont été évaluées analytiquement. La méthode BFGS [5] prend implicitement en compte les dérivées secondes et est donc plus performante que la méthode initiale de rétropropagation. Le nombre d’itérations nécessaire pour converger est nettement plus faible et les temps de calcul réduits d’autant.

Lors de la phase d’apprentissage, les exemples disponibles sont séparés en deux bases. La phase d’optimisation est conduite sur un ensemble d’exemples appelé d’apprentissage. Mais les poids retenus sont ceux correspondant à l’erreur minimum obtenue sur un deuxième ensemble d’exemples appelé base de test. On évite ainsi le phénomène de sur-apprentissage. En effet, si l’on ne considère qu’une seule base, la phase d’optimisation des poids peut amener à une sur-représentation des exemples de cette base, ce qui entraîne par la suite une mauvaise généralisation.

L’application des réseaux de neurones, à la modélisation des réacteurs LPCVD a été déjà utilisée pour un type de dépôt simple, en l’occurrence le dépôt de silicium pur. Cette application nous a permis d’aboutir à de très bon résultats,

dans des fonctionnements isothermes et non-isothermes de ce type d’appareil [6], élément qui nous a encouragé à traiter par la même technique des dépôts beaucoup plus complexes que celui du dépôt de silicium pur, tel que le dépôt de silicium dopé au bore à partir de trichlorure de bore.

3. Silicium dopé au bore

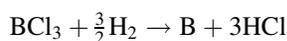
Le dopage des films de silicium déposés est réalisé pour donner à ces films la conductivité électrique désirée. Il consiste à ajouter des doses contrôlées d’atomes particuliers. On distingue plusieurs techniques de dopage, par diffusion, par implantation ionique ou encore le dopage in situ. La mise en oeuvre des deux premières techniques nécessite soit des temps d’opération longs, soit des appareils très coûteux, ce qui constitue un inconvénient majeur.

Le procédé de dépôt in situ, consiste en la codéposition du silicium et du dopant par pyrolyse d’un mélange de gaz source de silicium (SiH_4 , Si_2H_6 , ...) et du dopant (BCl_3 , PH_3 , B_2H_6 , ...). Il permet ainsi de réaliser simultanément les étapes de dépôt de la couche de silicium et d’incorporation du dopant, ce qui fait économiser au moins une étape technologique (implantation ionique ou diffusion des impuretés dopantes dans la couche de silicium) et les équipements correspondants.

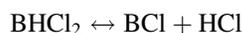
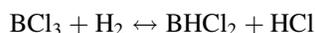
4. Chimie du dépôt de silicium dopé au bore

La plupart des travaux cités dans la littérature sur le dépôt au bore, concernent l’utilisation du diborane (B_2H_6) comme source de bore. Les industriels de la micro-électronique préfèrent travailler avec le trichlorure de bore (BCl_3) à cause de sa stabilité plus forte que celle de son concurrent (B_2H_6), qui se décompose dès la température ambiante ce qui entraîne des problèmes de transport et de stockage (il doit être stocké à une température inférieure à 0°C).

D’après les travaux de Luthardt [7], le dépôt de bore se fait selon le mécanisme de réduction du trichlorure de bore par l’hydrogène:



Michaelidis [8], considère en plus les réactions en phase homogène suivantes:



Dans ce travail, pour le dépôt de silicium, nous considérons la réaction de surface suivante:



La réaction de dopage du bore se limite à la réaction de surface suivante:



Dans la phase gazeuse, il y a création de HCl selon la réaction ci dessous:



5. Caractéristiques du dépôt de silicium dopé au bore

Il est admis que lors d'un dépôt de silicium réalisé à partir de silane, ou d'un mélange contenant du silane et de l'hydrogène, la surface du substrat en silicium est essentiellement recouverte d'hydrogène, ce qui implique que seuls quelques sites restent libres pour l'adsorption d'autres gaz.

Le bore, dopant de type P, possède moins d'électrons sur sa couche externe que le silicium. Sa présence est susceptible de diminuer la densité locale en électrons sur les atomes de silicium en surface autour du site d'adsorption, et donc d'affaiblir les liaisons chimiques entre les atomes de silicium et d'hydrogène [9]. En conséquence, le nombre de sites libres augmente, ce qui favorise l'adsorption des hydrures de silicium, et donc accroît la vitesse de dépôt.

Cette particularité explique la première des deux observations expérimentales réalisées par les auteurs ayant étudié ce dépôt [10–12]: l'adjonction de trichlorure de bore au silane (SiH_4) tend à augmenter de façon importante la vitesse de dépôt du silicium par rapport au cas du dépôt de silicium pur.

D'autre part, la diminution très rapide de la vitesse de dépôt le long de la charge de plaquettes, seconde caractéristique observée par les expérimentateurs, est la conséquence de la production progressive d'acide chlorhydrique. Celle-ci entraîne une inhibition du dépôt de bore et réduit donc l'effet électronique et ses conséquences sur le nombre de sites libres pour l'adsorption du silane et le dépôt de silicium.

Précisons que plusieurs auteurs [13–15] ont observé cet effet inhibiteur sur le dépôt de bore alors que l'influence sur l'adsorption de silane reste négligeable tant que la température demeure inférieure à 900°C [16].

6. Modélisation des réacteurs de LPCVD

Un modèle mathématique nommé (CVDI) a été développé dans notre laboratoire [17]. Il effectue une modélisation globale des réacteurs LPCVD à murs chauds et est limité aux dépôts conduisant naturellement à des épaisseurs uniformes sur chaque plaquette. Il est en particulier applicable au cas des dépôts de silicium pur et dopé au bore, puisque pour ces exemples, des études ont démontré l'uniformité du dépôt sur la plaque.

Dans le cas de son utilisation pour traiter des dépôts de silicium dopé au bore, ce modèle regroupe l'ensemble des caractéristiques relatives à ce type de dépôt. Ce modèle permet de décrire les phénomènes les plus significatifs en

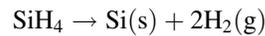
régime chimique, c'est à dire dans des conditions telles que le transfert de matière en phase gazeuse soit rapide par rapport aux réactions chimiques, et considère le volume limité par deux plaquettes successives et les parois latérales du réacteur, comme un espace parfaitement homogène. Dans ces conditions le réacteur apparaît comme une succession d'étages placés en série (correspondant chacun à un étage interplaquette) à composition constante. Dans chaque étage du réacteur, un dépôt se forme sur les faces avant et arrière des deux plaquettes qui le limitent, ainsi que sur les portions associées de tube et de nacelle.

Le modèle CVDI permet de connaître l'évolution, en fonction de l'emplacement des plaquettes dans la charge, des débits de gaz réactifs (silane (SiH_4) et trichlorure de bore (BCl_3)), des vitesses de dépôt de silicium et du bore, et enfin du nombre d'atomes de bore incorporés au dépôt, pour un temps et une surface donnés.

7. Lois cinétiques de dépôt de silicium dopé in situ au bore

Précisons d'abord, qu'on ne trouve, dans la littérature, aucune information précise sur la cinétique du dépôt de silicium dopé in situ au bore. Les hypothèses de base qui ont été retenues pour le modèle CVDI, sont les suivantes:

Le silicium est supposé se décomposer uniquement de façon hétérogène suivant sa réaction de pyrolyse globale.



La loi cinétique a la forme de l'équation de Langmuire–Inshelwood

$$R_{\text{Si-pur}} = \frac{K P_{\text{SiH}_4}}{1 + K_{\text{SiH}_4} P_{\text{SiH}_4} + K_{\text{H}_2} P_{\text{H}_2}^\alpha}$$

où $R_{\text{Si-pur}}$ représente la Vitesse de dépôt ($\text{mol Si/m}^2 \text{ s}$) et P_{SiH_4} et P_{H_2} représentent les Pressions partielles en silane et hydrogène (Pa).

Plusieurs auteurs ont travaillé sur cette équation et proposé des valeurs empiriques des coefficients K , K_{SiH_4} , K_{H_2} , et α . Pour notre travail les données de Wilker, Tuner et Takoudis [18] ont été adoptées.

Comme cela a été mentionné, le rajout de trichlorure de bore au silane influe grandement sur la vitesse de dépôt du silicium. Rappelons que le bore tend à exalter le dépôt, alors que l'acide chlorhydrique formé tend à l'inhiber. Pour quantifier ces deux phénomènes, il a été supposé que le dépôt de silicium dopé au bore suit le même type de loi globale que le silicium pur, mais sa vitesse est affectée de coefficients multiplicatifs appropriés, fonction des concentrations en silane, trichlorure de bore et acide chlorhydrique.

$$R_{\text{Si-dop-bore}} = R_{\text{Si-pur}} K(y_{\text{SiH}_4}, y_{\text{HCl}}, y_{\text{BCl}_3})$$

D'après les travaux de Fresquet [13], le facteur multiplicatif global $K(y_{\text{SiH}_4}, y_{\text{HCl}}, y_{\text{BCl}_3})$ se décompose en

deux termes:

$$K(y_{\text{SiH}_4}, y_{\text{HCl}}, y_{\text{BCl}_3}) = f_{\text{acc}} \left(\frac{y_{\text{BCl}_3}}{y_{\text{HCl}}} \right) f_{\text{inhib}} \left(\frac{y_{\text{HCl}}}{y_{\text{BCl}_3}} \right)$$

Le premier terme f_{acc} traduit l'effet d'exaltation du trichlorure de bore et le second f_{inhib} traduit l'effet inhibiteur de l'acide chlorhydrique. Ils s'écrivent comme suit:

$$f_{\text{acc}} \left(\frac{y_{\text{BCl}_3}}{y_{\text{SiH}_4}} \right) = \ln \left(1 + b_{\text{exalt}} \frac{y_{\text{BCl}_3}}{y_{\text{SiH}_4}} \right)$$

$$f_{\text{inhib}} \left(\frac{y_{\text{HCl}}}{y_{\text{BCl}_3}} \right) = 1 - a_{\text{inhib}} \frac{y_{\text{HCl}}}{y_{\text{BCl}_3}}$$

b_{exalt} : constante déterminée expérimentalement par mesure de la vitesse de dépôt en début de charge où l'influence de l'acide chlorhydrique est faible.

a_{inhib} : constante déterminée empiriquement, à partir d'expériences avec injection d'acide chlorhydrique en entrée, en plus des gaz SiH_4 et BCl_3 .

La loi cinétique ainsi retenue pour le dépôt de silicium dopé au bore est la suivante:

$$R_{\text{Si-dop-bore}} = R_{\text{Si-pur}} \ln \left(1 + b_{\text{exalt}} \frac{y_{\text{BCl}_3}}{y_{\text{SiH}_4}} \right) \left(1 - a_{\text{inhib}} \frac{y_{\text{HCl}}}{y_{\text{BCl}_3}} \right)$$

La cinétique de dépôt du bore a été supposée indépendante de la température et d'ordre 1 par rapport à la fraction molaire du trichlorure de bore (BCl_3).

Des travaux sont en cours dans notre laboratoire pour l'amélioration de ces cinétiques. De plus, en ce qui concerne la modélisation par réseaux de neurones, un apprentissage à partir de résultats expérimentaux sera envisageable dès que ces travaux seront disponibles.

Dans ce travail, les performances de l'approche neuronale sont jugées par rapport aux résultats fournis par le logiciel CVD1. Cela est justifié par le fait que des études antérieures effectuées dans notre laboratoire ainsi que par la société MOTOROLA de Toulouse ont montré que les résultats obtenus avec CVD1 sont en parfait accord avec les résultats expérimentaux [13,14].

8. Paramètres géométriques

Les paramètres géométriques considérés dans cet article sont les suivants: Longueur du réacteur: 2 m; Diamètre du réacteur: 153 mm; Charge de 100 plaquettes de 100 mm; de diamètre placée dans la zone de chauffe; Distance interplaquette: 10 mm.

9. Modélisation du réacteur LPCVD par des réseaux de neurones

L'objectif est de déterminer un modèle neuronal permettant de prendre en compte les phénomènes physique et

chimiques qui interviennent à l'intérieur de l'enceinte réactionnelle et de déterminer les vitesses de dépôt de silicium et de bore sur l'ensemble des plaquettes de la charge. La rapidité de calcul des réseaux de neurones permet d'envisager l'utilisation du modèle neuronal développé comme capteur logiciel d'épaisseur [19] de façon à réaliser le suivi en ligne des épaisseurs déposées sur l'ensemble des plaquettes de la charge en vue de la conduite thermique de ce type d'équipement.

Le réacteur a été fractionné en 10 tronçons de même forme géométrique, chacun contenant 10 plaquettes. Ces tronçons ayant un fonctionnement identique, nous avons établi un réseau de neurones unique pour représenter chacun des tronçons. Ce réseau met en oeuvre trois couches: une couche d'entrée avec sept neurones correspondant aux conditions de fonctionnement: la température T ($^{\circ}\text{C}$), la pression P (Pa), le débit de silane SiH_4 (sccm), le débit de trichlorure de bore BCl_3 (sccm), le débit de gaz de dilution (azote) N_2 (sccm), le débit d'hydrogène H_2 (sccm), et débit d'acide chlorhydrique HCl (sccm), une couche cachée et une couche de sortie qui comprend quatre neurones déterminant les vitesses de dépôt de silicium et de bore sur les plaquettes 3 et 7 qui sont également réparties dans le tronçon considéré.

La base de données a été générée à partir du modèle CVD1 en effectuant un certain nombre de simulations dans des cas de fonctionnement isotherme et en combinant l'ensemble des conditions opératoires représentatives de ce type de dépôt (voir Tableau 1).

Six cents exemples ont été traités, avec un réacteur contenant cent plaquettes, c'est-à-dire dix tronçons ce qui nous a permis d'obtenir une base importante de 6000 résultats, parmi lesquels nous avons réservé 4000 exemples pour la base d'apprentissage et 2000 pour la base de test, choisis d'une façon uniforme dans la base de données.

Le nombre de couches cachées et de neurones sur ces couches sont déterminés pendant la phase d'apprentissage. En pratique, le choix d'une structure neuronale constitue, chaque fois, un cas d'espèce qui ne peut être résolu théoriquement. La structure du réseau est donc déterminée de façon empirique, par essais successifs jusqu'à obtention de performances satisfaisantes.

Deux procédures de modification de structure du réseau neuronal peuvent être envisagées:

Tableau 1
Domaine de conditions opératoires retenu pour la constitution de la base de données

	Valeur minimale	Valeur maximale
Température ($^{\circ}\text{C}$)	540	560
Pression (Pa)	13.3	133.3
Débit SiH_4 (sccm) à l'entrée	200	500
Débit BCl_3^a (sccm) à l'entrée	0.3	3
Débit de N_2 (sccm) à l'entrée	9.7	97

^a BCl_3 dilué à 3% dans l'azote.

La procédure d'élimination, appelée aussi 'destructive'. Dans ce cas, on démarre l'apprentissage avec un réseau surdimensionné. Des neurones sont ensuite éliminés pendant l'apprentissage, le but étant d'obtenir à la fin l'apprentissage un réseau minimal capable de réaliser la tâche demandée.

La procédure de construction qui consiste à commencer l'apprentissage avec un petit réseau et à ajouter des neurones jusqu'à ce que le réseau soit capable d'accomplir la tâche demandée.

Dans ce travail, nous avons adopté cette dernière procédure car elle ne nécessite pas de dimensionnement du réseau a priori. La structure finalement retenue comprend une seule couche cachée constituée de 17 neurones, et l'erreur obtenue avec les 2000 exemples de la base de test est de 0.574×10^{-3} alors que celle obtenue avec les 4000 exemples de la base d'apprentissage est de 0.114×10^{-2} .

Le réseau de neurones élaboré modélise donc avec précision un tronçon de 10 plaquettes. Il est alors possible de simuler le comportement de tout le réacteur comme une succession de tronçons identiques. Pour cela, il faut calculer les débits des gaz réactifs et de dilutions qui, sortant d'un étage donné, vont alimenter l'étage suivant.

Ce calcul est effectué à partir des relations algébriques des bilans de matière en fonction des débits entrant dans le tronçon et des vitesses de dépôt de silicium et du bore calculées par le réseau de neurones.

10. Equations algébriques

Considérons un tronçon à n_w plaquettes et désignons par $S_w = 2\pi r_w^2$, la surface d'une plaquette avec r_w le rayon de la plaquette et $S_i = 2\pi d_{ww} r_i$, la surface de paroi comprise entre deux plaquettes successives avec d_{ww} distance interplaquettes et r_i le rayon du réacteur. La surface totale de dépôt du silicium et du bore dans un tronçon contenant n_w plaquettes est donnée par:

$$S_t = n_w(S_w + S_i)$$

Le réseau de neurones permet de calculer les vitesses de dépôt du bore sur les plaquettes 3 et 7 du tronçon considéré, la vitesse moyenne de dépôt dans un tronçon peut être approximée par: Pour le silicium: $V_{dSi} = (V_3^{Si} + V_7^{Si})/2$ Pour le bore: $V_{dB} = (V_3^B + V_7^B)/2$ Par conséquent, les nombres de moles de silicium et de bore déposés par unité de temps dans un tronçon sont donnés par:

$$F_{Si} = V_{dSi} \vartheta_{mSi} S_t$$

$$F_B = V_{dB} \vartheta_{mB} S_t$$

où ϑ_{mSi} et ϑ_{mB} représentent respectivement les volumes molaires du silicium et du bore.

Comme les débits de gaz sont exprimés dans les conditions normales de température et de pression ($T_0 = 273.15K$ et $P_0 = 101325 Pa$), il est donc nécessaire de formuler les relations dans les mêmes conditions.

$$P_0 V = n R T_0 \quad \text{ou} \quad P_0 Q = F R T_0 \quad \text{avec}$$

$$R = 8.314 \text{ J K}^{-1} \text{ mole}^{-1}$$

Les débits (scm) de silane et de trichlorure de bore consommés pendant la traversée du tronçon sont donnés par:

$$Q_{SiH_4} = F_{Si} \left(\frac{RT_0}{P_0} \right) \times 6 \times 10^7$$

$$Q_{BCl_3} = F_B \left(\frac{RT_0}{P_0} \right) \times 6 \times 10^7$$

alors que les débits des gaz entrant dans le tronçon suivant sont calculés selon:

$$SiH_4 \Rightarrow D_{SiH_4}(j+1) = D_{SiH_4}(j) - Q_{SiH_4}(j)$$

$$BCl_3 \Rightarrow D_{BCl_3}(j+1) = D_{BCl_3}(j) - Q_{BCl_3}(j)$$

D'après la réaction (R1): pour une mole de silane consommée, il y a production de deux moles d'hydrogène H_2 , et d'après (R3) ce dernier réagit avec le chlore Cl_2 produit de la réaction (R2) pour donner l'acide chlorhydrique HCl . D'où les relations suivantes:

$$H_2 \Rightarrow D_{H_2}(j+1) = D_{H_2}(j) + 2Q_{SiH_4}(j) - \frac{3}{2}Q_{BCl_3}(j)$$

$$HCl \Rightarrow D_{HCl}(j+1) = D_{HCl}(j) + 3Q_{BCl_3}$$

Ainsi, pour représenter le réacteur complet, une structure hybride a été développée en associant le réseau de neurones et les relations algébriques. Le réacteur entier est simulé en utilisant autant de fois que nécessaire (10 fois pour 100 plaquettes) le modèle neuronal représentant une zone de 10 plaquettes (Fig. 3). A chaque itération, les débits d'entrée sont calculés à l'aide des équations algébriques que nous venons de présenter.

11. Résultats

Pour valider le modèle développé, des évolutions longitudinales de la vitesse de dépôt du silicium et du bore ont été calculées par CVD1 puis par le modèle neuronal pour différentes valeurs de température, de pression, de débit de silane et de débit de trichlorure de bore (Tableau 2).

Les évolutions de ces vitesses sont représentées sur les Fig. 4(a–b).

Pour confirmer les performances du modèle neuronal, d'autres tests ont été effectués avec des valeurs (Tableau 3) qui ne figuraient pas dans la base de données, Fig. 4(c–d).

Tableau 2

Conditions opératoires utilisées pour le calcul des résultats des Fig. 4(a–b)

Symbole	□	△
Pression (Pa)	53.32	133.3
Température des plaquettes (°C)	540	555
Débit de silane (scm)	350	200
Débit de trichlorure de bore ^a (scm)	10	80

^a BCl_3 dilué à 3% dans l'azote.

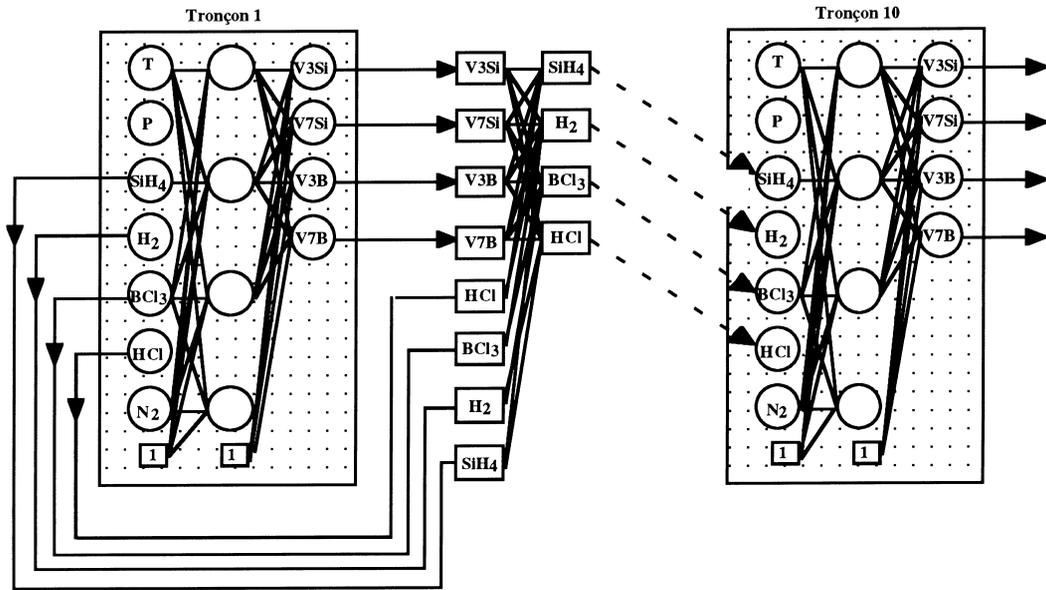
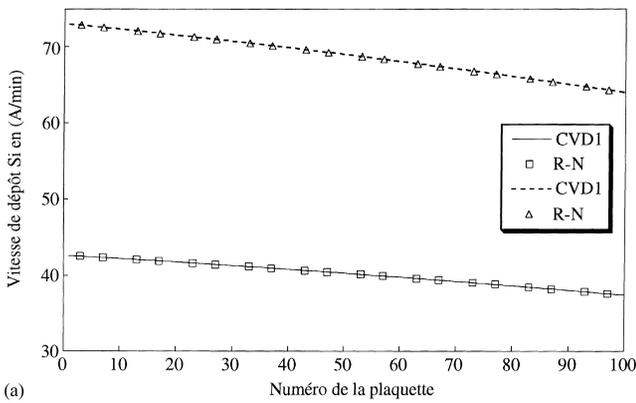
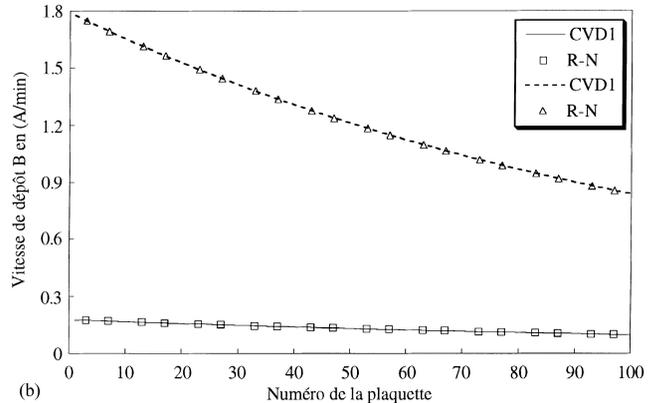


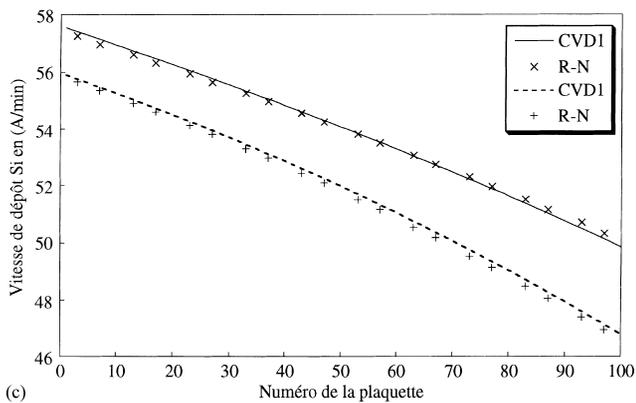
Fig. 3. Structure adoptée pour représenter le réacteur.



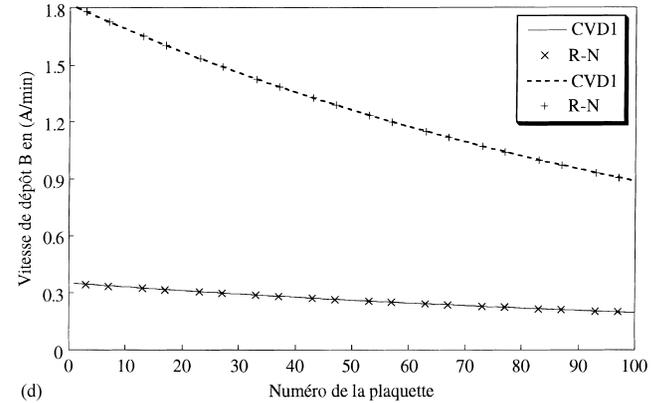
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 4. (a) Vitesse de dépôt du silicium pour différentes conditions opératoires, (b) Vitesse de dépôt du bore pour différentes conditions opératoires, (c) Vitesse de dépôt du silicium avec d'autres conditions opératoires (test), (d) Vitesse de dépôt du bore avec d'autres conditions opératoires (test).

On remarque d'après les figures ci-dessus un bon accord entre le modèle neuronal développé et CVD1. Lorsque la température reste uniforme tout au long du réacteur, la vitesse de dépôt de silicium varie fortement de l'entrée à la

sortie du réacteur. Ceci est dû à la consommation du gaz réactif (silane) et à la formation de l'acide chlorhydrique au cours du dépôt qui inhibe la vitesse à la fin de la charge. Il est donc intéressant d'imposer une rampe de température tout le

Tableau 3
Conditions opératoires (tests) utilisées pour le calcul des résultats des Fig. 4(c–d)

Symbole	×	+
Pression (Pa)	19.995	119.97
Température des plaquettes (°C)	553	548
Débit de silane (sccm)	355	210
Débit de trichlorure de bore ^a (sccm)	20	85

^aBCl₃ dilué à 3% dans l'azote.

long du réacteur pour compenser l'épuisement du gaz réactif.

La capacité du modèle à simuler ce type de fonctionnement non-isotherme a été vérifiée. Pour cela, le profil de température imposé sur la charge a été discrétisé, en supposant que chaque tronçon travaille à température constante.

Une comparaison entre CVD1 et le modèle neuronal est donnée sur les Fig. 5(a–d) pour deux profils de température différents.

On remarque, d'une part, un bon accord entre les résultats du modèle neuronal et ceux de CVD1 et d'autre part, que la vitesse de dépôt de silicium augmente avec la température puisqu'elle est fortement dépendante de cette dernière, alors que celle du dépôt du bore continue à décroître le long de la

charge dû tout simplement à la consommation du trichlorure du bore BCl₃ (sa vitesse de dépôt ne dépend pas de la température).

Il faut noter que les poids du réseau de neurones utilisés pour la simulation d'un tronçon de 10 plaquettes, sont ceux déterminés à partir d'exemples isothermes.

Un autre procédé industriel, adopté par la société Motorola de Toulouse pour compenser cette diminution de vitesse vers la fin de la charge, consiste à utiliser une canne munie d'un certain nombre de perforations (trous), pour injecter, de façon répartie, du trichlorure de bore (ce qui augmente la vitesse de dépôt comme il a été précisé dans le paragraphe précédent). Dans cette étude, nous avons considéré une canne comportant 10 trous équidistants, positionnés à l'entrée de chaque tronçon.

Pour simuler le comportement du réacteur de LPCVD dans une telle situation, nous avons ajouté les débits de BCl₃ et d'azote injectés par chaque trou respectivement aux entrées du trichlorure de bore et d'azote du réseau modélisant le tronçon considéré.

Les conditions opératoires utilisées pour ce type de fonctionnement sont regroupées dans le Tableau 4. Le débit donné dans la dernière ligne du Tableau 4 correspond au débit total injecté par l'ensemble des trous de la canne, le débit étant identique pour tous (soit 4 sccm).

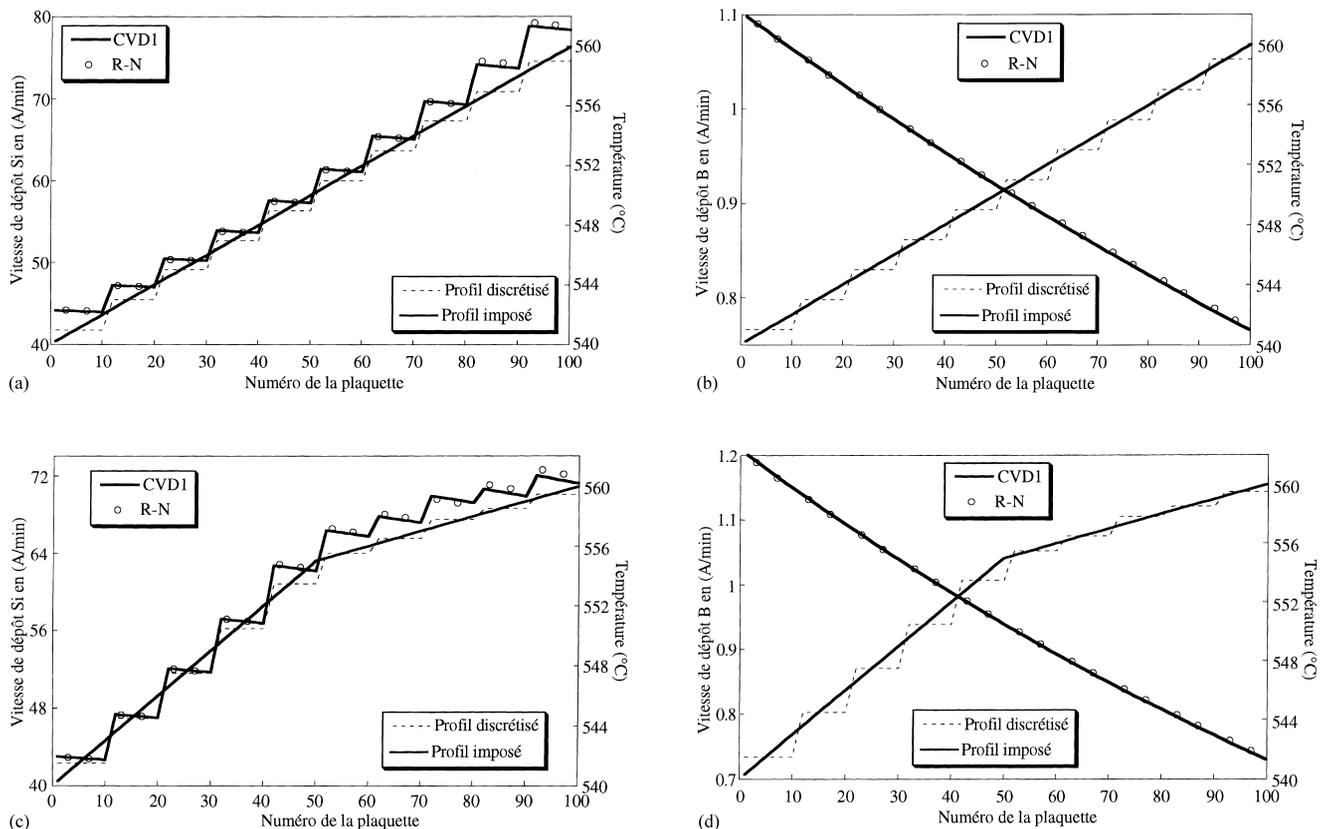


Fig. 5. (a) Vitesse de dépôt du silicium $P = 133.3$ Pa - $D_{\text{SiH}_4} = 500$ sccm $D_{\text{BCl}_3} = 100$ sccm dilué à 3% dans l'azote, (b) Vitesse de dépôt du bore $P = 133.3$ Pa - $D_{\text{SiH}_4} = 500$ sccm $D_{\text{BCl}_3} = 100$ sccm dilué à 3% dans l'azote, (c) Vitesse de dépôt du silicium $P = 133.3$ Pa - $D_{\text{SiH}_4} = 500$ sccm $D_{\text{BCl}_3} = 100$ sccm dilué à 3% dans l'azote, (d) Vitesse de dépôt du bore $P = 133.3$ Pa - $D_{\text{SiH}_4} = 500$ sccm $D_{\text{BCl}_3} = 100$ sccm dilué à 3% dans l'azote.

Tableau 4
Conditions opératoires utilisées pour le calcul des résultats des Fig. 6(a–b)

Symbole	◇	□	○
Pression (Pa)	133.3	53.32	53.32
Température T(°C)	555	560	555
Débit de silane (sccm)	500	500	350
Débit de trichlorure de bore ^a (sccm) à l'entrée du réacteur	50	60	70
Débit de trichlorure de bore ^a (sccm) injecté par les 10 trous de la canne	40	40	30

^aBCl₃ dilué à 3% dans l'azote.

Les Fig. 6(a–b) montrent ici encore un bon accord entre le modèle neuronal et CVD1 pour différentes conditions opératoires.

Enfin, on peut également simuler le fonctionnement du réacteur de LPCVD dans un cas non-isotherme avec utilisation des injecteurs. Les Fig. 7(a–b) montrent les résultats obtenus pour différentes conditions opératoires décrites dans le Tableau 5.

L'observation de la Fig. 7b conduit aux remarques suivantes. Dans le cas où on introduit des débits de BCl₃ égaux respectivement à 60 sccm à l'entrée et à 40 sccm par chacun

Tableau 5
Conditions opératoires utilisées pour le calcul des résultats des Fig. 7(a–b)

Symboles	□	○
Pression (Pa)	26.66	53.32
Débit de silane (sccm)	350	500
Débit de trichlorure de bore ^a (sccm) à l'entrée du réacteur	80	60
Débit de trichlorure de bore ^a (sccm) injecté par les 10 trous de la canne	20	40

^aBCl₃ dilué à 3% dans l'azote.

des 10 trous de la canne, la vitesse de dépôt du bore augmente d'un tronçon à un autre du fait qu'on réalise une injection de BCl₃ à l'entrée de chaque tronçon. Au contraire, lorsque l'on introduit des débits de BCl₃ égaux à 80 sccm à l'entrée du réacteur et à 20 sccm par les 10 trous de la canne, la vitesse de dépôt du bore diminue de l'entrée à la sortie du réacteur. Ce comportement s'explique tout simplement par le fait que dans le second cas on introduit plus de BCl₃ à l'entrée du réacteur et le bore se dépose ainsi plus rapidement ce qui conduit à une formation importante d'acide chlorhydrique.

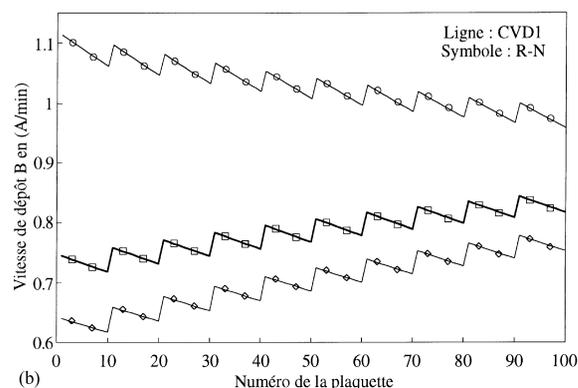
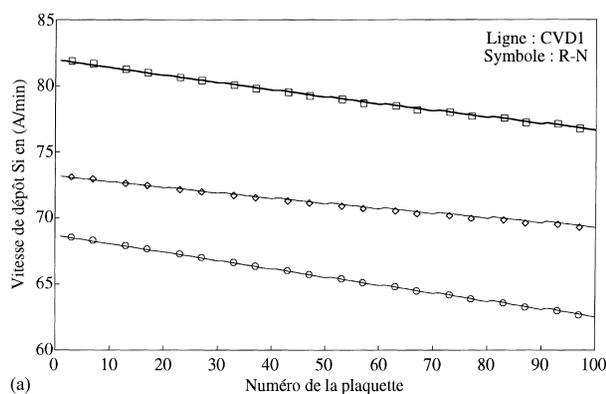


Fig. 6. (a) Vitesse de dépôt du silicium avec injecteur (10 injecteurs) (b) Vitesse de dépôt du bore avec injecteur (10 injecteurs).

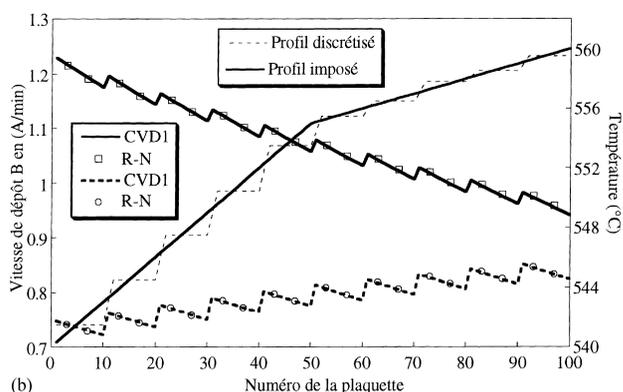
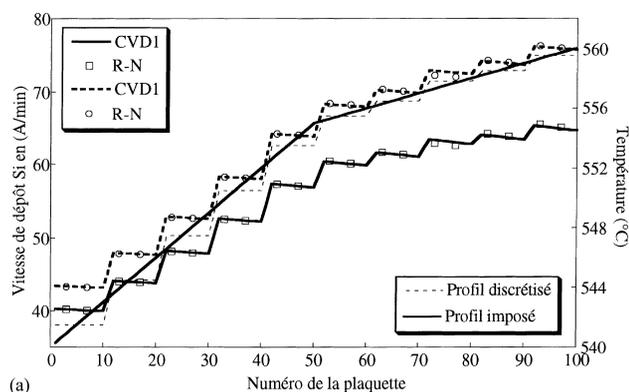


Fig. 7. (a) Vitesse de dépôt du silicium, (b) Vitesse de dépôt du bore.

12. Optimisation

Le modèle neuronal développé permet la simulation des réacteurs tubulaires horizontaux à parois chaudes dans le cas du dépôt de silicium dopé in situ au bore à partir de mélanges de silane et de trichlorure de bore pour divers types de fonctionnement. Ce modèle peut être utilisé pour résoudre les différents problèmes qui se posent dans l'industrie.

Un des objectifs essentiels des industriels de la micro-électronique concerne l'uniformité de dépôt (en épaisseur et en taux de dopant) des films, tant au niveau de chaque substrat que sur la totalité de la charge admise à l'intérieur du réacteur. Pour résoudre ce type de problème, nous avons développé une procédure d'optimisation pour déterminer simultanément la température et le débit injecté par les trous de la canne dans chaque compartiment, afin d'obtenir des vitesses de dépôt de silicium et de bore identiques à celles des plaquettes placées dans le premier tronçon du réacteur.

En effet, une optimisation de la température seule, à l'intérieur de l'enceinte réactionnelle, ne suffit pas pour rendre les vitesses de dépôt de silicium et du bore uniforme sur toute la charge, puisque la cinétique de dépôt du bore reste jusqu'à présent indépendante de ce paramètre. Une optimisation des débits injectés par les trous de la canne s'avère donc nécessaire pour pallier à ce problème.

Nous avons utilisé une méthode d'optimisation avec contraintes, ces dernières permettant d'imposer des débits de trichlorure de bore dilué à 3% dans l'azote (N₂) strictement positifs à chaque trou. La fonction à minimiser traduit l'objectif désiré qui est d'obtenir des vitesses égales dans tous les tronçons du réacteur. Elle est exprimée sous la forme suivante:

$$F_{obj} = \frac{1}{2} \left[\sum_{j=2}^N (V_{3rf}^{Si} - V_3^{Si}(j))^2 + (V_{3rf}^B - V_3^B(j))^2 + (V_{7rf}^{Si} - V_7^{Si}(j))^2 + (V_{7rf}^B - V_7^B(j))^2 \right]$$

où N représente le nombre de tronçons constituant le réacteur. Le nombre de variables à optimiser est de 18, à savoir deux variables par tronçon: la température et le débit injecté par le trou de la canne. V_{3rf}^{Si} , V_{7rf}^{Si} , V_{3rf}^B , et V_{7rf}^B représentent respectivement les vitesses de dépôts de silicium et du bore sur les plaquettes 3 et 7 du premier tronçon de la charge, qui servent de références pour la recherche du minimum de la fonction objectif F_{obj} . Les conditions opératoires du premier tronçon sont définies et n'entrent pas dans l'optimisation.

La réalisation pratique du profil de débit obtenu par optimisation et présenté sur la Fig. 8(c) pourra se faire à l'aide de 10 cannes comportant un seul trou injectant, après réglage, le débit calculé. Sur les Fig. 8(a–c), nous comparons différents résultats obtenus avec et sans optimisation. Les conditions de fonctionnement sans optimisation sont données dans le Tableau 6. Un fonctionnement isotherme (555°C) avec des débits identiques pour chaque trou

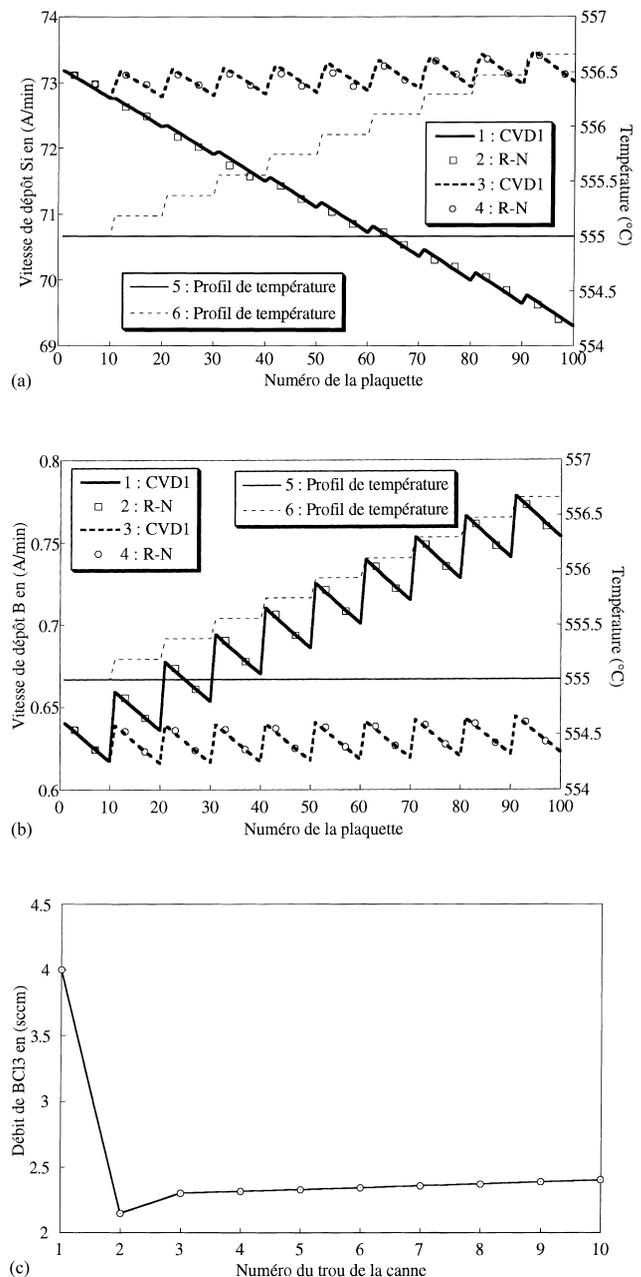


Fig. 8. (a) Vitesse de dépôt de silicium (optimisation de la température et des débits injectés par les trous de la canne) (1) CVD1 à $T = 555^\circ\text{C}$ et avec injecteurs (2) R-N à $T = 555^\circ\text{C}$ et avec injecteurs (3) CVD1 après optimisation de la température et des injecteurs (4) R-N après optimisation de la température et des injecteurs (5) Profil de température à $T = 555^\circ\text{C}$ (6) Profil obtenu après optimisation de la température et des injecteurs. (b) Vitesse de dépôt du bore (optimisation de la température et des débits injectés par les trous de la canne) (1) CVD1 à $T = 555^\circ\text{C}$ et avec injecteurs (2) R-N à $T = 555^\circ\text{C}$ et avec injecteurs (3) CVD1 après optimisation de la température et des injecteurs (4) R-N après optimisation de la température et des injecteurs (5) Profil de température à $T = 555^\circ\text{C}$ (6) Profil obtenu après optimisation de la température et des injecteurs. (c) Débits de BCl_3 (optimisés) injectés par les trous de la canne BCl_3 dilué à 3% dans l'azote.

(4 sccm), conduit à une diminution de la vitesse de dépôt du silicium et une augmentation de la vitesse de dépôt du bore.

Tableau 6

Conditions opératoires utilisées pour le calcul des résultats des Fig. 8(a–c)

Figures	8a–8b–8c
Pression (Pa)	133.3
Température (°C)	555
Débit de silane (sccm)	500
Débit de trichlorure de bore ^a (sccm) à l'entrée du réacteur	50
Débit de trichlorure de bore ^a (sccm) injecté par les 10 trous de la canne	40

^aBCl₃ dilué à 3 % dans l'azote.

13. Conclusions

Dans cet article, une nouvelle technique de modélisation des réacteurs de LPCVD par utilisation des réseaux de neurones est présentée. Le réseau de neurones permet de déterminer les vitesses de dépôt du silicium et du bore au niveau de deux plaquettes d'un tronçon de 10 plaquettes. En associant à ce réseau de neurones des équations algébriques, une structure hybride est développée pour calculer les vitesses de dépôt sur l'ensemble de la charge du réacteur.

D'excellents résultats sont obtenus dans des cas isothermes. Les résultats les plus intéressants concernent le fait qu'il est possible de conserver cette même structure pour simuler le comportement du réacteur dans des opérations de LPCVD non-isothermes avec ou sans injections de gaz dopant (BCl₃ + N₂). Pour cela, il suffit de modifier la température de chaque tronçon et d'ajouter la fraction de BCl₃ et de N₂ injectée par chaque trou de la canne aux entrées correspondantes du réseau de neurones.

Ce modèle a été utilisé par la suite, pour déterminer les conditions opératoires optimales, assurant une homogénéité de vitesse aux dépôts de silicium et de bore sur l'ensemble des plaquettes de la charge. Les résultats obtenus montrent que l'association d'un profil de température et d'un profil de débits injectés par les trous de la canne permet de rendre les vitesses de dépôt de silicium et de dépôt de bore uniformes sur la totalité de la charge admise à l'intérieur du réacteur.

Des travaux sont maintenant en cours pour l'élaboration d'un capteur logiciel basé sur le modèle neuronal développé, en vue de la conduite des réacteurs de LPCVD par un suivi en ligne des épaisseurs de semi-conducteur déposées sur les plaquettes.

14. Notations

a_{inhib}	constante cinétique d'inhibition, dû à la présence d'HCl (–).
$b_{j,k}$	terme de biais.
b_{exalt}	Constante cinétique d'exaltation, dû à la présence de BCl ₃ (–).
D_{H_2}	débit d'hydrogène (sccm).
D_{SiH_4}	débit de silane (sccm).
D_{BCl_3}	débit de trichlorure de bore (sccm)

D_{HCl}	débit d'acide chlorhydrique (sccm)
d_{ww}	distance interplaquette (m).
F_{Si}	nombre de mole de Si déposé par unité de temps dans un tronçon (mol Si s ⁻¹).
F_{B}	nombre de mole de B déposé par unité de temps dans un tronçon (mol B s ⁻¹).
F_{obj}	fonction objectif (Å ² /min ²).
$I_{j-1,i}$	information du $i^{\text{ème}}$ neurone au $j-1^{\text{ème}}$ couche (–).
N_{d}	nombre d'exemples de la base de données (–).
n_{w}	nombre de plaquette (–).
$O_{j,k}$	sortie du $k^{\text{ème}}$ neurone de la $j^{\text{ème}}$ couche (–).
P	pression (Pa).
Q_{SiH_4}	débit de SiH ₄ consommé dans un tronçon (sccm).
Q_{BCl_3}	débit de BCl ₃ consommé dans un tronçon (sccm).
r_{t}	rayon du réacteur (m).
r_{w}	rayon de la plaquette (m).
$R_{\text{Si-pur}}$	vitesse de dépôt de Si pur (mol Si/m ² s).
$R_{\text{si.dopé.bore}}$	vitesse de dépôt de Si dopé au bore (mol Si/m ² s).
S_{i}	surface des zones interplaquettes (m ²).
S_{t}	surface totale de dépôt (m ²).
S_{w}	surface d'une plaquette (m ²).
T	température (K).
T_{k}	cible correspondant au $k^{\text{ème}}$ neurone (–).
V_{dSi}	vitesse moyenne de silicium déposée dans un tronçon (Å/min).
V_{dB}	vitesse moyenne de bore déposée dans un tronçon (Å/min).
$V_{\text{3rf}}^{\text{Si}}$	vitesse de Si sur la plaquette 3 choisie comme référence d'optimisation (Å/min).
$V_{\text{7rf}}^{\text{Si}}$	vitesse de Si sur la plaquette 7 choisie comme référence d'optimisation (Å/min).
$V_{\text{2rf}}^{\text{B}}$	vitesse de B sur la plaquette 3 choisie comme référence d'optimisation (Å/min).
$V_{\text{7rf}}^{\text{B}}$	vitesse de B sur la plaquette 7 choisie comme référence d'optimisation (Å/min).
ϑ_{mSi}	volume molaire de Si (mol Si m ⁻³).
ϑ_{mB}	volume molaire de B (mol B m ⁻³).
$w_{j,i,k}$	poids de connexion entre le $k^{\text{ème}}$ neurone de la $j^{\text{ème}}$ couche et le $i^{\text{ème}}$ neurone de la $j-1^{\text{ème}}$ couche.
y_{SiH_4}	fraction molaire en silane (–).
y_{HCl}	fraction molaire en acide chlorhydrique (–).
y_{BCl_3}	fraction molaire en trichlorure de bore (–).

References

- [1] A.J. Morris, G.A. Montague, M.J. Willis, Artificial neural networks: studies in process modelling and control, Trans. IChem. 72 (1994) 3–19.
- [2] J.L. Dirion, B. Etedgui, M. Cabassud, M.V. Le lann, G. Casamatta, Elaboration of neural network system for semi-batch temperature control: an experimental study, Chem. Eng. Proc. 35 (1996) 225–234.

- [3] D.E. Rumelhart, G.E. Hinton, R.J. Williams, Learning representations by back-propagating errors, *Nature* 325 (1988) 533–536.
- [4] J.E. Dennis Jr., R.B. Schnabel, *Numerical Methods for Unconstrained Optimization and Nonlinear Equations*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1983.
- [5] H.W. Press, B.P. Flannery, S.A. Teukosky, W.T. Vetterling, *Numerical recipes, The Art of Scientific Computing*, Cambridge University Press, London, 1988.
- [6] K. Fakhreddine, M. Cabassud, P. Duverneuil, M.V. Le Lann, J.P. Couderc, Use of neural networks for LPCVD reactors modelling, *Computers Chem. Eng.* 20 (1996) 521–526.
- [7] M. Luthard, E. Than, G. Marx, *Z. Chem.* 22 (1987) 231–232.
- [8] M. Michaelidis, R. Pollard, Analysis of chemical vapor deposition of boron, *J. Electrochem. Soc.* 131 (1984) 867–890.
- [9] C.A. Chang, On the enhancement of silicon CVD rates at low temperatures, *J. Electrochem. Soc.* 123 (1976) 1245–1247.
- [10] F.C. Eversteyn, B.H. Put, Influence of AsH_3 , PH_3 , and B_2H_6 on the growth rate and resistivity of polycrystalline silicon films from SiH_4 - H_2 mixture, *J. Electrochem. Soc.* 120 (1973) 106.
- [11] Elias C. Stassinou, Hong H. Lee, A framework for the kinetics of film growth under simultaneous doping conditions, *J. Appl. Phys.* 60 (1986) 3905–3909.
- [12] C. Azzaro, E. Scheid, D. Bielle-Daspet, P. Duverneuil, An understanding of in situ boron doped polysilicon films by characterization and simulation, 8th Eur. CVD Conf., Glasgow, 1991.
- [13] G. Fresquet, Analyse et modélisation du dépôt de silicium polycristallin dopé in situ au bore, Mémoire CNAM (Ingénieur Physique et Instrumentation), 1992.
- [14] C. Azzaro, D. Boudre, P. Duverneuil, J.P. Couderc, Modélisation des réacteurs de dépôt de silicium polycristallin dopé in situ au bore, Récent progrès en Génie des procédés, Séparation, mélanges, études finalisées 3(8a) (1991) 642.
- [15] C. Jacquemin, Effet de l'HCl sur la vitesse de croissance du silicium polydopé au bore-Influence sur les défauts cristallins ultérieurs, Mémoire MOTOROLA, IEG Génie physique (1986).
- [16] W.A.P. Claassen, J. Bloem, Rate determining reactions and surface species in CVD of silicon, *J. Crystal. Growth* 51 (1981) 443.
- [17] C. Azzaro, P. Duverneuil, J.P. Couderc, Thermal and kinetic modelling of low pressure chemical vapour in hot-wall tubular reactors, *Chem. Eng. Sci.* 47 (1992) 3827–3838.
- [18] T.E. Wilke, K.A. Tuner, C.G. Takoudis, Chemical vapor deposition of silicium under reduced pressure in hot-wall reactors, *Chem. Eng. Sci.* 41(4) (1986) 643.
- [19] K. Fakhreddine, Elaboration d'un capteur logiciel à base de réseaux de neurones pour la régulation thermique et la conduite des réacteurs de LPCVD, Thèse de doctorat, INP Toulouse, 1998.