



# Διεργασίες Παραγωγής Υλικών

## Ενότητα 1: Χημικές Διεργασίες

Δημήτριος Ματαράς

Πολυτεχνική Σχολή

Τμήμα Χημικών Μηχανικών

# CVD

- Chemical Vapor Deposition  
Χημική Εναπόθεση Ατμών

- Διεργασία σχηματισμού **λεπτών στερεών υμενίων** στην επιφάνεια ενός υποστρώματος μέσω της διάσπασης ενώσεων σε αέρια κατάσταση που περιέχουν τα αναγκαία συστατικά.



# CVD – Ενεργοποίηση

- Η ενεργοποίηση των αερίων ενώσεων γίνεται με διαφορετικούς τρόπους:
  - Χημικά
  - Θερμικά
  - Με Πλάσμα
  - Με Φωτόνια
  - ...
- Οι αντιδράσεις γίνονται επί ή υπεράνω της επιφάνειας ενός υποστρώματος του οποίου η θερμοκρασία ελέγχεται



# Κατηγορίες CVD

- Ενεργοποίηση
  - Thermal CVD
  - Plasma Enhanced CVD
- Πίεση Λειτουργίας
  - Atmospheric CVD
  - Sub-Atmospheric CVD
  - Reduced Pressure CVD
  - Low Pressure CVD
- Μεταφορά Ενέργειας
  - Hot wall
  - Cold wall
- Θέρμανση υποστρώματος
  - Radiant
  - Induction
  - Resistance
- Λειτουργία
  - Single wafer
  - Batch
  - Continuous batch



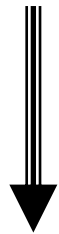
# Κατηγορίες CVD

CVD Process	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα	Τυπικές Εφαρμογές
<b>APCVD</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Απλότητα</li><li>• Ταχύτητα εναπόθεσης</li><li>• Χαμηλή θερμοκρασία</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Κάλυψη σκαλοπατιών</li><li>• Επιμόλυνση</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Οξειδία σε χαμηλή θερμοκρασία</li></ul>
<b>LPCVD</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Καθαρότητα</li><li>• Ομοιομορφία</li><li>• Κάλυψη σκαλοπατιών</li><li>• Μεγάλη επιφάνεια κάλυψης</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Υψηλή θερμοκρασία</li><li>• Χαμηλή ταχύτητα εναπόθεσης</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Οξειδία σε υψηλή θερμοκρασία, SiN, Poly-Si, W, WSi<sub>2</sub></li></ul>
<b>PECVD</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• +Χαμηλή θερμοκρασία</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Σωματίδια</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Μονωτές επί μετάλλων, Διηλεκτρικά, Νιτρίδια</li></ul>

# CVD

## Είδη Χημικών Διεργασιών

### ■ Ομογενής Εναπόθεση:



- Αντιδράσεις αέριας φάσης
- Στερεό στην αέρια φάση
- Απόθεση στερεού στην επιφάνεια

### ■ Ετερογενής Εναπόθεση:



- Αντιδράσεις αέριας φάσης
- Αντιδράσεις στην επιφάνεια
- Σχηματισμός στερεού στην επιφάνεια



# CVD - βήματα

- Εισαγωγή Αντιδρώντων
- Αντίδραση αέριας φάσης
  - Ενεργοποίηση
  - Διάσπαση
- Μεταφορά μάζας
  - Διάχυση (+ Συναγωγή?)  $\Leftrightarrow$  Δευτερογενείς αντιδράσεις
  - Προσρόφηση προδρόμων ενώσεων
- Επιφανειακές αντιδράσεις
  - Επιφανειακή Διάχυση
  - Ενεργοποίηση Επιφάνειας ή Ανάπτυξη υμενίου
  - Επιφανειακές Αντιδράσεις  $\Rightarrow$  Παραπροϊόντα
- Εκρόφηση παραπροϊόντων

# CVD – αντιδραστήρες

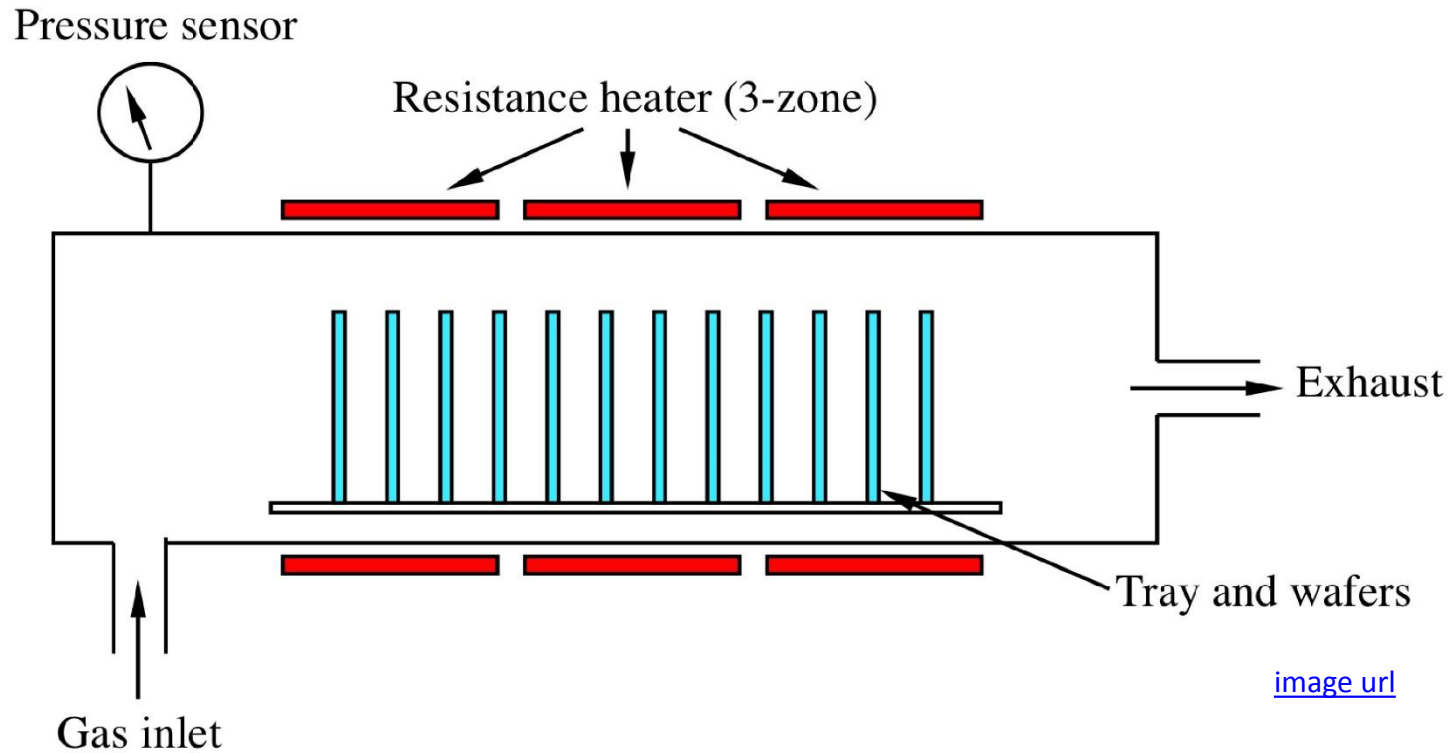
Ένα σύστημα CVD αποτελείται από:

1. Γραμμή παροχής αερίων
  - a. Φιάλες αερίων
  - b. Σωληνώσεις και βάνες
  - c. MFC's
    - i. Ροόμετρα μάζας
    - ii. Ηλεκτροβάνες ρύθμισης
    - iii. Ρυθμιστής παροχής (PID)
2. Θάλαμος αντίδρασης
3. Σύστημα θέρμανσης υποστρώματος
  - a. Θερμαντικό στοιχείο
  - b. Αισθητήρες θερμοκρασίας
  - c. Ρυθμιστής θερμοκρασίας (PID)
4. Σύστημα απαγωγής αερίων

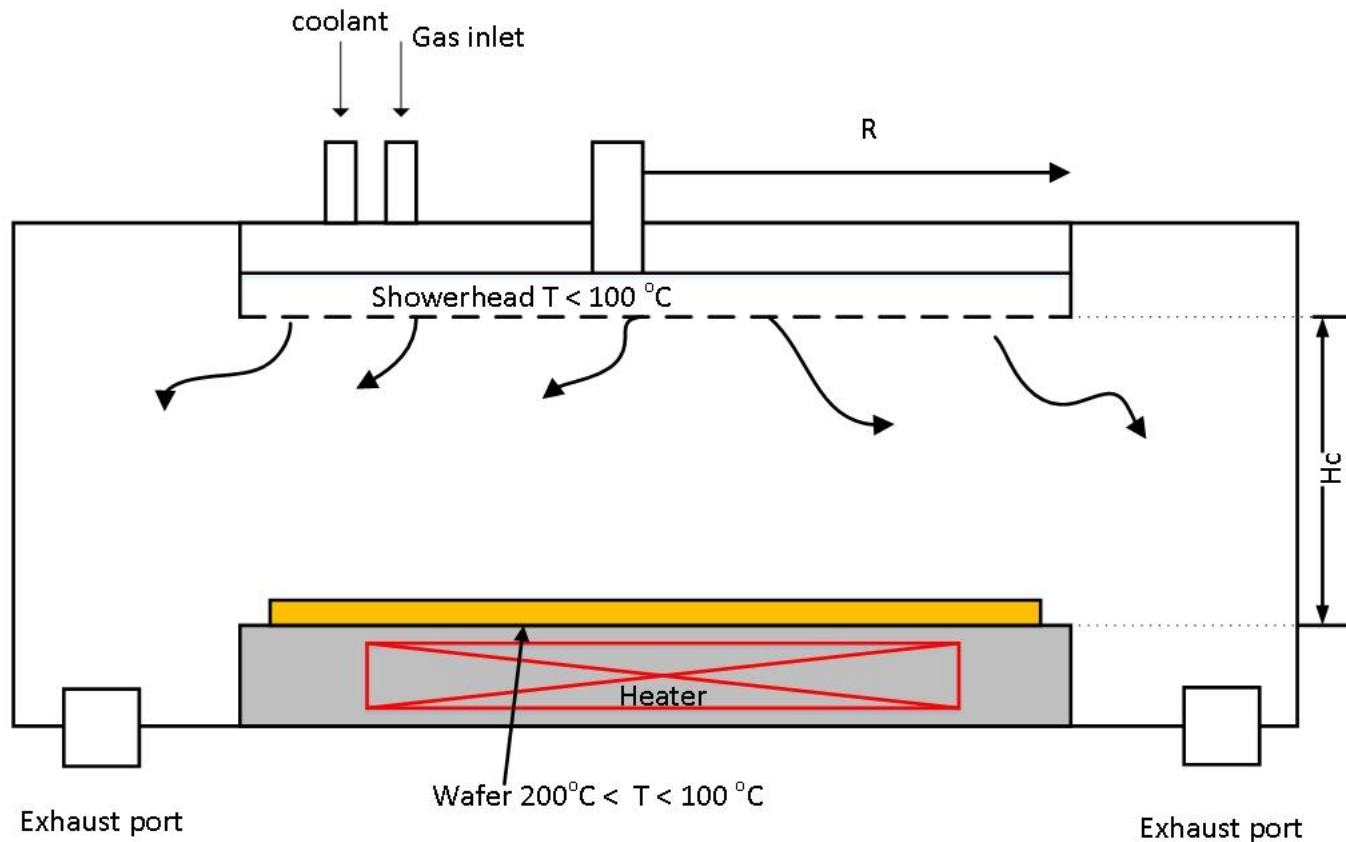




# CVD – αντιδραστήρες



# CVD – αντιδραστήρες



# ΕΠΙΤΑΞΙΑ

## Ορισμοί

- Ανάπτυξη κρυστάλλινων φιλμ σε επιφάνειες, σε θερμοκρασία μικρότερη της θερμοκρασία τήξης:
  - Διεργασία 'τακτικής' τοποθέτησης ατόμων σε μια κανονική μονοκρυσταλλική δομή
  - Στην περίπτωση αυτή το υπόστρωμα παίζει το ρόλο της κρυσταλλικής μήτρας (seed crystal)
  - Συνήθως η επιταξία γίνεται με CVD αν και υπάρχουν και φυσικές διεργασίες που οδηγούν στη δημιουργία επιταξικών υμενίων (MBE)



# ΕΠΙΤΑΞΙΑ

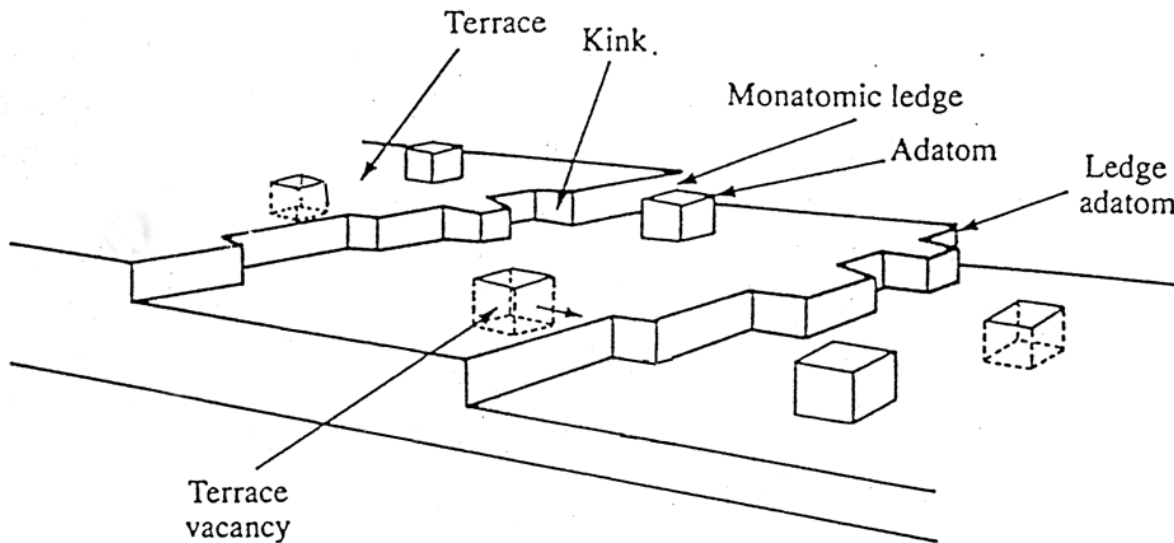
## Ορισμοί

- ΟμοΕπιταξία: όταν η ανάπτυξη γίνεται σε επιφάνεια από το ίδιο υλικό (Πχ. Φίλμ κρυσταλλικού πυριτίου σε επιφάνεια κρυσταλλικού πυριτίου)
  - Πλεονεκτήματα:
    - έλεγχος του προφίλ εμπλουτισμού
    - υψηλότερη καθαρότητα των φίλμ (απουσία O, C)
- ΈτεροΕπιταξία: επί διαφορετικού υποστρώματος (π.χ. GaAs επί Si)
  - Πλεονεκτήματα:
    - μεγαλύτερη ευελιξία σχεδιασμού
    - χρήση φτηνότερων υποστρωμάτων → σημαντική μείωση κόστους



# ΕΠΙΤΑΞΙΑ

## Επιφανειακή Διάχυση



- Τα προσροφημένα στην επιφάνεια είδη ή άτομα λέγονται *προσεΐδη* (adspecies) ή *προσάτομα* (adatoms) αντίστοιχα
- **Επιφανειακή Διάχυση:** η κίνηση των προσατόμων (με άλματα) επί της επιφάνειας λόγω θερμικών δονήσεων
- Αν το προσάτομο σε ένα από τα άλματα κατά τη διάρκεια της κίνησης βρεθεί σε θέση μικρότερης ενέργειας (ενεργή θέση), ενσωματώνεται στον κρύσταλλο

# ΕΠΙΤΑΞΙΑ

## Επιφανειακή Διάχυση

- Έστω προσάτομο που συγκρατείται σε επιφάνεια με μια μικρή ενέργεια  $E_d$ . Η συχνότητα άλματος (η πιθανότητα να πηδήσει έξω από το πηγάδι δυναμικού στο οποίο βρίσκεται) είναι:

$$f = qv_0 \exp\left(-\frac{E_d}{kT}\right) \quad (1)$$

- Όπου  $v_0$  η συχνότητα δόνησης του προσατόμου
  - Και  $q$  το πλήθος των ισοδύναμων γειτονικών θέσεων
- Για μονοδιάστατη τυχαία διαδρομή η καθαρή μετατόπιση  $X$  δίδεται από την απόσταση RMS:

$$\langle X^2 \rangle = n_j \cdot a^2 \quad (2)$$

- Όπου  $n_j$  το πλήθος των αλμάτων
- Και  $a$  η απόσταση άλματος (η απόσταση δύο γειτονικών θέσεων)

# ΕΠΙΤΑΞΙΑ

## Επιφανειακή Διάχυση

- Αν  $t$  ο χρόνος που απαιτείται για  $n_j$  άλματα, τότε  $n_j = f \cdot t$  και  $\langle X^2 \rangle = f \cdot t \cdot a^2$ . Η επιφανειακή διαχυτότητα ορίζεται ως:

$$D_s = \frac{\langle X^2 \rangle}{2 b \cdot t} = \frac{f \cdot a^2}{2 b} \quad (3)$$

– Όπου  $b$  ο αριθμός ισοδύναμων διευθύνσεων κίνησης

- Για διάχυση προς δυο εξ'ίσου πιθανές (ισοδύναμες) διευθύνσεις ( $b = 2$ ), αντικαθιστώντας την (1) στην (3) προκύπτει:

$$D_s = \frac{q a^2 v_0}{4} \exp\left(-\frac{E_d}{k T}\right) \quad (4)$$

- Ο χρόνος παραμονής  $t_r$  του προσατόμου στην επιφάνεια, πριν εκροφηθεί είναι:

$$t_r = \frac{1}{v_0} \exp\left(\frac{E_{des}}{k T}\right) \quad (5)$$

– Όπου  $E_{des}$  η ενέργεια εκρόφησης του προσατόμου



# ΕΠΙΤΑΞΙΑ

## Επιφανειακή Διάχυση -Παράδειγμα 1

Η πειραματικά προσδιορισμένη διαχυτότητα του προσατόμου του πυριτίου επάνω σε επιφάνεια πυριτίου είναι:  $10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$  στους  $800^\circ\text{C}$ .

Να υπολογίσετε την ενέργεια ανά mol με την οποία συγκρατείται το προσάτομο αν  $q = 6$ ,  $\alpha = 0.3 \text{ nm}$  και  $\nu_0 = 10^{13} \text{ s}^{-1}$ .

$$D_s = \frac{6(0.3 \cdot 10^{-9})^2 \cdot 10^{13}}{4} \exp\left(-\frac{E_d/\text{mol}}{R \cdot 1073}\right) = 10^{-3} \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$$

$$R = k N_A = 1.987 \frac{\text{cal}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$$

$$E_d = -1.987 \cdot 1073 \cdot \ln\left(\frac{4 \cdot 10^{-3}}{6(0.3 \cdot 10^{-9})^2 \cdot 10^{13}}\right) = 5.549 \text{ cal} \cdot \text{mol}^{-1}$$
$$\approx 5.5 \text{ kcal} \cdot \text{mol}^{-1}$$





# ΕΠΙΤΑΞΙΑ

## Επιφανειακή Διάχυση -Παράδειγμα 2

Ένα φιλμ κρυσταλλικού πυριτίου αναπτύσσεται επιταξιακά στους 1000 °C με ρυθμό ~1 μm/min. Υπολογίστε την απόσταση που μπορεί να διανύσει ένα προσάτομο πυριτίου σε 1 λεπτό αν δεν εκροφηθεί. Υπολογίστε επίσης και τον πραγματικό χρόνο παραμονής του στην επιφάνεια θεωρώντας την ενέργεια της εκρόφησης ίση με την ενέργεια του δεσμού Si-Si (50 kcal/mol) όπως και την απόσταση που μπορεί να διανυθεί σε αυτόν το χρόνο.

$$D_s = \frac{6(0.3 \cdot 10^{-9})^2 \cdot 10^{13}}{4} \exp\left(-\frac{5549}{1.987 \cdot 1273}\right) = 1.5 \cdot 10^{-3} \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$$

$$\text{Από την εξίσωση (3): } \sqrt{\langle X^2 \rangle} = \sqrt{2 b D_s t} = \sqrt{2 \cdot 1.5 \cdot 10^{-3} \cdot 60} = 0.6 \text{ cm}$$

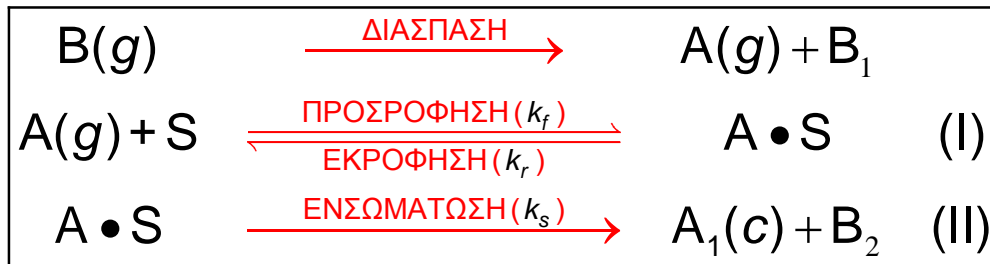
$$t_r = \frac{1}{\nu_0} \exp\left(\frac{E_{des}}{k T}\right) = \frac{1}{10^{13}} \exp\left(\frac{50000}{1.987 \cdot 1273}\right) = 3.84 \cdot 10^{-5} \text{ s}$$

$$\sqrt{\langle X^2 \rangle} = \sqrt{2 b D_s t} = \sqrt{2 \cdot 1.5 \cdot 10^{-3} \cdot 3.84 \cdot 10^{-5}} = 4.8 \mu\text{m}$$



# ΕΠΙΤΑΞΙΑ

## Στοιχειώδη Βήματα



Για το βημα I:

$$r_a = k_f C_A C_V - K_r C_{A \bullet S}$$

Η

$$r_a = k_f \left( C_A C_V - \frac{C_{A \bullet S}}{K_A} \right)$$

$$\text{ΟΠΟΥ: } K_A = \frac{k_f}{k_r}$$

Για το βημα II:

$$r_s = K_s C_{A \bullet S}$$

$C_A$  - συγκέντρωση των ειδών A στην αέρια φάση

$C_V$  - επιφανειακή συγκέντρωση ελεύθερων θέσεων

$C_{A \bullet S}$  - επιφανειακή συγκέντρωση προσροφημένων ειδών

$k_f$  - σταθερά ρυθμού προσρόφησης

$k_r$  - σταθερά ρυθμού εκρόφησης

$k_s$  - σταθερά ρυθμού ενσωμάτωσης

# ΕΠΙΤΑΞΙΑ

## Ρυθμός Εναπόθεσης

Αν  $\frac{r_a}{k_f} \ll 1$  Αργο Σταδιο είναι η ενσωματώση

$$\Rightarrow r_a = k_f \left( C_A C_V - \frac{C_{A \cdot S}}{K_A} \right) \Rightarrow C_{A \cdot S} = K_A C_A C_V$$

Ισοζυγιο επιφανειακων θεσεων :

$$C_t = C_V + C_{A \cdot S}$$

$$\Rightarrow \frac{C_V}{C_t} = \frac{1}{1 + K_A C_A}$$

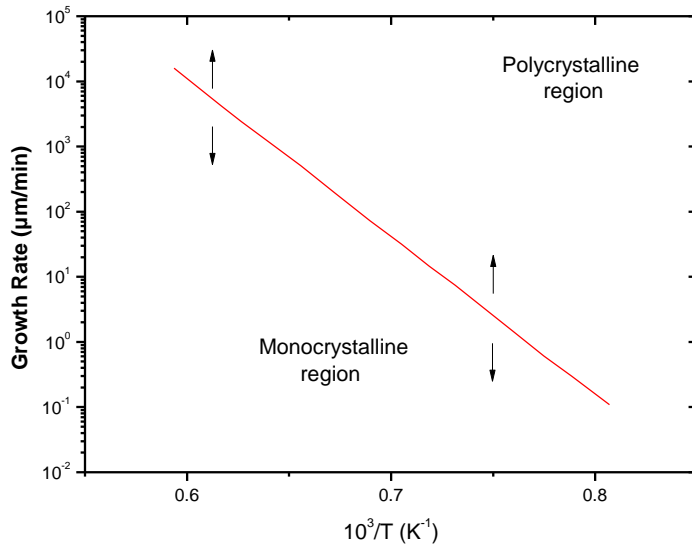
Ρυθμος Αποθεσης :  $r_D = r_s = k_s C_{A \cdot S} = k_s K_A C_A C_V \Rightarrow$

$$r_D = \frac{C_t k_s K_A C_A}{1 + K_A C_A}$$

$C_t$  - η συνολική επιφανειακή συγκέντρωση θέσεων

$r_D$  - ρυθμός απόθεσης

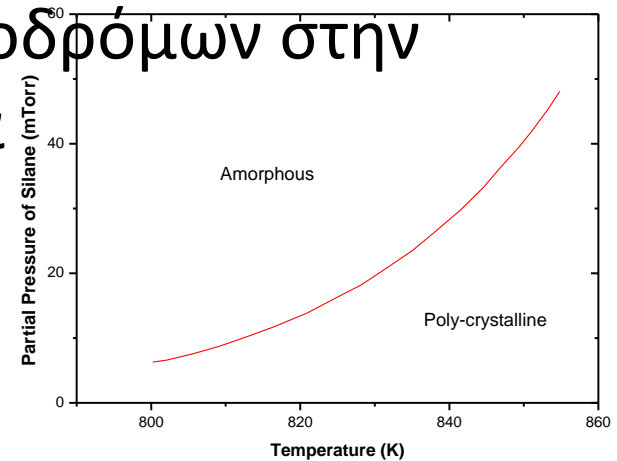
## Ρυθμός Εναπόθεσης



- Ο ρυθμός αυξάνει με την θερμοκρασία
  - Η θερμοκρασία αυξάνει την επιφανειακή διάχυση και την εκρόφηση
- Ο ρυθμός αυξάνει με την μερική πίεση του προδρόμου αερίου
  - Η μερική πίεση αυξάνει το ρεύμα προδρόμων στην επιφάνεια

J. Bloem, *J. Crystal Growth* **50**, 581 (1980) ↑

S. K. Kim and H. H. Lee, *J. Crystal Growth* **151**, 200 (1995) →



## Επιφανειακή Αντίδραση

- Ο ρυθμός σύγκρουσης  $Z$  των μορίων της αέριας φάσης με την επιφάνεια προκύπτει από την κινητική θεωρία των αερίων:

$$Z = \frac{p}{\sqrt{2 \pi m k T}} \quad (6)$$

- Όπου  $m$  το μοριακό βάρος
- Και  $p$  η μερική πίεση

- Από τα μόρια που συγκρούονται προσροφώνται μόνο εκείνα που έχουν ενέργεια μεγαλύτερη από  $E_a$  και ταυτόχρονα βρίσκουν ελεύθερη θέση:

$$r_a = Z(1 - \beta) \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) = \frac{p(1-\beta)}{\sqrt{2 \pi m k T}} \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \quad (7)$$

$$r_d = v_0 N_a \exp\left(-\frac{E_d}{kT}\right) \text{ ο ρυθμός εκρόφησης} \quad (8)$$

$$\beta = \frac{N_a}{N_t} \text{ ο βαθμός κάλυψης της επιφάνειας} \quad (9)$$

$N_a$  το πλήθος των προσροφημένων μορίων

$N_t = \frac{\rho h N_A}{M}$  το πλήθος των επιφανειακών θέσεων



# ΕΠΙΤΑΞΙΑ

## Επιφανειακή Αντίδραση

- Στην ισορροπία  $r_a = r_d$ :

$$\frac{p(1 - N_a/N_t)}{\sqrt{2\pi mkT}} \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) = v_0 N_a \exp\left(-\frac{E_d}{kT}\right)$$

Ή

$$N_a = \frac{1}{\frac{1}{N_t} + \frac{\sqrt{2\pi mkT} v_0 \exp\left(-\frac{Q}{kT}\right)}{p}} \text{ όπου } Q = E_d - E_a$$

Αν το  $\beta = \frac{N_a}{N_t}$  είναι μικρό τότε:

$$N_a = \frac{p}{\sqrt{2\pi mkT} v_0} \exp\left(\frac{Q}{kT}\right)$$

- Η επιφανειακή συγκέντρωση στην ισορροπία μειώνεται εκθετικά με την αύξηση της θερμοκρασίας και αυξάνεται γραμμικά με την μερική πίεση.

$$k = 1.38 \text{ g} \cdot \text{cm}^2/\text{s}^2 \cdot \text{mole} \cdot \text{K}$$

## Παράδειγμα 3

Υπολογίστε την συγκέντρωση προσροφημένων ριζών  $\text{SiH}_2$  στην ισορροπία κατά την επιταξία φιλμ κρυσταλλικού πυριτίου από  $0.001 \text{ SiH}_4$  σε  $\text{H}_2$ , σε πίεση μιας ατμόσφαιρας. Το μοριακό βάρος του Si είναι  $28 \text{ g/mol}$  και η πυκνότητα του  $2.3 \text{ g/cm}^3$ .

$$N_t = \frac{\rho \cdot h \cdot N_A}{M} = \frac{2.3 \cdot 3 \times 10^{-10} \cdot 6.023 \times 10^{23}}{28} = 1.48 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$$

για το  $\text{SiH}_2$   $m = \frac{30}{6.023} \times 10^{23} \cong 5 \times 10^{-23}$

και  $p = (0.001)(1.013 \times 10^6) = 1.013 \times 10^3 \text{ g/cm}^2\text{s}$

$$N_a = \frac{1}{\frac{1}{1.48 \times 10^{15}} + \frac{\sqrt{6.28 \cdot 5 \times 10^{-23} \cdot 1.38 \times 10^{-16} \cdot 1273} \cdot 10^{13} \exp\left(-\frac{40000}{1.987 \cdot 1273}\right)}{1.013 \times 10^3}} \Rightarrow$$

$$N_a = 0.068 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$$

# CVD

## Ομογενείς Αντιδράσεις

- Συνήθως η κινητική αναπαριστάται από την κινητική ψευδοπρώτης τάξης:

$$r_A = kC_A^n \quad \text{ΟΠΟΥ: } k = k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (A)$$

- Για αυλωτούς αντιδραστήρες το ισοζύγιο μάζας είναι:

$$v \frac{dC_A}{dz} = -r_A = -kC_A \quad (B)$$

$$t_r = \frac{L}{v}, \quad y = \frac{z}{L}, \quad x = \frac{C_{A_{in}} - C_A}{C_{A_{in}}}$$

$$\frac{dx}{dy} = kt_r(1-x) \quad (C) \quad x=0 \text{ ΣΤΟ } y=0$$

- Ολοκληρώνοντας από το  $y=0$  ως το  $y=1$ :

$$x_{out} = 1 - \exp(-kt_r) \quad (D) \quad \eta - kt_r = \ln(1 - x_{out}) \quad (E)$$





# CVD

## Παράδειγμα 4

Σιλάνιο διασπάται σε ισόθερμο αυλωτό αντιδραστήρα στερεάς κλίνης με σταθερό χρόνο παραμονής 4.3 s. Να υπολογιστεί ο προεκθετικός παράγοντας και η ενέργεια ενεργοποίησης από τα παρακάτω πειραματικά δεδομένα.

$$\ln k_0 + \frac{-E}{RT} = \ln \left[ -\frac{1}{t_r} \ln(1 - x_{out}) \right] = Y$$

T(°C)	223	257	320	400
%SiH <sub>4</sub>	11.0	39.7	72.6	92.5

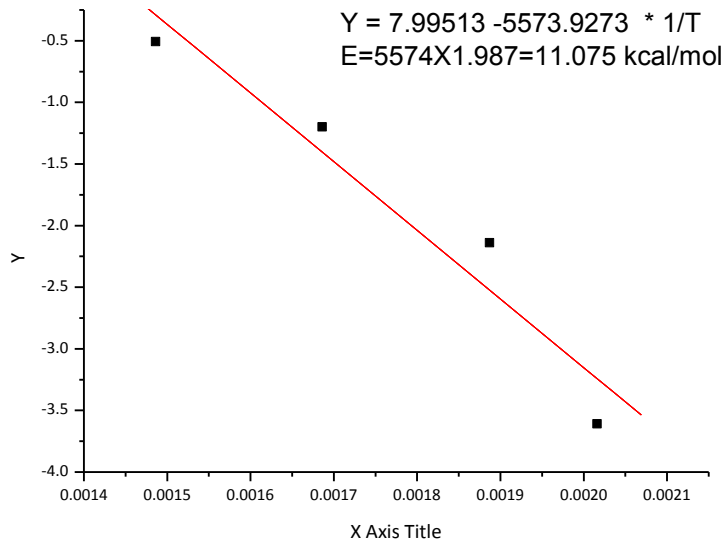
1/T	0.002016	0.001887	0.001686	0.001486
Y	-3.608	-2.140	-1.2	-0.507



# CVD

## Παράδειγμα 4

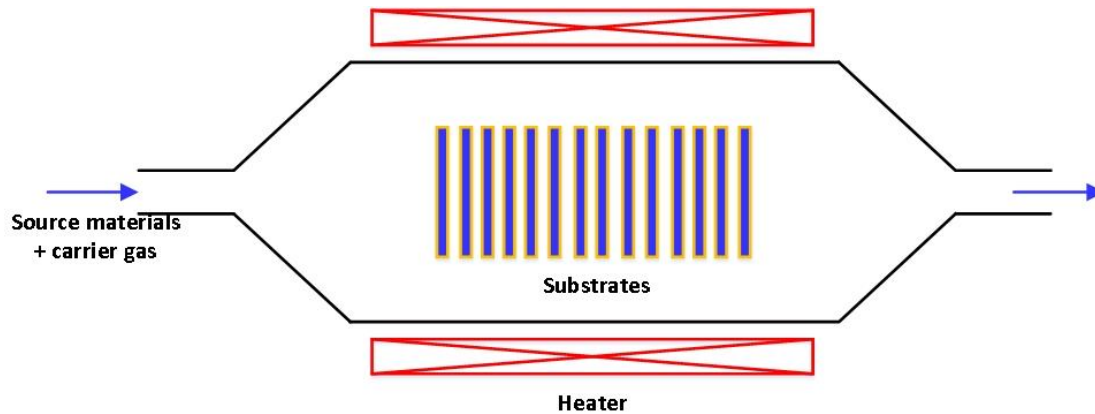
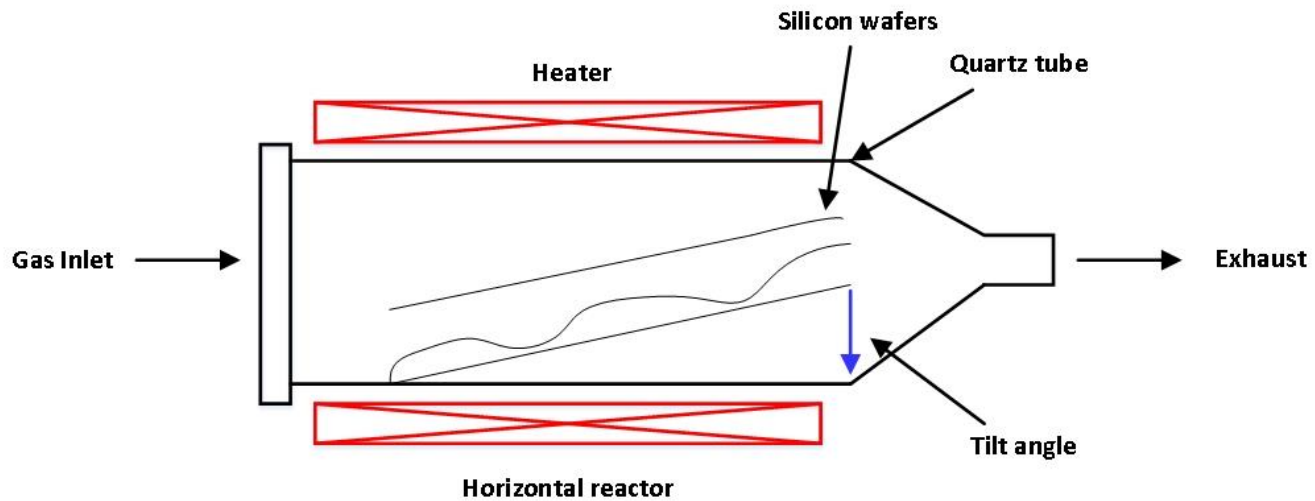
Σιλάνιο διασπάται σε ισόθερμο αυλωτό αντιδραστήρα στερεάς κλίνης με σταθερό χρόνο παραμονής 4.3 s. Να υπολογιστεί ο προεκθετικός παράγοντας και η ενέργεια ενεργοποίησης από τα παρακάτω πειραματικά δεδομένα.



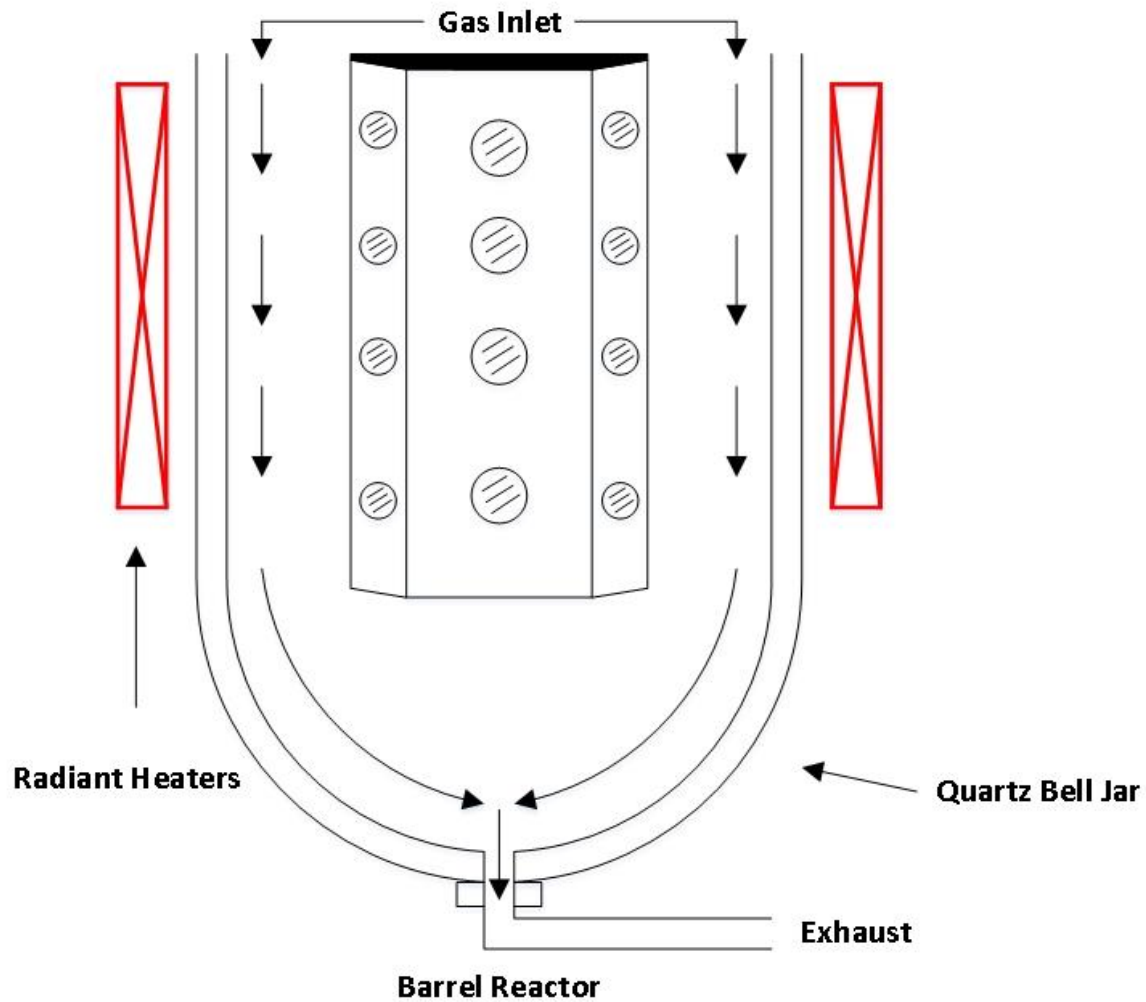
T(°C)	223	257	320	400
%SiH <sub>4</sub>	11.0	39.7	72.6	92.5

1/T	0.002016	0.001887	0.001686	0.001486
Y	-3.608	-2.140	-1.2	-0.507

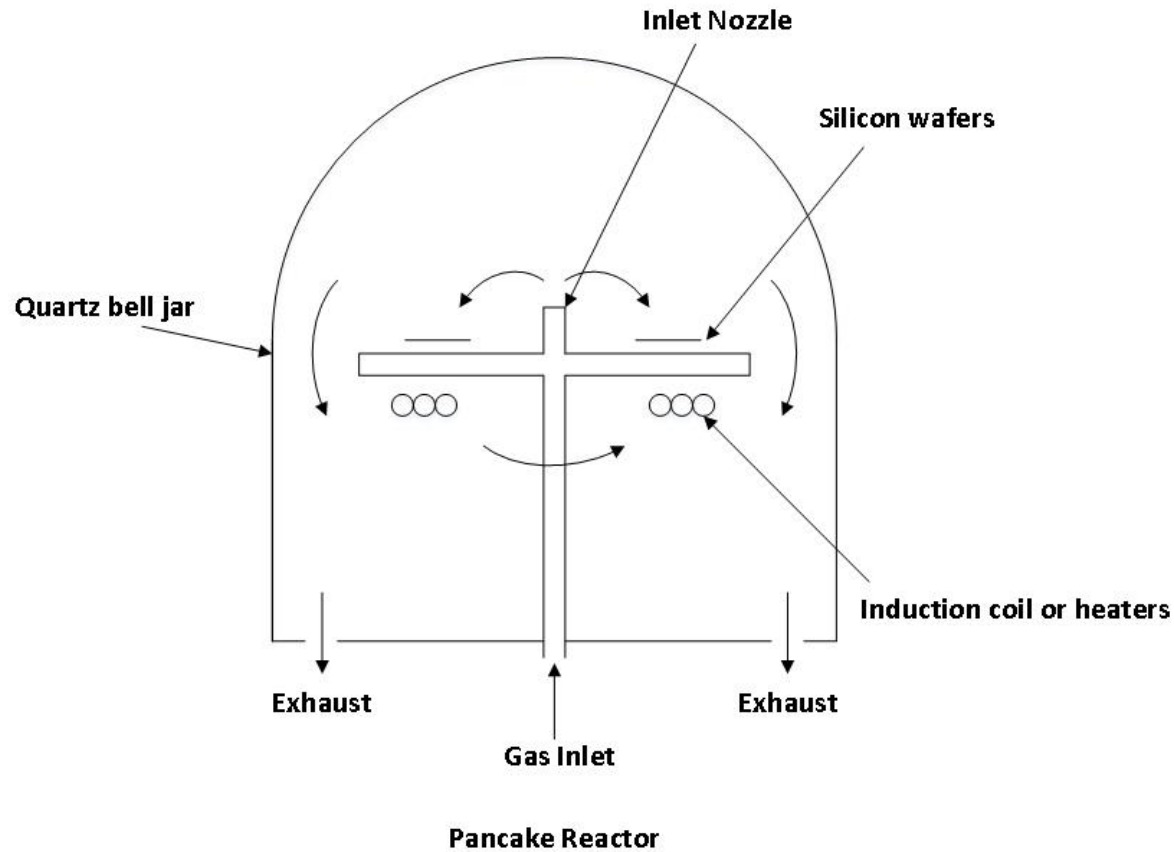
# Οριζόντιος Αντιδραστήρας



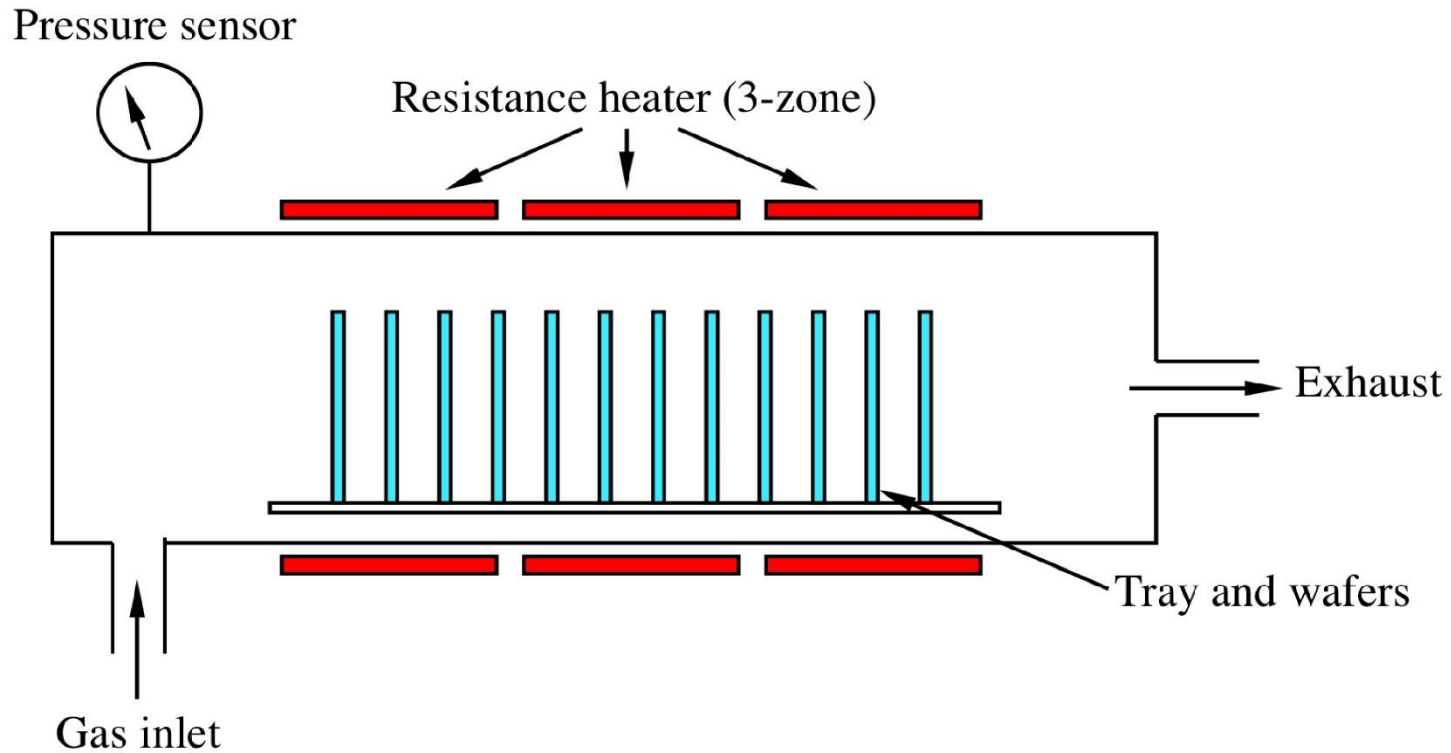
# Αντιδραστήρας Βαρέλι



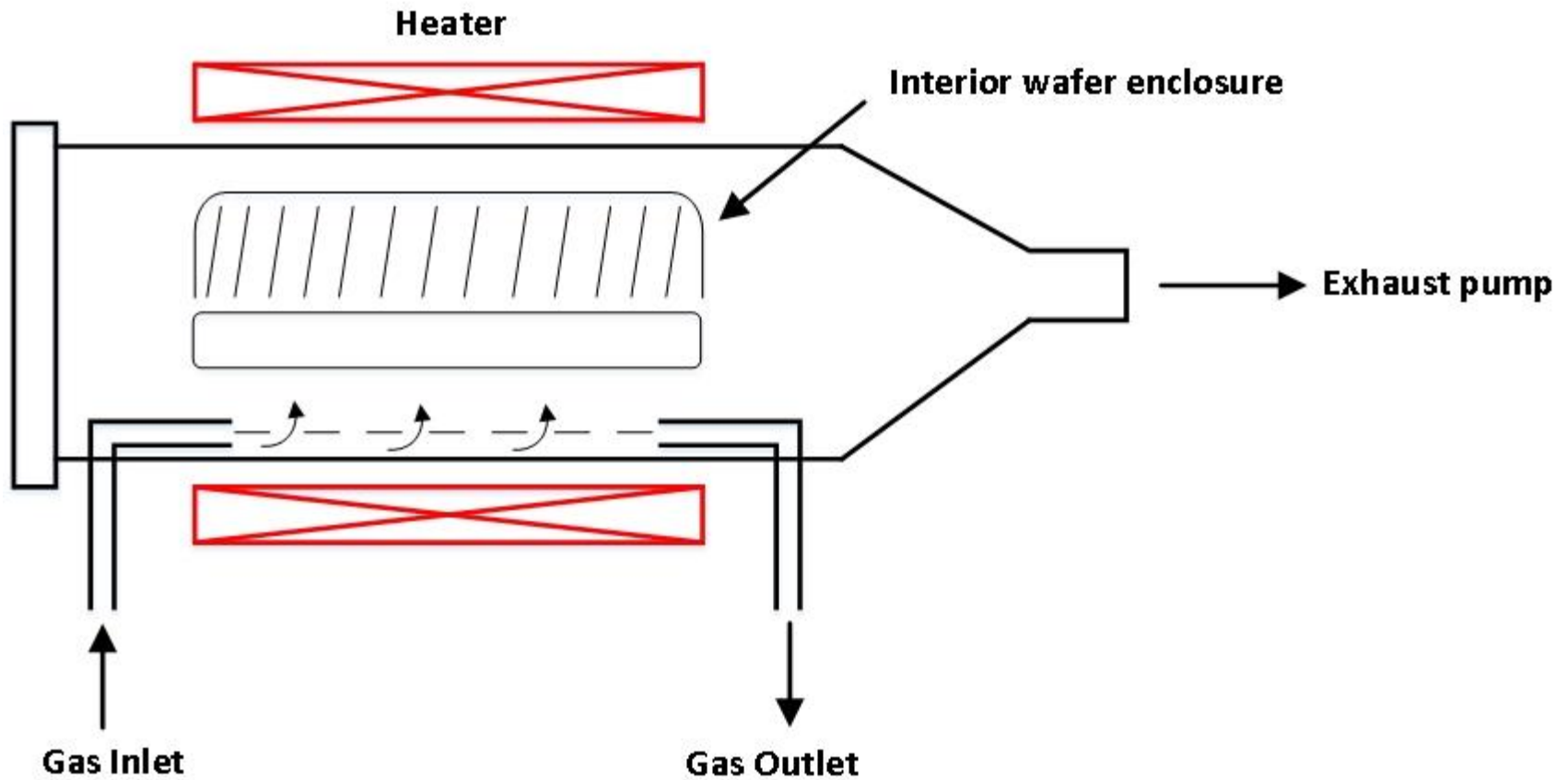
# Αντιδραστήρας Pancake



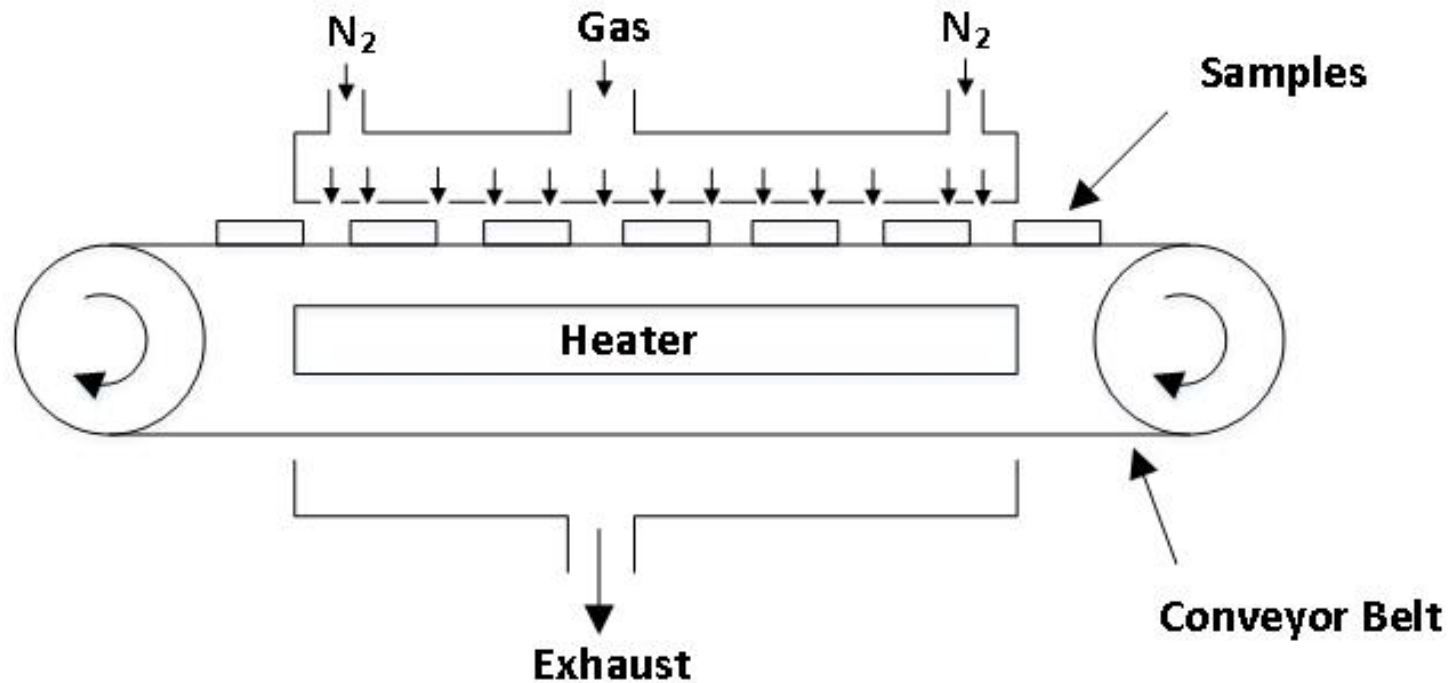
# Οριζόντιος Hot-Wall



# With gas-distribution

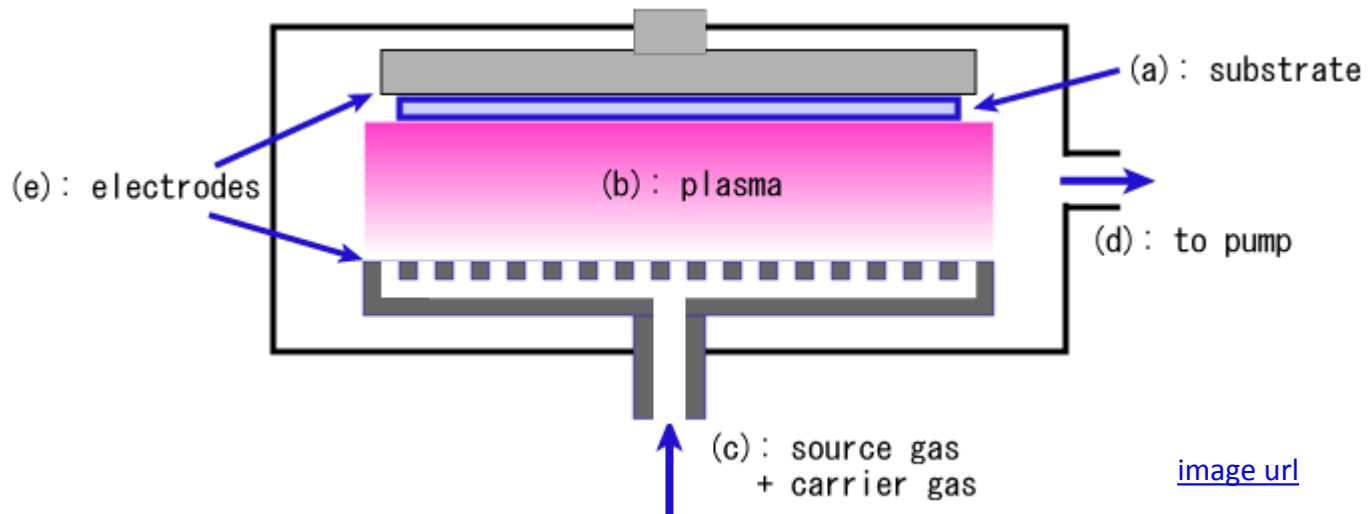


# In-line Atmospheric Reactor

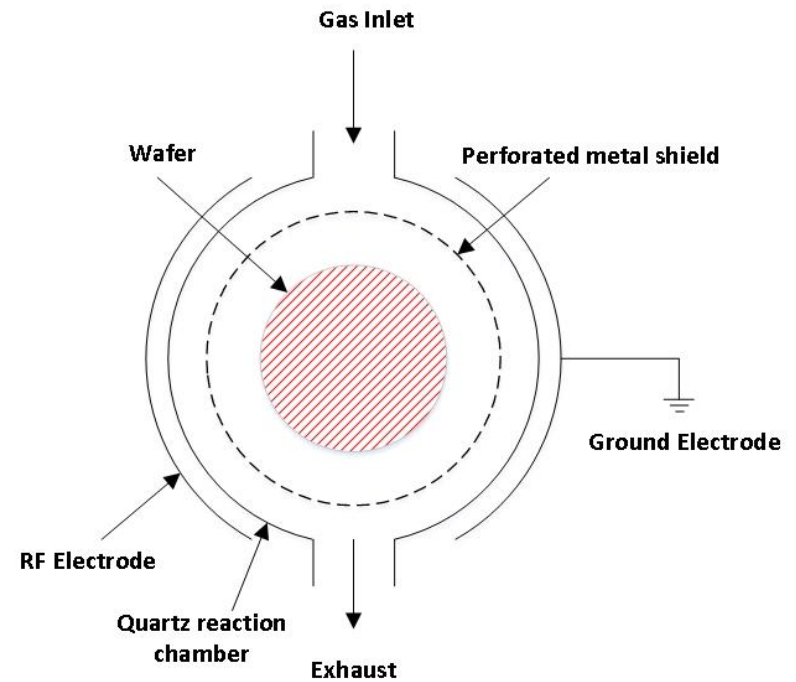
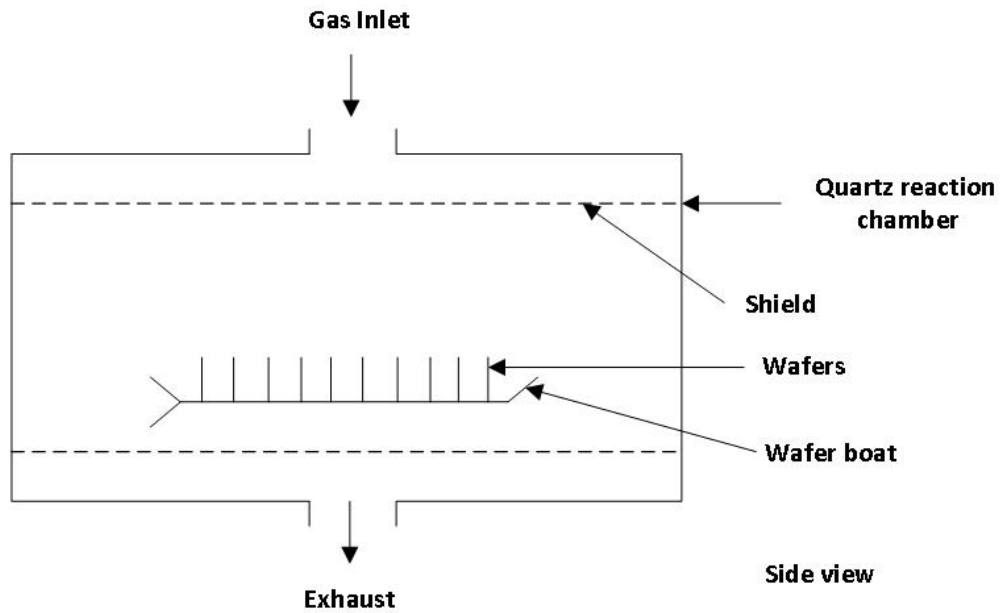




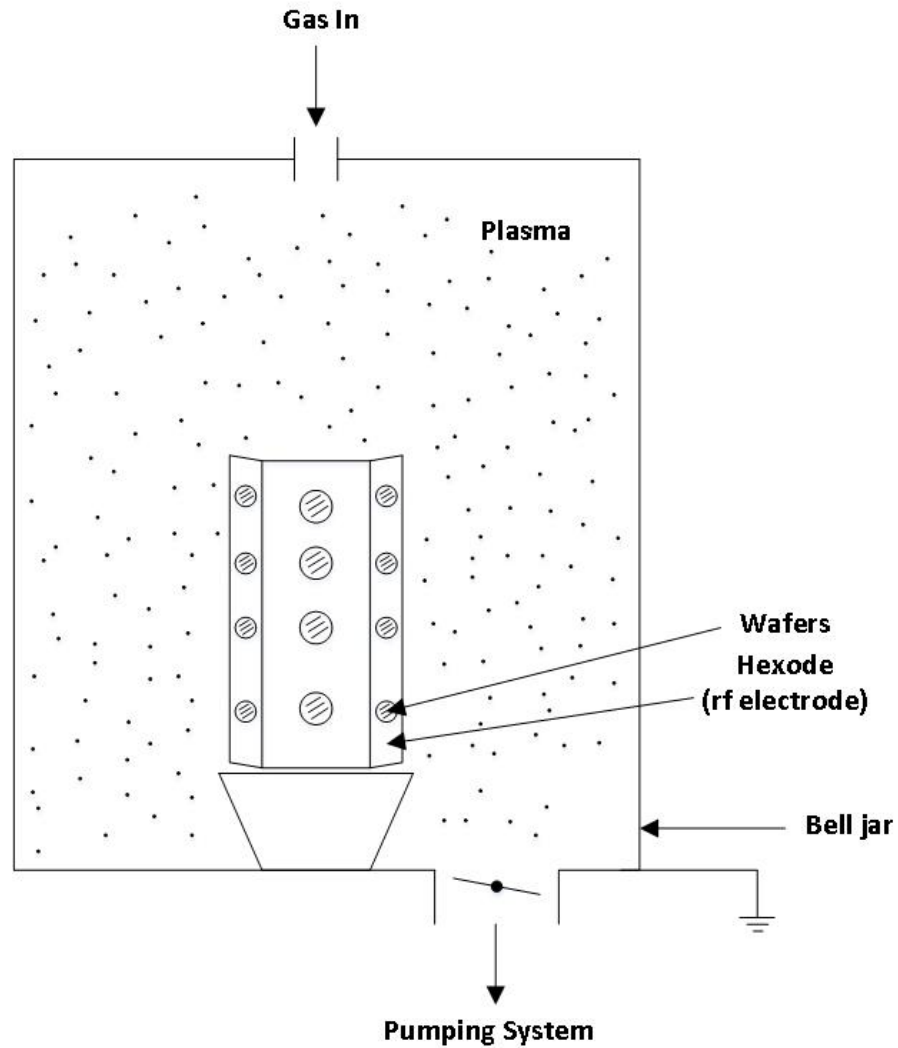
# Plasma CVD



# Plasma CVD



# Plasma Barrel



# Αντιδραστήρες CVD

- Ροή

$$Re = \frac{ud\rho}{\mu} \quad (\text{Hagen - Poiseuille}) \quad Q = \frac{\pi R_t^4}{8\mu l} (P_1 - P_2)$$

- Ιξώδης Ροή

$$Q_v = QP = \frac{\pi R_t^4 P'}{8\mu l} (P_1 - P_2) \quad (1)$$

- Μοριακή Ροή (Knudsen)  $Q_m = \frac{2\pi r^3 C}{3l} (P_2 - P_1) \quad (2)$

$$\text{Η μέση ταχύτητα } C = \sqrt{\left(\frac{8kT}{\pi m}\right)} = 14551 \sqrt{\frac{T}{M}} \text{ cm/s} \quad (3)$$



# Αντιδραστήρες CVD

- Μέση Ελεύθερη Διαδρομή

$$\lambda = \frac{kT}{\sqrt{2} P \pi \alpha^2} \quad (4)$$

$$\lambda = \frac{5 \times 10^{-3}}{P(\text{Torr})} \text{ cm στους } 300^\circ\text{K}$$

- Καθεστώς Ροής  $\frac{Q_v}{Q_m} = \frac{0.147 r}{\lambda} \quad (5)$

$$Q_{tr} = Q_v + Z Q_m \quad (6)$$

$$\frac{Q_{tr}}{Q_m} = \frac{Q_v}{Q_m} + Z = \frac{0.147 r}{\lambda} + Z$$

$$Z = \frac{1 + 2.507 r/\lambda}{1 + 3.095 r/\lambda} \quad (7)$$



# Αντιδραστήρες CVD

## Παράδειγμα 5

Βιομηχανικός αντιδραστήρας LPCVD χρησιμοποιείται για την εναπόθεση  $\text{Si}_3\text{N}_4$  από μίγμα  $\text{SiH}_2\text{Cl}_2/\text{NH}_3$  σε πίεση 0.05 Torr και θερμοκρασία  $910^\circ\text{C}$ . Η ακτίνα του αντιδραστήρα είναι 8 cm. Υποθέτοντας ότι η ενεργός διατομή των μορίων έχει διάμετρο 0.5 nm να προσδιορίσετε το ποσοστό μοριακής ροής.

$$\lambda = \frac{1.38 \times 10^{-16} T}{1.333 \times 10^3 P \pi (5 \times 10^{-8})^2} = 9.333 \times 10^{-6} \frac{T[\text{K}]}{P[\text{Torr}]} = 0.22 [\text{cm}]$$

$$Z = \frac{1 + 2.507 \cdot 8/0.22}{1 + 3.095 \cdot 8/0.22} = 0.81$$

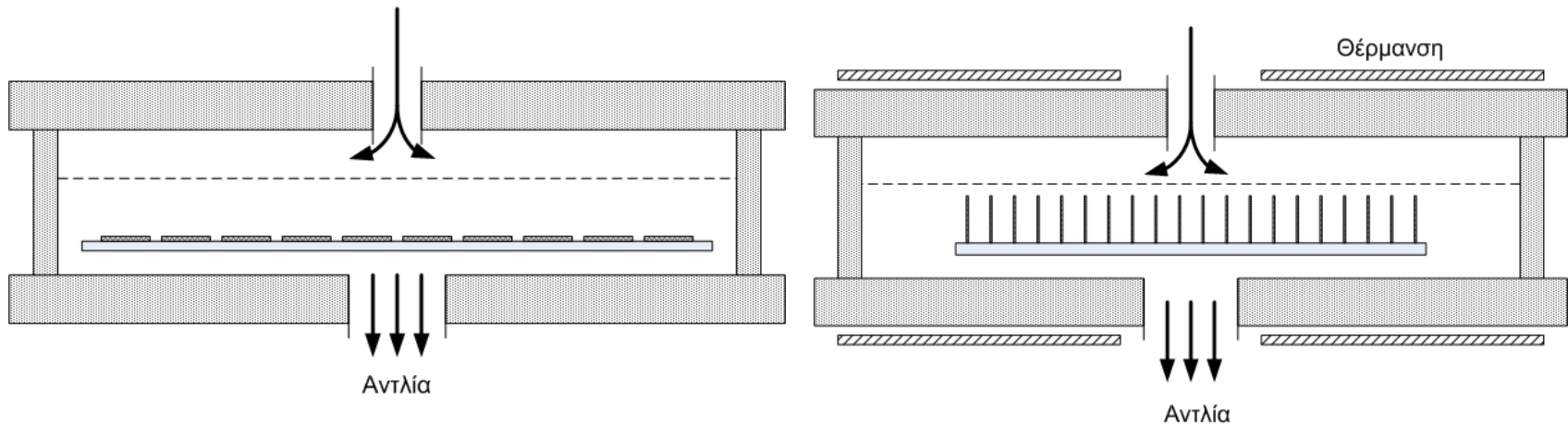
$$\frac{Q_v}{Q_m} = \frac{0.147 \cdot 8}{0.22} = 5.35 \quad F = \frac{Z}{Q_v/Q_m + Z} = \frac{0.81}{5.35 + 0.81} = 0.13$$



# Αντιδραστήρες CVD

- Μέση Ελεύθερη Διαδρομή

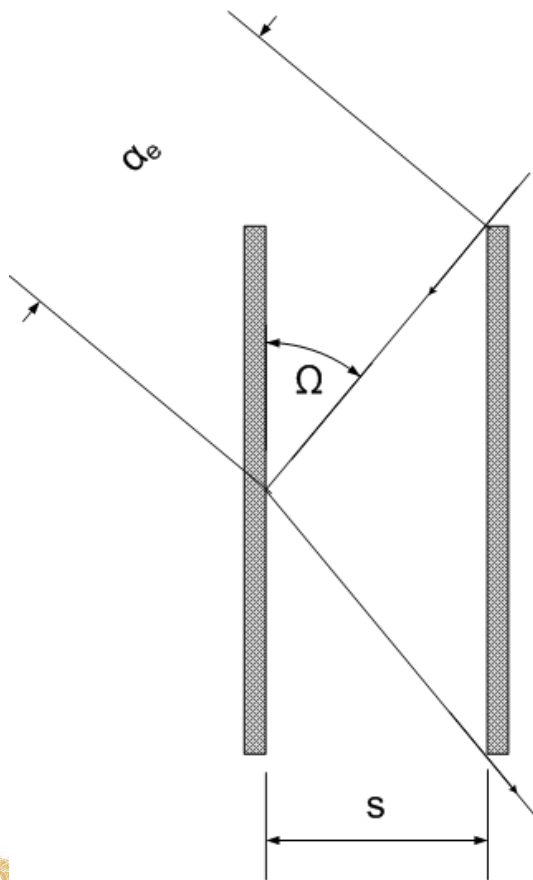
Από την εξίσωση (4) προκύπτει  $\lambda \approx \frac{10^{-2}}{P(\text{Torr})}$  cm στους  $600^\circ\text{K}$



Για αμιγώς μοριακή ροή (π.χ 99%) το  $r/\lambda$  πρέπει να είναι  $<0.069$

Αυτό συνεπάγεται μια ΜΕΔ  $\lambda > 7.5$  cm που επιτυγχάνεται σε πιέσεις  $P < 10^{-3}$  Torr

# Αντιδραστήρες CVD



$$\tan \Omega = \frac{s}{R}$$

$$\lambda = \frac{kT}{\sqrt{2} P \pi \alpha^2} > \alpha_e = \frac{s}{\sin \Omega}$$



# Αντιδραστήρες CVD

## Παράδειγμα 6

Εναπόθεση  $\text{SiO}_2$  σε πίεση 0.3 Torr και θερμοκρασία  $700^\circ\text{C}$  χρησιμοποιείται για την ομοιόμορφη κάλυψη σχισμών πλάτους 5 και βάθους 50  $\mu\text{m}$ . Να προσδιορίσετε την μέγιστη πίεση που ικανοποιεί το κριτήριο  $\lambda > a_e$ . Δίδεται  $\lambda = 5 \times 10^{-3} / P$  στους  $300^\circ\text{K}$ .

$$\tan \Omega = \frac{5}{50} = 0.1 \Rightarrow \Omega = 5.7^\circ \quad a_e = \frac{5}{\sin(5.7)} = 50.3 \mu\text{m}$$

$$\lambda \approx \frac{5 \times 10^{-3}}{P(\text{Torr})} \frac{973}{300} \text{ cm στους } 700^\circ\text{K}$$

$$\lambda \approx \frac{1.62 \times 10^{-2}}{P(\text{Torr})} > 50.3 \times 10^{-4} \quad P_{\text{max}} = 3.2 \text{ Torr}$$



# Τέλος Ενότητας



Σε περίπτωση που δεν αναφέρεται πηγή, το υλικό έχει δημιουργηθεί από τον ίδιο τον διδάσκοντα.



# Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Πανεπιστήμιο Πατρών, Όνομα μέλους ή μελών ΔΕΠ 2014:  
Δημήτριος Ματαράς. «Διεργασίες Παραγωγής Υλικών». Έκδοση: 1.0. Πάτρα  
2014. Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση:  
<https://eclass.upatras.gr/courses/CMNG2177/>.



# Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στο πλαίσιο του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Αθηνών**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο την αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.



# Σημείωμα Αδειοδότησης

Το παρόν υλικό διατίθεται με τους όρους της άδειας χρήσης Creative Commons Αναφορά, Μη Εμπορική Χρήση Παρόμοια Διανομή 4.0 [1] ή μεταγενέστερη, Διεθνής Έκδοση. Εξαιρούνται τα αυτοτελή έργα τρίτων π.χ. φωτογραφίες, διαγράμματα κ.λ.π., τα οποία εμπεριέχονται σε αυτό και τα οποία αναφέρονται μαζί με τους όρους χρήσης τους στο «Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων».



[1] <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Ως **Μη Εμπορική** ορίζεται η χρήση:

- που δεν περιλαμβάνει άμεσο ή έμμεσο οικονομικό όφελος από την χρήση του έργου, για το διανομέα του έργου και αδειοδόχο
- που δεν περιλαμβάνει οικονομική συναλλαγή ως προϋπόθεση για τη χρήση ή πρόσβαση στο έργο
- που δεν προσπορίζει στο διανομέα του έργου και αδειοδόχο έμμεσο οικονομικό όφελος (π.χ. διαφημίσεις) από την προβολή του έργου σε διαδικτυακό τόπο

Ο δικαιούχος μπορεί να παρέχει στον αδειοδόχο ξεχωριστή άδεια να χρησιμοποιεί το έργο για εμπορική χρήση, εφόσον αυτό του ζητηθεί.