

## Τεχνολογία πλάσματος

Το “πλάσμα” είναι να σύνολο ανισόθερμων θετικών ιόντων και ηλεκτρονίων που είναι εμβαπτισμένα σε μία “θάλασσα” ουδέτερων ατόμων. Το πλάσμα συντηρείται από συνεχή φαινόμενα ιονισμού και επανασύνδεσης.

Οι εκκενώσεις πλάσματος διακρίνονται σε **ισόθερμες ή θερμικές** και **ανισόθερμες**.

### Το θερμικό-ισόθερμο πλάσμα

- \* διηγείρεται υπό  **$P=1atm$**  και
- \* χαρακτηρίζεται από **υψηλό βαθμό ιονισμού** ( $n \approx 10^{14}-10^{19}$  particles/cm<sup>3</sup>) και
- \* **συγκρίσιμες ενέργειες ηλεκτρονίων και ιόντων** ( $T_e \approx T_i \cong 0.1eV$  όπου  $1eV \cong 11,600K$ ).

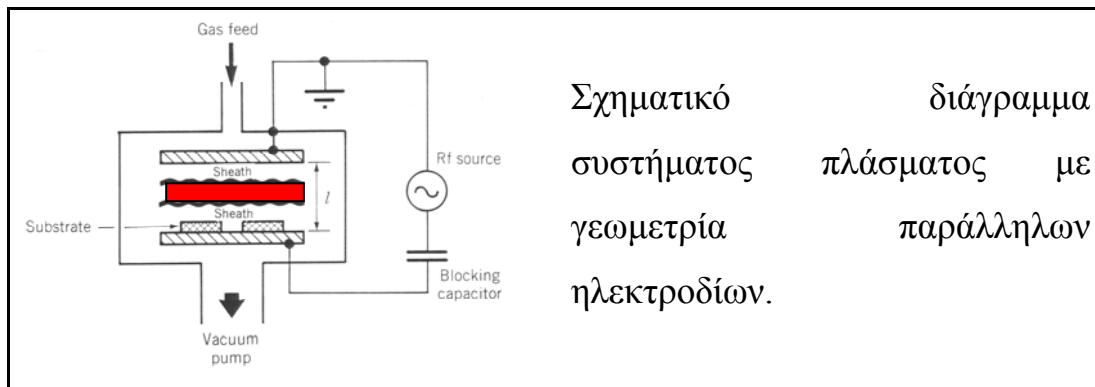
### Το ανισόθερμο πλάσμα

- \* διηγείρεται υπό **χαμηλή πίεση** (1mTorr-10Torr)
- \* χαρακτηρίζεται από **μικρό βαθμό ιονισμού** ( $n \approx 10^9-10^{12}$  particles/cm<sup>3</sup>) ενώ
- \* η θερμοκρασία των ηλεκτρονίων  **$T_e \approx 2-5eV \gg T_i \approx 25meV$** .
- \* Το ανισόθερμο πλάσμα διηγείρεται, ελέγχεται και σταθεροποιείται ευκολότερα από το ισόθερμο και **χρησιμοποιείται εκτενώς στη βιομηχανία υλικών**.

**Η τεχνολογία πλάσματος (εκκένωσης αίγλης)  $\Rightarrow$  μείωση της θερμοκρασίας ανάπτυξης** αφού η ενέργεια για τις αντιδράσεις δεν είναι θερμική αλλά παρέχεται από τα υψηλής ενέργειας ηλεκτρόνια (μέσω ανελαστικών κρούσεων) που βρίσκονται στην εκκένωση αίγλης.

### Εφαρμογές

- PECVD, sputtering, plasma etching, ECR-MBE.
- Η χαμηλή θερμοκρασία υποστρώματος  $\Rightarrow$  επικαλύψεις μετάλλων, ημιαγωγών, πλαστικών και διατάξεων ή εργαλείων σε προχωρημένο ή τελικό στάδιο κατασκευής (processing).
- Το πλάσμα απέχει από συνθήκες ισορροπίας  $\Rightarrow$  ανάπτυξη υπό μετασταθείς συνθήκες  $\Rightarrow$  νέα υλικά.



Στο πλάσμα συμβαίνουν ελαστικές και ανελαστικές κρούσεις που περιλαμβάνουν ηλεκτρόνια.

**Ελαστικές κρούσεις** : Η μέγιστη κινητική ενέργεια που μπορεί να μεταφερθεί

μεταξύ του βλήματος και στόχου είναι.

$$\frac{4m_i m_t}{(m_i + m_t)^2}$$

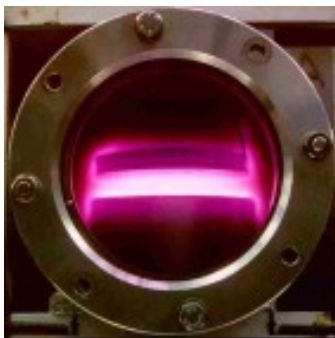
**Ανελαστικές κρούσεις:** ο στόχος κερδίζει εσωτερική ενέργεια  $\Delta U$ :

$$\left( \frac{2\Delta U}{m_i u_i^2} \right) = \frac{m_t \cos^2 \theta}{(m_i + m_t)}$$

**$\Rightarrow$  όταν ένα ηλεκτρόνιο συγκρουσθεί με άτομο υπό  $\theta=0$  μπορεί να μεταφέρει σε αυτό περίπου το 99.9% της ενέργειάς του.**

Οι βασικότερες ανελαστικές σκεδάσεις που συμβαίνουν στο πλάσμα:

1. **Ιονισμός**:  $e^- + A_2 \rightarrow 2e^- + A_2^+$ ,  $e^- + A_2 \rightarrow A^+ + A + 2e^-$
2. **Διάσπαση**:  $e^- + A_2 \rightarrow 2A + e^-$ ,  $e^- + A_2 \rightarrow A^+ + A^- + e^-$
3. **Διέγερση**:  $e^- + A_2 \rightarrow e^- + A_2^*$
4. **Αποδιέγερση (relaxation)**  $\Rightarrow$  **εκπομπή φωτονίων**. Ο χρόνος ζωής (lifetime) του φαινομένου  $\sim ns - s$ . Στον μηχανισμό αυτό οφείλεται και το φώς που εκπέμπει το πλάσμα.
5. **Επανασύνδεση**:  $e^- + A^+ \rightarrow A_2$ . Συμβαίνει κυρίως στα τοιχώματα του αντιδραστήρα  $\Rightarrow$  μείωση της συγκέντρωσης των  $e^-$  & ιόντων που υπάρχουν στο πλάσμα  $\Rightarrow$  «σκοτώνει» το πλάσμα.



Το «χρώμα» του πλάσματος είναι χαρακτηριστικό του διεγερθέντος αερίου.

## Η «θερμοκρασία» των ηλεκτρονίων & των ιόντων.

**Φαινόμενα επανασύνδεσης** → μείωση της συγκέντρωσης e & ιόντων.

Επίσης το σύστημα χάνει ενέργεια υπό μορφή **θερμότητας** στα ηλεκτρόδια και τα τοιχώματα του αντιδραστήρα.

**Επομένως η διατήρηση της εκκένωσης αίγλης ⇔ παροχή ενέργειας υπό μορφήν εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου E.**

**Επειδή  $m_e \ll m_i \Leftrightarrow$  το πεδίο λειτουργεί βασικά επάνω στα ηλεκτρόνια**

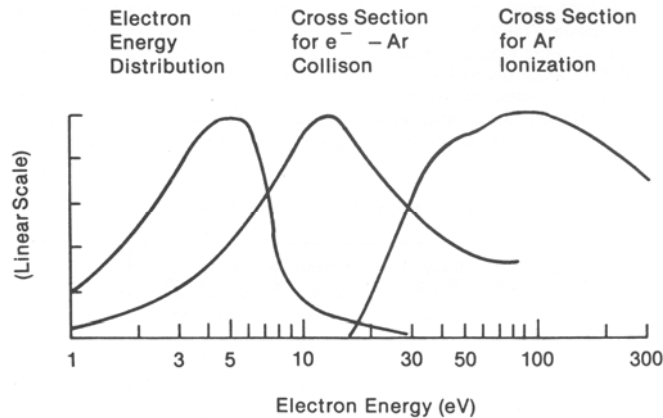
Τα ηλεκτρόνια έχουν υψηλή κινητική ενέργεια (2-8 eV), μικρό μέρος της οποίας χάνουν με συγκρούσεις με τα θετικά ιόντα και τα ουδέτερα άτομα (25 meV).

Η «θερμοκρασία» των ηλεκτρονίων και των ιόντων:  $\frac{1}{2} m v^2 = \frac{3}{2} kT$

**\*\*** Ηλεκτρόνιο με  $E=3\text{eV}$  έχει  $T_e=23,200\text{K}$

**\*\*** Ιόν με  $E=25\text{ meV}$  έχει  $T_{\text{ιόντος}}=300-500\text{K}$

**⇒ το πλάσμα απέχει πολύ από κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας.**



**Εκκένωση Ar υπό πίεση 1 Torr.** Κατανομή της ενέργειας των  $e$  ( $E_e$ ) και των πιθανοτήτων για ιονισμό Ar και κρούσεις Ar- $e$ . Η  $E_e$  είναι ασύμμετρη κατανομή Maxwell με μέση ενέργεια 5-6 eV. Μόνον τα ηλεκτρόνια με τις υψηλές ενέργειες είναι ικανά να προκαλέσουν ιονισμό. Αύξηση της rf ισχύος αλλάζει ολόκληρη την κατανομή (μέση ενέργεια και τα tails)  $\Rightarrow$  η πρόβλεψη των αλλαγών στο πλάσμα υπό συνθήκες μεταβαλλόμενης rf ισχύος είναι δύσκολη. Ο βαθμός πολυπλοκότητας αυξάνει όταν χρησιμοποιούνται μείγματα αερίων, π.χ.  $\text{SiH}_4/\text{NH}_3$ ,  $\text{SiH}_4/\text{NH}_3/\text{N}_2$  κλπ

**Η πίεση είναι καθοριστική για τη σταθερότητα της εκκένωσης.**

**Όταν  $P < 0.1$  Torr** η μέση ελεύθερη διαδρομή των ηλεκτρονίων και των μορίων είναι πολύ μεγάλη.  $\Rightarrow$  μειώνονται οι πιθανότητες να συμβούν κρούσεις και ιονισμός του αερίου  $\Rightarrow$  μείωση της ταχύτητας ανάπτυξης και ενδεχόμενες αστάθειες στο πλάσμα.

**Όταν  $P > 5$  Torr** η συχνότητα μοριακών κρούσεων αυξάνει  $\Rightarrow$  ομογενής πυρηνοποίηση στην αέριο φάση  $\Rightarrow$  αρνητικές επιπτώσεις στην ομοιομορφία του πάχους και της χημικής σύστασης του υμενίου.

## Τα δυναμικά στο πλάσμα-δημιουργία των sheaths/περιοχών φορτίων χώρου

\*\* Ρεύμα ηλεκτρονίων  $j_e = \frac{en_e v_e}{4}$

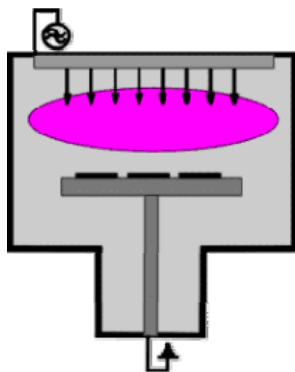
\*\* Ρεύμα ιόντων  $j_i = \frac{en_i v_i}{4} \ll j_e$

\*\* όπου  $n_e = n_i$  και  $v_e \gg v_i$

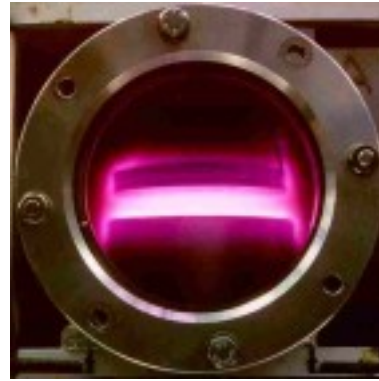
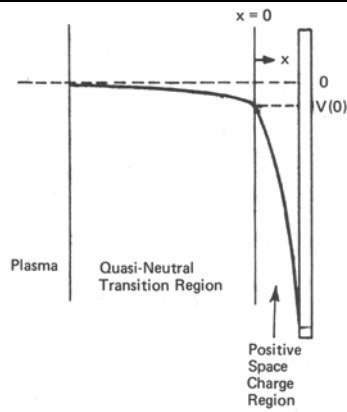
$j_i \ll j_e$

⇒ το υπόστρωμα φορτίζεται αρνητικά ⇒ το  $j_e$  ↓ ⇒ το πλάσμα σβήνει....

**Δυναμικά** : το δυναμικό  $V_f$  του υποστρώματος (floating potential) και το δυναμικό του πλάσματος  $V_p$ , όπου το  $V_f < V_p$ .



Η διαφορά δυναμικού ( $V_f - V_p = 1-5$  V) απωθεί τα ηλεκτρόνια από τις μονωμένες επιφάνειες ⇒ αναπτύσσεται πεδίο (θετικών) φορτίων χώρου που ονομάζεται sheath. Το sheath είναι σκοτεινό αφού η  $n_e$  είναι μικρότερη ⇒ συμβαίνουν λιγότερα γεγονότα διέγερσης/αποδιέγερσης.



Οι διαφορετικές περιοχές του sheath της καθόδου. Τα sheaths εμφανίζονται σε όλες τις ηλεκτρικά μονωμένες επιφάνειες.

### Επιπτώσεις του sheath

- ✚ **Βομβαρδισμός του υποστρώματος από επιταχυνόμενα ιόντα με κινητική ενέργεια  $\approx V_p - V_f$ , δηλαδή 1-5 eV. Τυπικές τιμές της ενέργειας σύνδεσης των ατόμων στο υπόστρωμα είναι της τάξης των 1-10 eV  $\Rightarrow$  επιφανειακή καταστροφή.**
- ✚ **Επιταχύνει τα ηλεκτρόνια που φθάνουν στο sheath προς την περιοχή της εκκένωσης  $\Rightarrow$  το sheath συντελεί στην μεταφορά ενέργειας και ηλεκτρονίων στο πλάσμα.**
- ✚ **Τα ηλεκτρόνια βομβαρδίζουν γειωμένες επιφάνειες.**

☛ Το πλάσμα έχει το υψηλότερο θετικό δυναμικό του συστήματος και τα ηλεκτρικά πεδία που απωθούν τα ηλεκτρόνια περιορίζονται στα sheaths.

**Το εύρος  $d$  του sheath** εξαρτάται από την πίεση  $P$ , π.χ. για εκκένωση Ar το γινόμενο  $Pd=0.4$  Torr cm.

Η κατανομή των sheath voltages στα ηλεκτρόδια :  $\frac{V_1}{V_2} = \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^4$  όπου  $A_1$  και  $A_2$  είναι το εμβαδόν των ηλεκτροδίων rf και της γείωσης.

**Ανισότητα μεταξύ των  $A_2$  και  $A_1$  προκύπτει όταν γειωθούν και τα τοιχώματα του αντιδραστήρα.**

**Μήκος Debye  $\lambda_D$ :** παράμετρος που χαρακτηρίζει το πλάσμα και τα sheaths:

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{kT_e \epsilon_0}{n_e e^2}}$$

Το  $\lambda_D$  περιγράφει την ταχύτητα με την οποία αποσβέννεται μία διαταραχή δυναμικού στο πλάσμα, αφού σε απόσταση  $\lambda_D$  η διαταραχή μειώνεται στο  $0.37/e$  της αρχικής τιμής.

Ενδεικτικές τιμές  $n_i = n_e = 10^{10}/\text{cm}^3$  και  $kT_e = 2\text{eV} \Rightarrow \lambda_D = 105\mu\text{m}$ .

### dc & ac εκκένωση αίγλης

**Πρόβλημα** στην διατήρηση της εκκένωσης εμφανίζεται όταν γίνεται ανάπτυξη μονωτικών υλικών. **Ο μονωτής λειτουργεί σαν μη-γειωμένο (floating) υπόστρωμα και φορτίζεται  $\Rightarrow$  μείωση του δυναμικού που συντηρεί την εκκένωση και το “σβύσιμό” της.**

**Λύση** : **χρήση rf αντί για dc πεδίου**  $\Rightarrow$  το θετικό φορτίο που συσσωρεύεται στον μισό κύκλο εξουδετερώνεται από τα προσπίπτοντα ηλεκτρόνια κατά τη διάρκεια του επόμενου μισού κύκλου.

Η συχνότητα της πηγής ac είναι  $f \gg 100\text{kHz} \gg$  του χρόνου  $\Delta t$  που απαιτείται για τη συσσώρευση (build-up) του φορτίου στον μονωτή.



Η εκκένωση γίνεται **ανισόθερμη** (non-equilibrium) για  $f > 1\text{MHz}$  οπότε τα ιόντα μένουν πρακτικώς ακίνητα υπό την επίδραση του πεδίου.

**Διεθνείς συμβάσεις** : Οι τιμές ραδιοσυχνοτήτων είναι πολλαπλάσιες και υποπολλαπλάσιες του 13.56MHz, (27.12MHz, 2.54GHz κλπ).

Οι dc εκκενώσεις αίγλης χρησιμοποιούνται για την ανάπτυξη μεταλλικών υμενίων καθώς και σε συστήματα sputtering όταν ο στόχος είναι μεταλλικός.

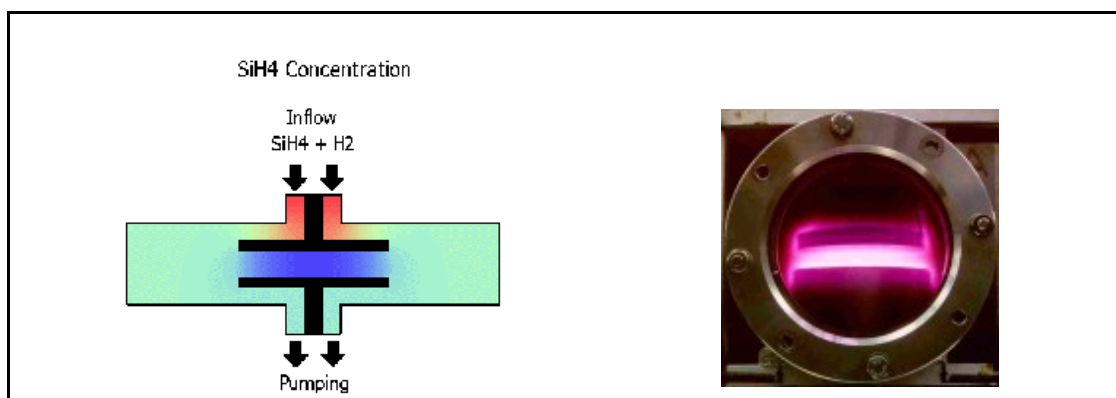
**Matching network** : Η γεννήτρια rf έχει μιγαδική αντίσταση εξόδου  $50\Omega \Rightarrow$  για την καλύτερη σύζευξη με τον αντιδραστήρα χρησιμοποιούνται κυκλώματα LC που ονομάζονται matching networks.

## Εφαρμογές της τεχνολογίας πλάσματος

### Plasma enhanced CVD (PECVD)

Οι αντιδράσεις προάγονται πλέον σε ατμόσφαιρα πλάσματος και όχι θερμικά.


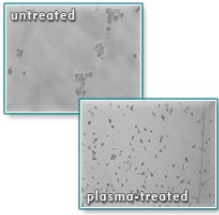
$\Rightarrow$  **χαμηλή θερμοκρασία υποστρώματος (200-400°C).**

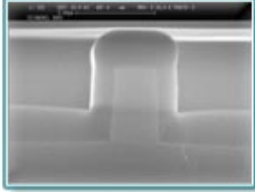
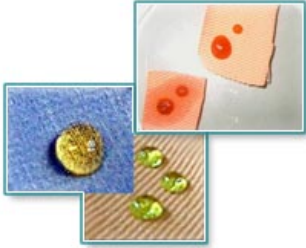
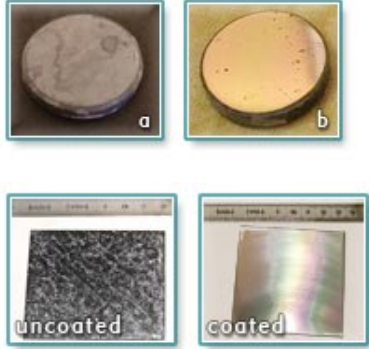


**Τυπικές συνθήκες για PECVD είναι :**

- Πίεση 0.1-2 Torr
- Εφαρμοζόμενο δυναμικό στο υπόστρωμα  $V=150-500V$
- πυκνότητα ισχύος  $W_{rf} \leq 0.5 Wcm^{-2}$
- μέση ελεύθερη διαδρομή  $\leq 0.01 cm$
- $T=200-350 \text{ }^\circ C$

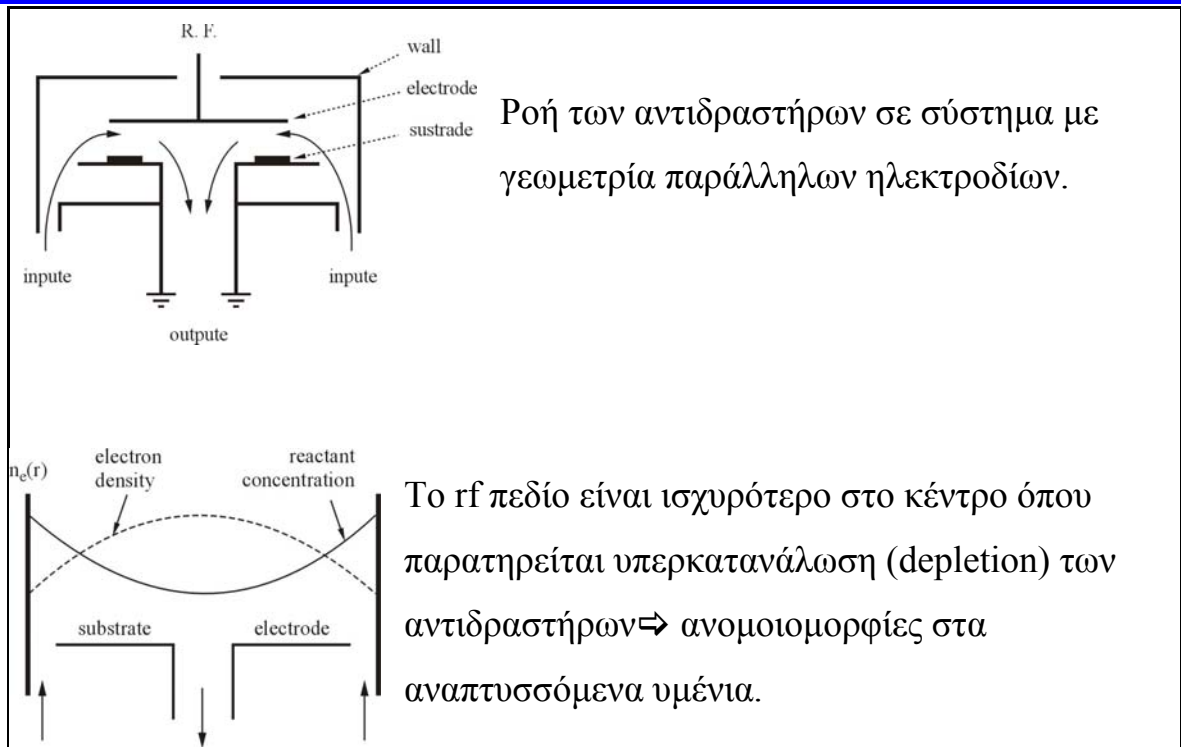
**Εφαρμογές της PECVD [www.plasmasolution.it/e-settori.htm](http://www.plasmasolution.it/e-settori.htm)**

<p><b>Πολυμερή</b></p> 	<p>Enhancing/reducing surface energy; improved wettability; improved adhesion of inks and dyes; improved metallization; induced immobilization of catalysts. <i>Super hydrophobic plasma coating on polyethylene</i></p>
<p><b>Βιολογικά</b></p> 	<p>Cell-adhesive surfaces; cell-repulsive (non fouling) surfaces; surface activation for biomolecule immobilization; cell growth test for biocompatibility; surfaces resistant to bacterial colonization; micro-and nano-patterning.</p>
<p><b>Μνημεία, έργα τέχνης</b></p>	<p>Cleaning procedures on metals; transparent protective coatings; anti-tarnish treatments on silver.</p>
<p><b>Βιομηχανία τροφίμων &amp; φαρμάκων</b></p>	<p>Transparent gas-vapour barrier coatings; antibacterial active coatings.</p>
<p><b>Κοκκώδη υλικά &amp; σκόνες</b></p>	<p>Homogeneous deposition/treatment processes on materials in form of granules/powder.</p>
<p><b>Μεμβράνες</b></p>	<p>Improved transport properties; activation for molecule immobilization.</p>
<p><b>Νανοτεχνολογία</b></p>	<p>Coatings embedding metal/ceramic nanoparticles in organic PE-CVD matrices.</p>
<p><b>μ- &amp; οπτο-ηλεκτρονική</b></p>	<p>Dry etching and deposition of metals, semiconductors and dielectrics.</p>

	<p><i>PECVD SiO<sub>2</sub> on patterned Si.</i></p>
<p><b>Χαρτί &amp; υφάσματα</b></p> 	<p>Enhanced hydrophobic/hydrophilic character; improved dyeability; oleophobic stain resistant surfaces; flame retardancy; releasing paper.</p> <p><i>PECVD προστασία υφάσματος από έλαια.</i></p>
<p><b>Προστασία &amp; διακόσμηση</b></p> 	<p>Corrosion protective coatings on metals and alloys; anti scratch coatings on plastics; UV screen layers.</p> <p><i>PECVD SiN<sub>x</sub> coating against corrosion on Ag<sub>0.9</sub>Cu<sub>0.1</sub></i></p> <p><i>PECVD protective coating on Al : exposure to salt spray for 24 hrs</i></p>

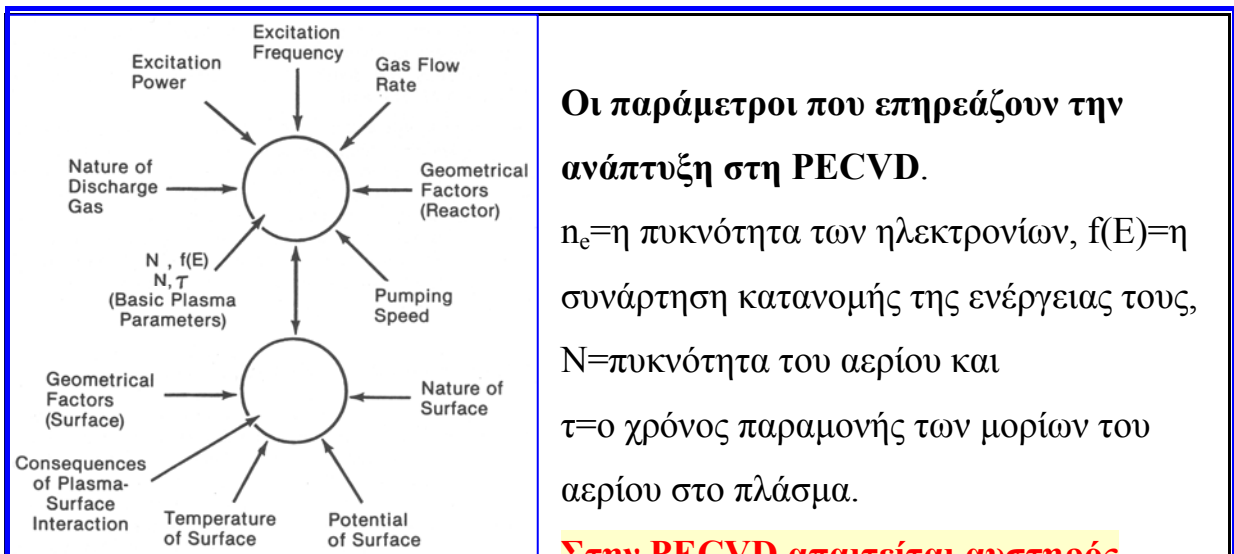
Η ανάπτυξη κατά PECVD γίνεται υπό συνθήκες που αποκλίνουν από την κινητική ισορροπία ⇒ **ευέλικτη μέθοδος** ⇒ **ανάπτυξη μετασταθών ενώσεων**, με ευρύ φάσμα χημικής σύστασης και ιδιοτήτων, οι οποίες δεν είναι δυνατό να αναπτυχθούν υπό συνθήκες θερμοδυναμικής ισορροπίας.

- Βομβαρδισμός από ηλεκτρόνια → σε γειωμένες επιφάνειες
- Βομβαρδισμός από ιόντα (με ενέργειες μερικά eV έως 10<sup>2</sup> eV) → στα υποστρώματα.



### Πλεονεκτήματα της PECVD:

1. μεγάλες ταχύτητες ανάπτυξης,
2. χαμηλή θερμοκρασία υποστρώματος ( $T < 400^\circ\text{C}$ ), που μειώνει την αλληλοδιάχυση (interdiffusion) και επιτρέπει την εφαρμογή σε διατάξεις σε προχωρημένο στάδιο κατασκευής ,
3. το ίδιο σύστημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εναπόθεση και ξηρή χημική χάραξη (dry etching).



**Οι παράμετροι που επηρεάζουν την ανάπτυξη στη PECVD.**

$n_e$ =η πυκνότητα των ηλεκτρονίων,  $f(E)$ =η συνάρτηση κατανομής της ενέργειας τους,  $N$ =πυκνότητα του αερίου και  $\tau$ =ο χρόνος παραμονής των μορίων του αερίου στο πλάσμα.

**Στην PECVD απαιτείται αυστηρός**

**έλεγχος των συνθηκών ανάπτυξης και του συστήματος (hardware)**

**προκειμένου να επιτευχθούν επαναλήψιμα αποτελέσματα.**

**Καλός έλεγχος της χημικής σύστασης και του πάχους** ⇨

- το πλάσμα πρέπει να είναι σταθερό για μικρές μεταβολές της  $rf$  ισχύος και
- οι αλλαγές των παραμέτρων που επηρεάζουν την πυκνότητα του πλάσματος (π.χ.  $rf$  ισχύς, ολική πίεση, ροή αντιδραστηρίων) πρέπει να είναι μικρές.

Οι αλληλεπιδράσεις πλάσματος-επιφάνειας υποστρώματος είναι πολύπλοκες και δεν είναι πλήρως κατανοητές. Όμως έχει παρατηρηθεί ότι για καλύτερη επαναληψιμότητα της ανάπτυξης η **θερμοκρασία** και η **γεωμετρία** (π.χ. θέση υποστρωμάτων) πρέπει να διατηρούνται σταθερές.

**Τα κυριότερα μειονεκτήματα της PECVD είναι:**

1. τα αναπτυσσόμενα υμένα περιέχουν **μεγάλη συγκέντρωση υδρογόνου** το οποίο είναι ασταθές σε θερμοκρασία υψηλότερη της θερμοκρασίας ανάπτυξης,
2. ο έλεγχος του **stress** και της ομοιομορφίας δεν είναι ικανοποιητικός
3. μπορεί να υπάρχει **υψηλή συγκέντρωση σωματιδίων** (particulates) η πυρηνοποίηση των οποίων αρχίζει στην αέριο φάση ή τα τοιχώματα του

αντιδραστήρα  $\Rightarrow$  σωματίδια με αρχική διάμετρο λίγων nm που αυξάνεται γρήγορα και φθάνει την τάξη των mm. Τα προβλήματα της ομοιομορφίας και των particulates συνδέονται στενά με την γεωμετρία του αντιδραστήρα.

### Παραδείγματα ανάπτυξης και εφαρμογών υλικών που αναπτύσσονται με PECVD

υλικό	Εφαρμογή	Αντιδραστήρια
a-Si:H	<i>μ-ηλεκτρονική, φωτοβολταϊκά</i>	SiH <sub>4</sub> /H <sub>2</sub>
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> , SiON,SiO <sub>2</sub>	<i>Προστατευτικά υμένα μάσκες, φακοί</i>	SiH <sub>4</sub> /N <sub>2</sub> , SiCl <sub>4</sub> /NH <sub>3</sub> , SiCl <sub>4</sub> O <sub>2</sub>
SiC	<i>ηλεκτρονικά, σκληρές επικαλύψεις (hard coatings)</i>	SiH <sub>4</sub> /hydrocarbon ή TMS (trimethyl-Si)
SiO <sub>2-x</sub> F <sub>x</sub> , GeO <sub>2</sub>	<i>οπτικές ίνες</i>	SiCl <sub>4</sub> /C <sub>2</sub> F <sub>6</sub> /O <sub>2</sub> , GeCl <sub>4</sub> /O <sub>2</sub>
TiN, TiC	<i>προστατευτικά υμένα ενάντια στη φθορά (wear resistant)</i>	TiCl <sub>4</sub> /NH <sub>3</sub> , TiCl <sub>4</sub> /hydrocarbons
BN, BC	<i>Σκληρά υμένα που προστατεύουν από τη φθορά (hard and wear resistant coatings), ηλεκτρονικά, μάσκες</i>	BCl <sub>3</sub> /NH <sub>3</sub> , diborane/hydrocarbon
a-C:H, a-C διαμάντι	<i>Σκληρά υμένα με μικρό συντελεστή τριβής, διατάξεις μικροκυμάτων, μάσκες, διατάξεις οπτικής, ακουστικής &amp; ηλεκτρονικής</i>	hydrocarbons, alcohols, CO/H <sub>2</sub>
ThO <sub>2</sub> /W	<i>κάθοδοι υψηλής ισχύος</i>	WF <sub>6</sub> /MO Th-compound

**Συγκριτικός πίνακας επιλεγμένων ιδιοτήτων SiN<sub>x</sub> που αναπτύσσεται με CVD και PECVD.**

Ιδιότητα	CVD (900°C)	PECVD (300 °C)
Χημική σύσταση	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	SiN <sub>x</sub> :H
Λόγος Si/N	0.75	0.8-1.3
Πυκνότητα (g/cm <sup>3</sup> )	2.8-3.1	2.5-2.8
Δείκτης διάθλασης	2.0-2.1	2.0-2.1
Διηλεκτρική σταθερά	6-7	6-9
Διηλεκτρική ισχύς V/cm)	1x10 <sup>7</sup>	6x10 <sup>6</sup>
Ειδική αντίσταση όγκου (ohm cm)	10 <sup>15</sup> -10 <sup>17</sup>	10 <sup>15</sup>
Θερμική σταθερότητα	Εξαιρετική	Μεταβλητή για T>400 °C
Ταχύτητα χημικής χάραξης σε BHF (Å/min)	10-15	200-300

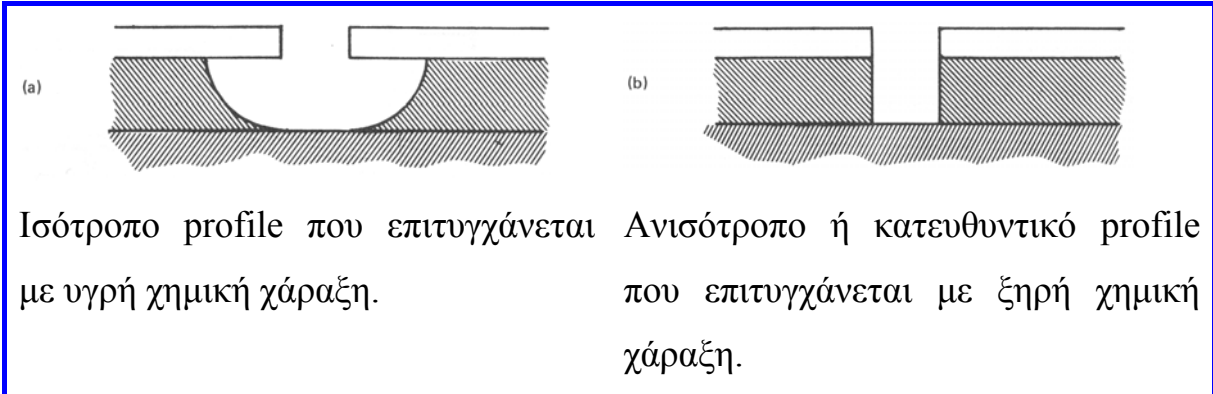
**Ξηρή χημική χάραξη σε περιβάλλον πλάσματος.**

Η χημική χάραξη Si, ενώσεων και κραμάτων του Si καθώς και ορισμένων μετάλλων μπορεί να γίνει στην αέριο φάση χρησιμοποιώντας ενώσεις που περιέχουν άτομα **αλογόνων**. Τα ιόντα που σχηματίζονται στο περιβάλλον πλάσματος αντιδρούν με το δείγμα και σχηματίζουν αέρια υποπροϊόντα.

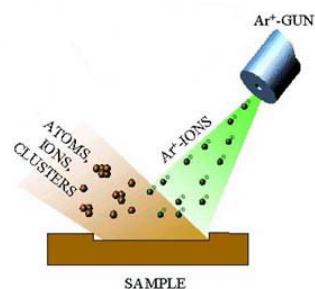
Για την ξηρή χημική χάραξη (dry etching)

- χρησιμοποιούνται **συμμετρικοί αντιδραστήρες** (δηλ. οι επιφάνειες της γείωσης και της καθόδου είναι ίσες),
- με παράλληλα ηλεκτρόδια που εντοπίζουν το πλάσμα ανάμεσά τους
- & λειτουργούν υπό πίεση 10<sup>-1</sup>-10<sup>1</sup> Torr.

Το plasma etching είναι ανισότροπο ή κατευθυντικό σε αντίθεση με το υγρό etching που είναι ισότροπο .



**Reactive ion etching (RIE).** η αντίδραση στην ατμόσφαιρα πλάσματος συνδυάζεται με sputtering

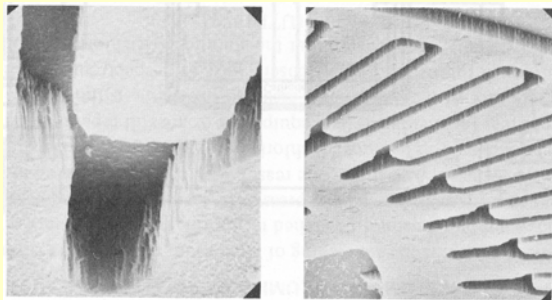


- **Sputtering:** Ιόντα με φαινόμενα μεταφοράς ορμής αποσπών άτομα από την επιφάνεια του στόχου.
- Στην RIE το αδρανές αέριο για sputtering αντικαθίσταται από τα **αντιδραστήρια**.
- Το δείγμα τοποθετείται στην κάθοδο που έχει πολύ μικρότερη επιφάνεια από την γείωση (γειώνονται τα τοιχώματα του αντιδραστήρα)  $\frac{V_1}{V_2} = \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^4$
- ⇒ η RIE γίνεται υπό συνθήκες που ευνοούν τον βομβαρδισμό του υποστρώματος με ενεργητικά ιόντα.
- η πίεση λειτουργίας κυμαίνεται στην περιοχή  $10^{-3}$ - $10^{-1}$  Torr



### Συνήθη αντιδραστήρια για ξηρή χημική χάραξη

υλικό	αέριο	ταχύτητα (Å/min)
Al, Al-Si, Al-Cu	$\text{BCl}_3 + \text{Cl}_2$	500
poly-Si	$\text{Cl}_2$	500-800
$\text{SiO}_2$	$\text{CF}_4 + \text{H}_2$	500

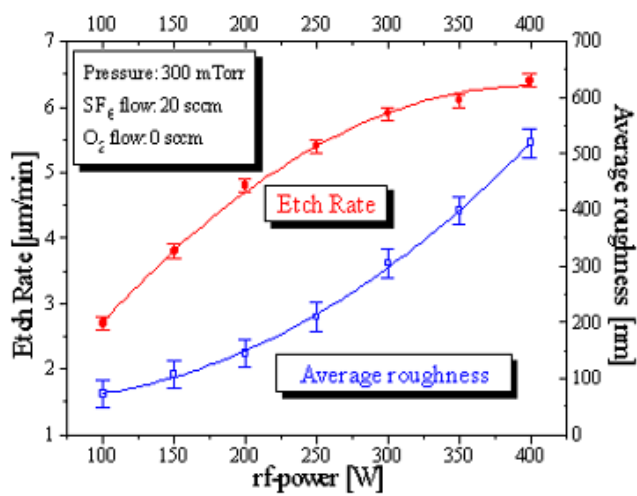
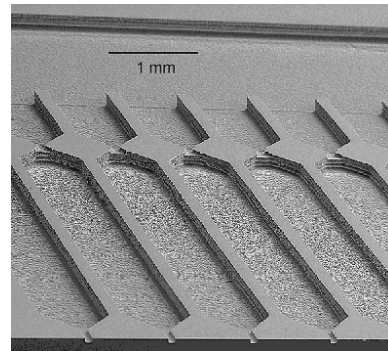
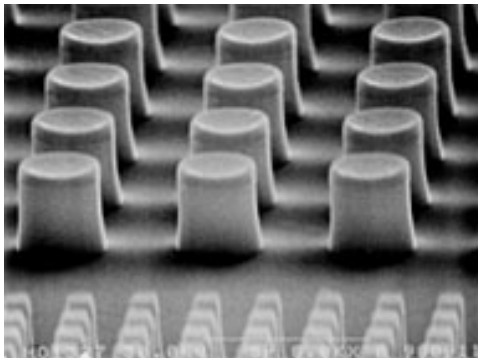


Ξηρή χημική χάραξη επιμετάλλωσης σε τρανζίστορ μικροκυμάτων. Το υμένιο του μετάλλου έχει πάχος  $2\mu\text{m}$  ενώ οι εγκοπές έχουν εύρος  $1.2\mu\text{m}$ .

### **Plasma ashing ή stripping** : ειδική περίπτωση της ξηρής χημικής χάραξης

- ⇒ χρησιμοποιείται για την διάσπαση και απομάκρυνση (κάψιμο) φωτοευπαθών ουσιών, που χρησιμοποιούνται στην λιθογραφία (αποτελούνται κυρίως από C και H), με διαδικασία οξείδωσης σε πλάσμα οξυγόνου.
- ⇒ Η αντίδραση έχει σαν αέρια υποπροϊόντα  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$  και  $\text{H}_2\text{O}$ .
- ⇒ Γίνεται σε αντιδραστήρες με παράλληλα ηλεκτρόδια, το δείγμα τοποθετείται στο γειωμένο ηλεκτρόδιο και η πίεση είναι στην περιοχή 0.1-100 Torr.

### Δομές που κατασκευάστηκαν με ξηρή χημική χάραξη



Μεταβολή της ταχύτητας της ξηρής χημικής χάραξης και της επαγόμενης τραχύτητας στην επιφάνεια, συναρτήσει της rf ισχύος.