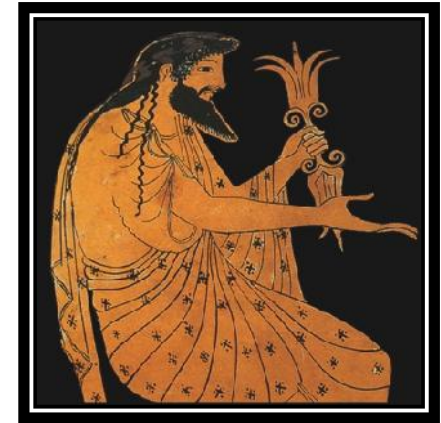
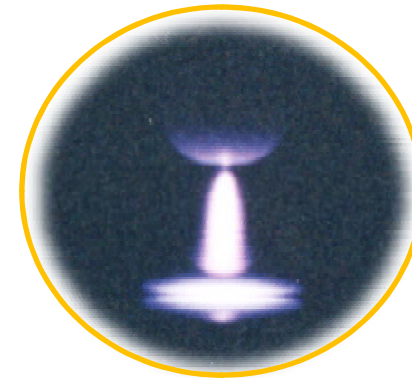
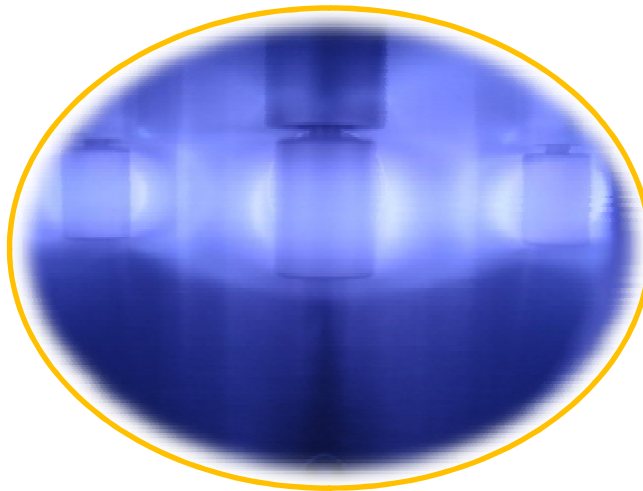


Πανεπιστήμιο Πατρών
Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχ. & Τεχνολογίας Υπολογιστών
Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων
svarnas@ece.upatras.gr



**“Μια εισαγωγή στο ψυχρό πλάσμα ηλεκτρικών εκκενώσεων
ως ‘πολυ-εργαλείο’ για τη νανοτεχνολογία”**



*Δρ Π. Σβάρνας
Επικ. Καθηγητής*

Πλάσμα - ΝανοΕπιστήμη



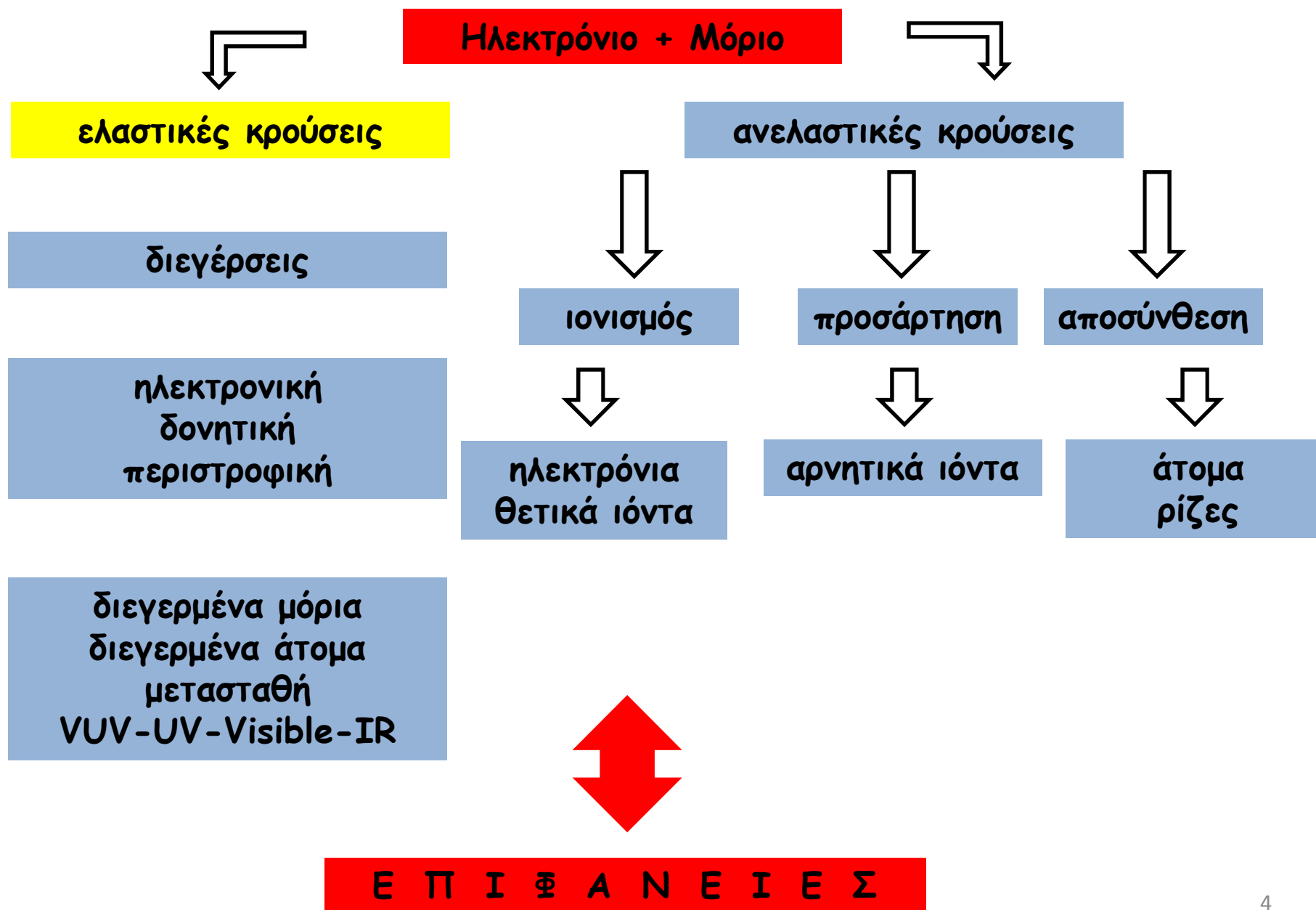
Πλάσμα ηλεκτρικών εκκενώσεων

495-435 π.Χ.

συνεχής προσφορά ενέργειας σε αέριο
(συνήθως ηλεκτρικής)



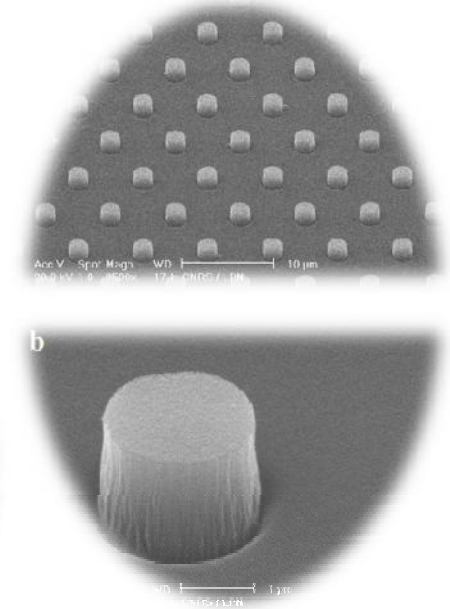
Πλάσμα: ένα ολόκληρο χημικό εργαστήριο



Βασικές παράμετροι πλάσματος

- Πυκνότητα ηλεκτρονίων
- Κατανομή ενέργειας ηλεκτρονίων
- Ενέργεια ουδετέρων - Πυκνότητα μετασταθών
- Πυκνότητα θετικών/αρνητικών ιόντων
- Μήκος Debye
- Συχνότητα πλάσματος
- Πυκνότητα ελεύθερων ριζών
- Ενεργές διατομές, κ.α.

Τυπικό σύστημα πλάσματος χαμηλών πιέσεων



PECVD, RIE



χημική τροποποίηση

Θερμικό vs. Ψυχρό πλάσμα

Θερμικό πλάσμα

Υψηλή θερμοκρασία
αερίου
 $T_e \sim T_i \sim T_n \sim 1 \text{ eV}$

Υψηλές πυκνότητες
φορέων

Σφαιροποίηση και
κρυσταλλοποίηση

Υψηλός ρυθμός
πυρηνοποίησης

Κατάλληλο για σύνθεση νανοδομών που απαιτούν υψηλές θερμοκρασίες για πυρηνοποίηση, επιταχυνόμενη ανάπτυξη και παραμένουν δομικά σταθερές στις υψηλές θερμοκρασίες → π.χ. ΝΑΝΟΣΩΛΗΝΕΣ ΑΝΘΡΑΚΑ

JPD 40 2223 (2007)

Ψυχρό πλάσμα (εκτός θερμοδυναμικής ισορροπίας)

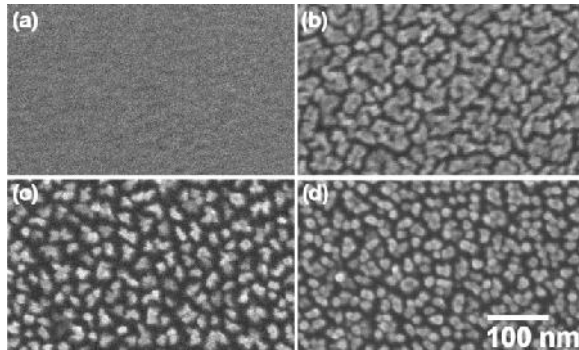
Χαμηλή θερμοκρασία
αερίου
 $T_i \sim T_n \sim 0.05 \text{ eV}$
 $T_e \sim 1-2 \text{ eV}$

Σχετικά χαμηλές
πυκνότητες φορέων

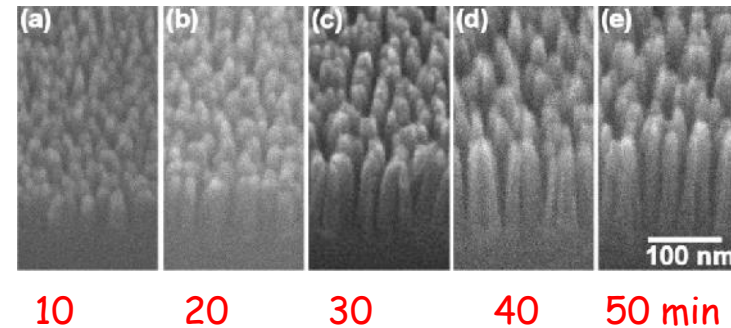
Κατάλληλο για ό,τι δομή απαιτεί χαμηλή θερμοκρασία επεξεργασίας π.χ. επιστρώσεις μικροηλεκτρονικής, πολυμερή κ.α. Επίσης για ευαίσθητες νανο-οργανώσεις που απαιτούν ελεγχόμενη και χαμηλή παροχή δομικών στοιχείων.

Διαδικασίες βασισμένες σε ψυχρό πλάσμα

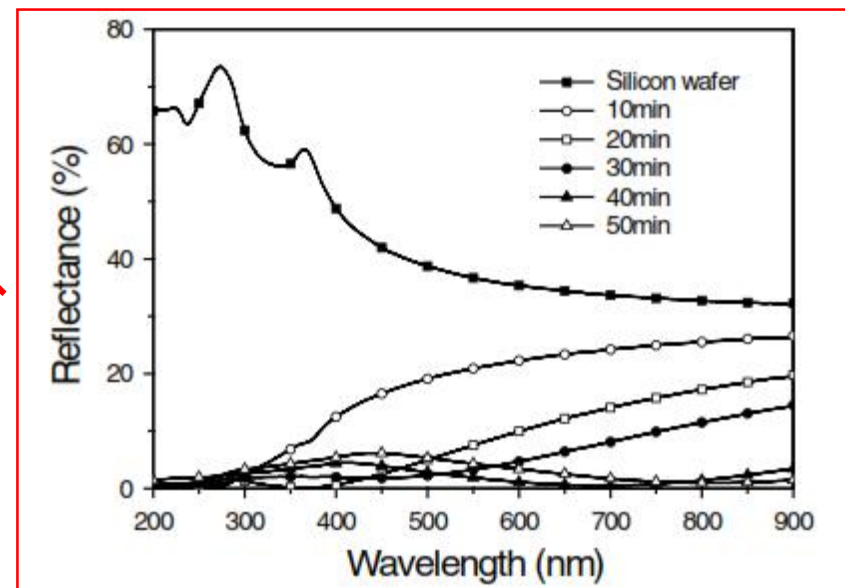
Νανο-γρασίδι από RF πλάσμα H_2 (13.56 MHz, 300 kHz dual frequency)



0, 100, 200, 300 W σε
υποστρώματα Si (20 min)



Αντι-ανακλαστικές επιφάνειες

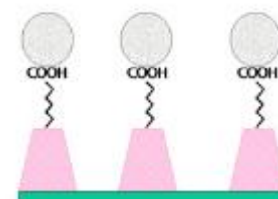
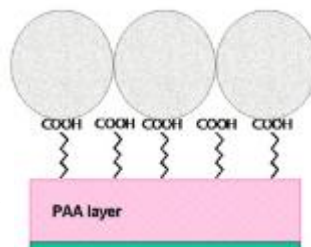


Υποβοηθούμενη από πλάσμα δημιουργία χημικών νανο-μοτίβων για βιο-διεπιφάνειες 1/2

Εγχάραξη: ICP με μαγνητικά πεδία
RF-πολωμένο υπόστρωμα

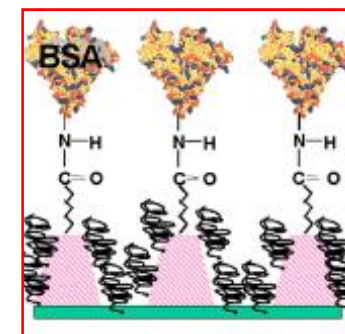
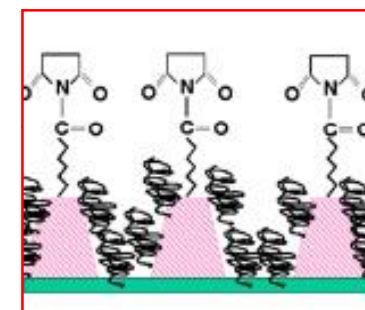
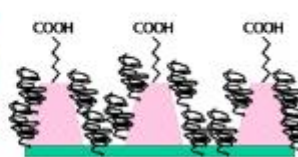
παλμικό RF:
αντιρρυπαντικό
στρώμα

νανοσφαίρες PS



Ultrasonic bath

(d)



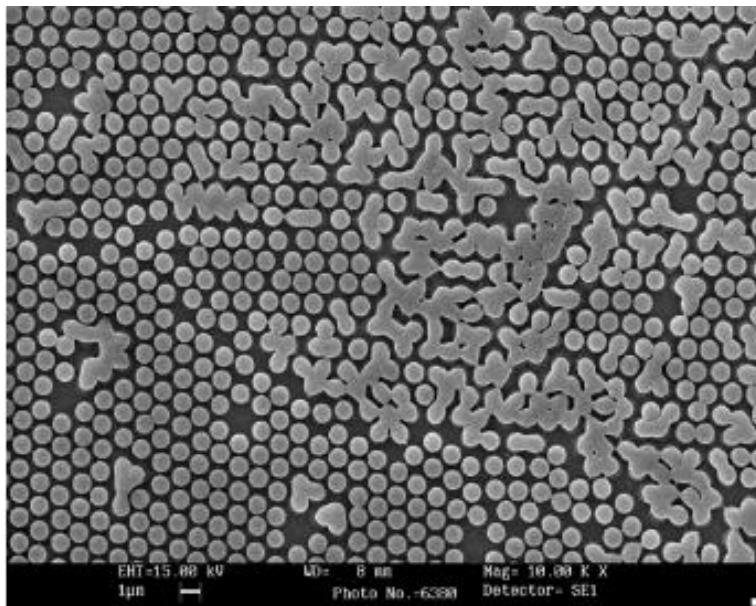
ακίνητοποίηση πρωτεϊνών



RF 13.56 MHz PECVD:

- σταθερότητα υμενίου PAA υδρόφιλο
- αρνητικά φορτισμένο, άρα απωθεί τις σφαίρες που είναι επίσης αρνητικά φορτισμένες και
- τέλος φέρει και ομάδες καρβοξυλίου με μία μόνο διαδικασία (παλμικό RF), άρα καλές συνθήκες για δέσιμο πρωτεϊνών

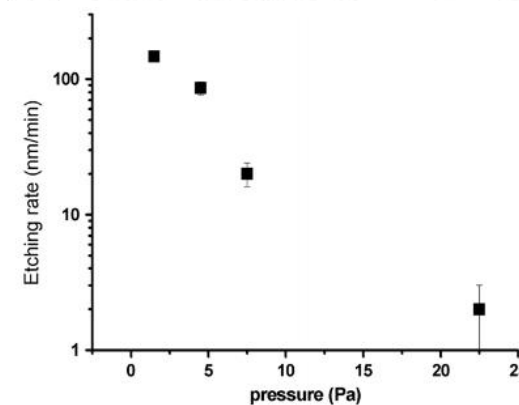
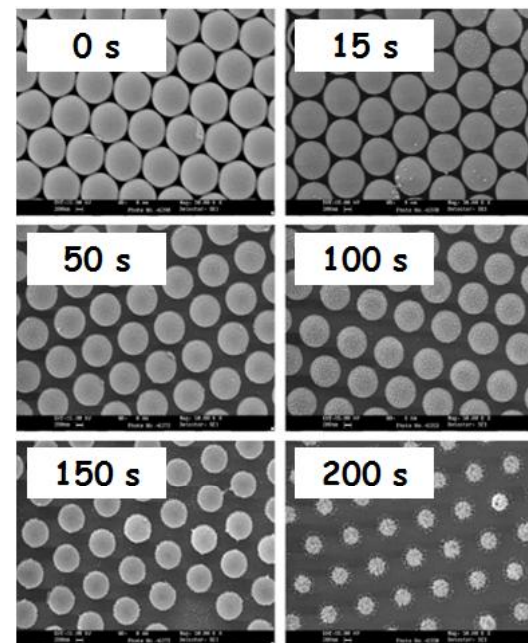
Υποβοηθούμενη από πλάσμα δημιουργία χημικών νανο-μοτίβων για βιο-διεπιφάνειες 2/2



200 W / 150 V

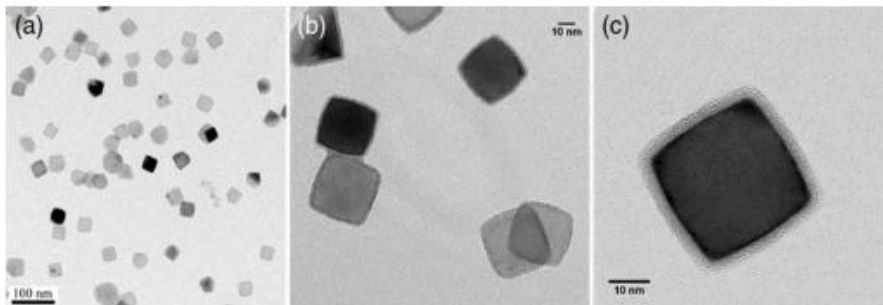
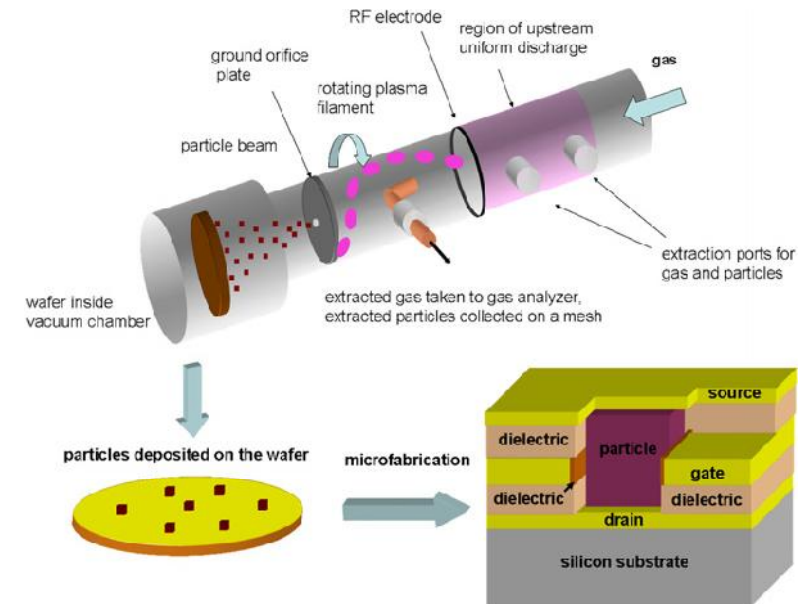
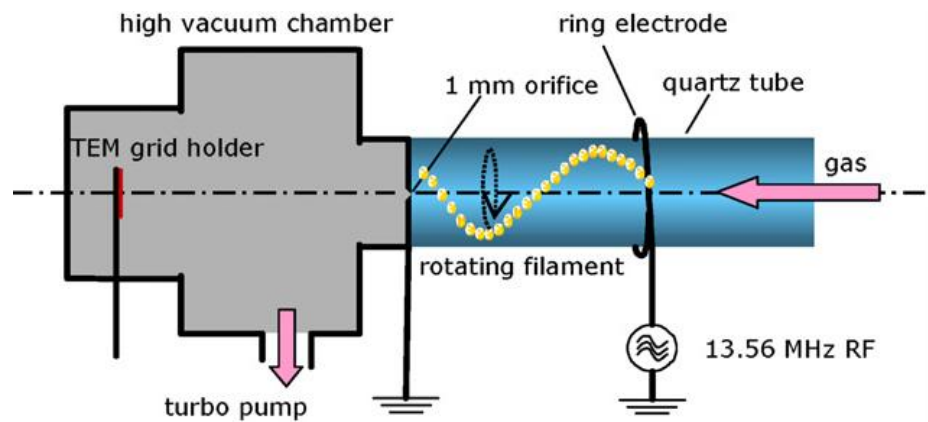
Θερμοκρασία υαλώδους μετάβασης PS

βελτιστοποίηση διαδικασίας



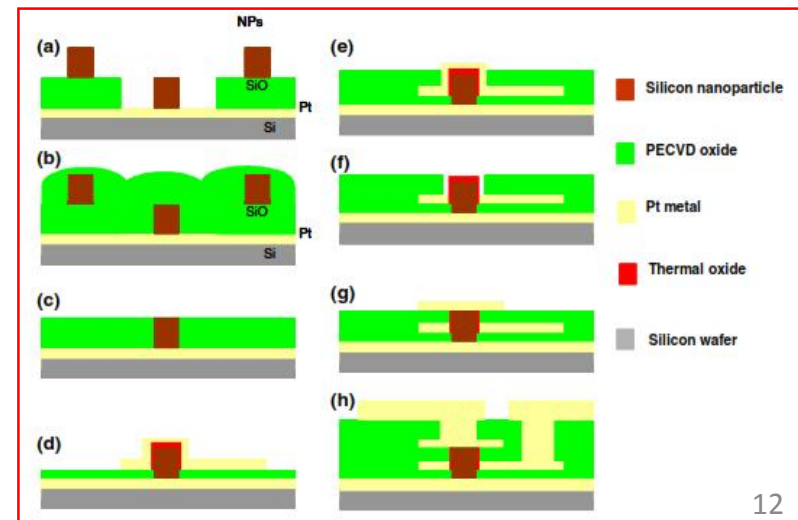
150 W / 100 V

Νανοκρύσταλλοι Si κυβικής μορφής για νανοηλεκτρονικές συσκευές (5% SiH₄, He, Ar, 200-270 Pa)

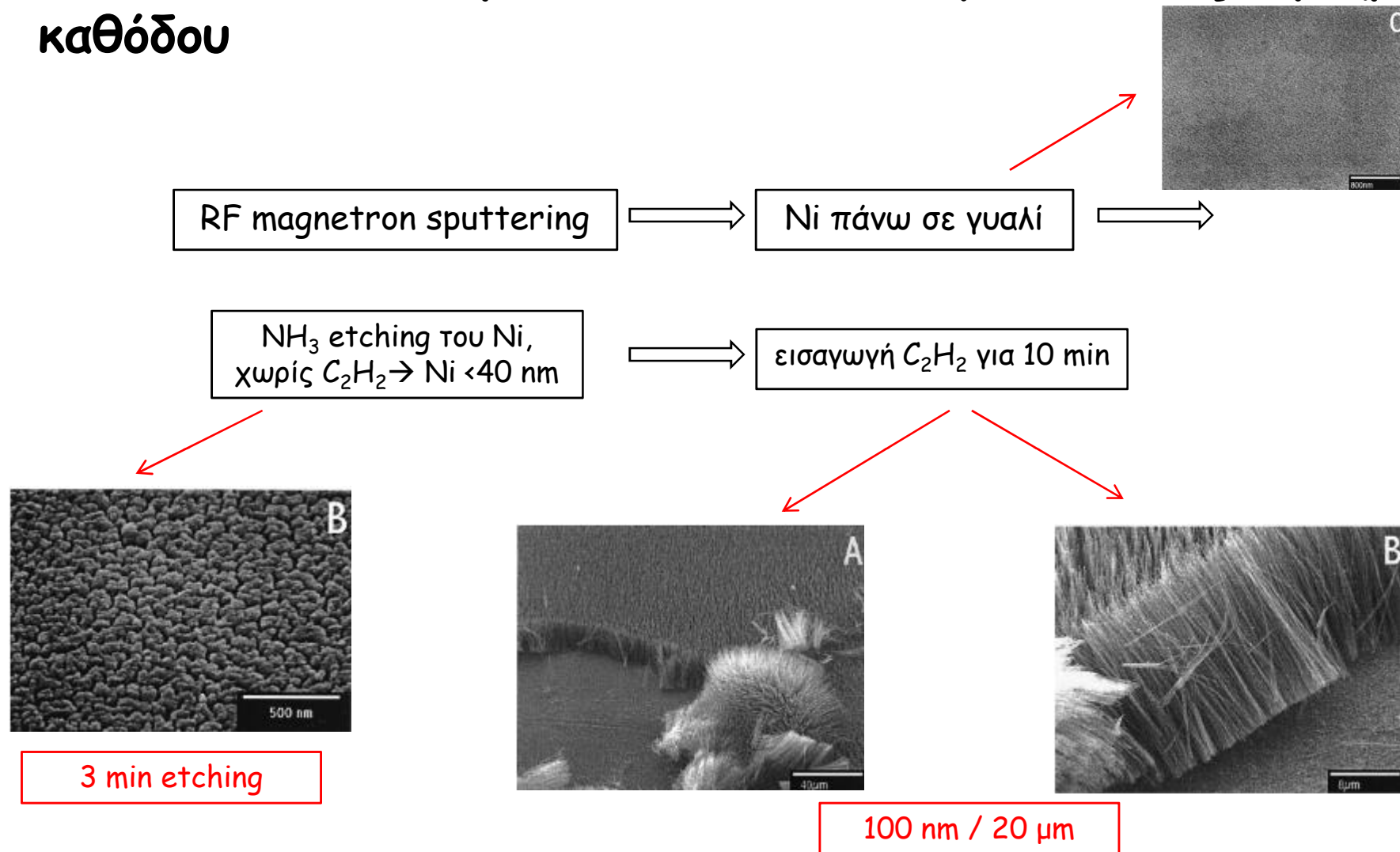


FET βασισμένο σε νανοκρυστάλλους Si

JPD 40 2247 (2007)

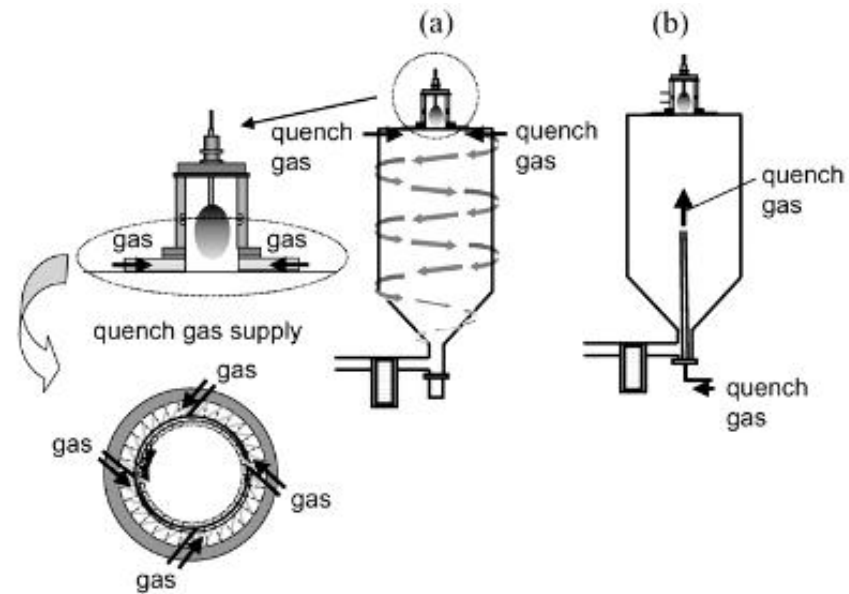
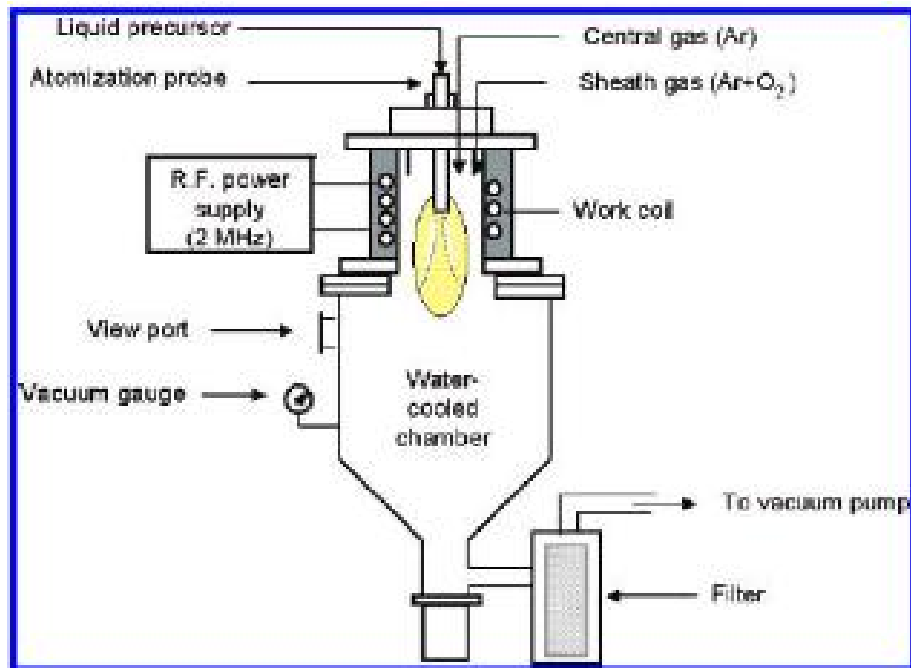


Σύνθεση μεγάλων πινάκων καλά ευθυγραμμισμένων νανοσωλήνων άνθρακα επί υάλου για οθόνες ψυχρής καθόδου



Διαδικασίες βασισμένες σε θερμικό πλάσμα

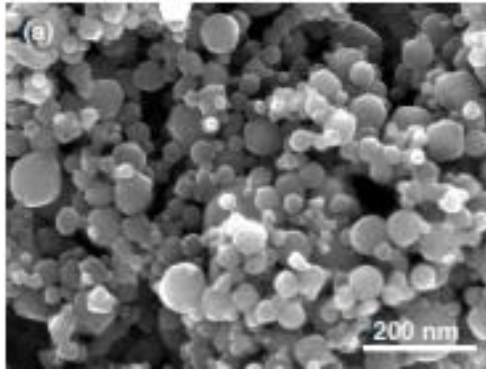
έλεγχος μεγέθους TiO_2 NRs σε RF επαγωγικό θερμικό πλάσμα



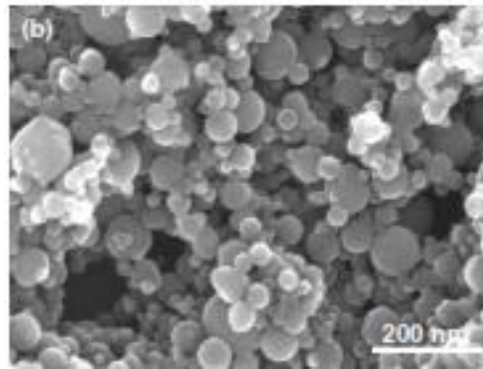
liquid precursor:

- A) 0.1 mol $\text{Ti}(\text{OC}_4\text{H}_9)_4$ + 0.4 mol $\text{HN}(\text{OC}_2\text{H}_5)_2$
 - B) (Eu/Eu+Ti=0,0.05,0.1 έως 5 atom%) + 20 ml H_2O
- Liquid precursor = A+B= stable clear solution

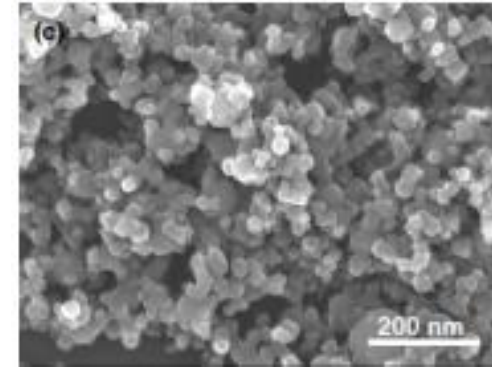
επίδραση της τιμής ροής και της φοράς του αέριου ψύξης (quenching gas)



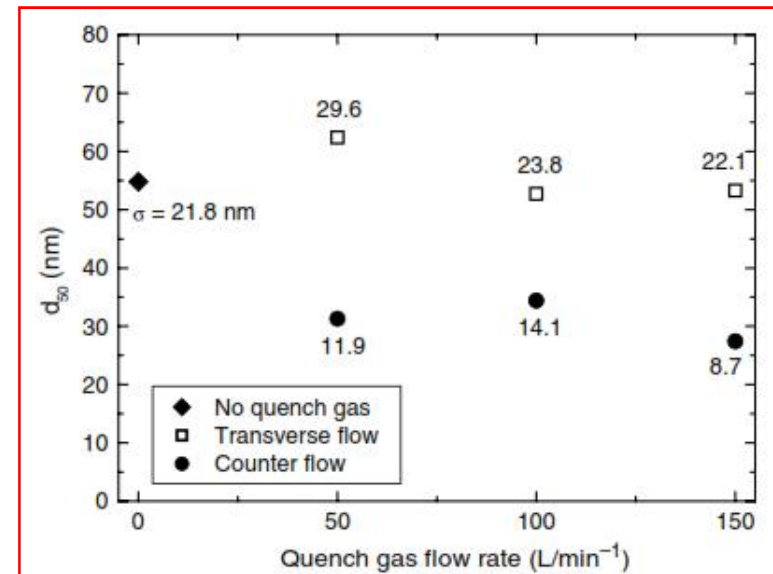
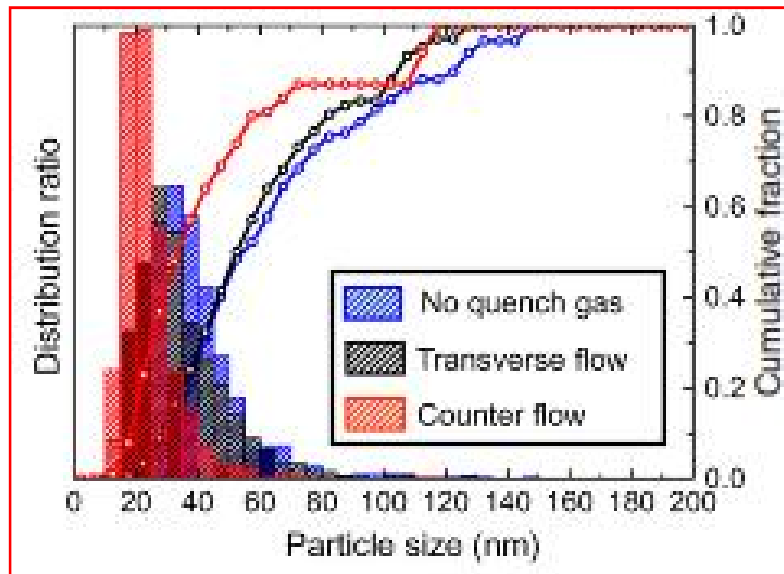
χωρίς αέριο ψύξης
 $d_{50\%} = 52 \text{ nm}$



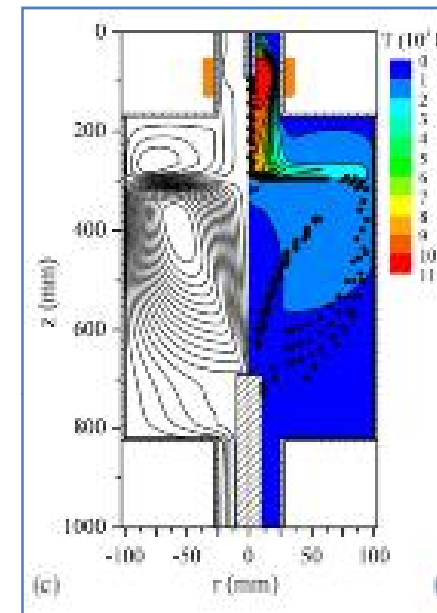
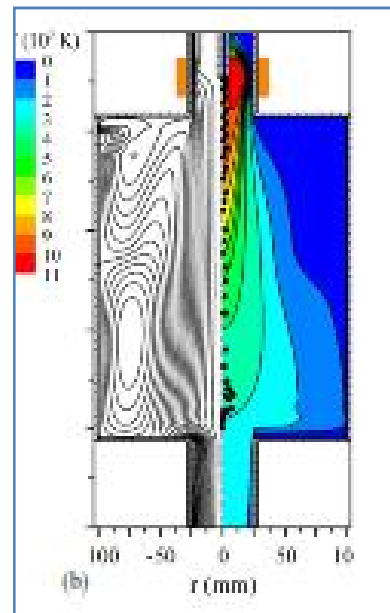
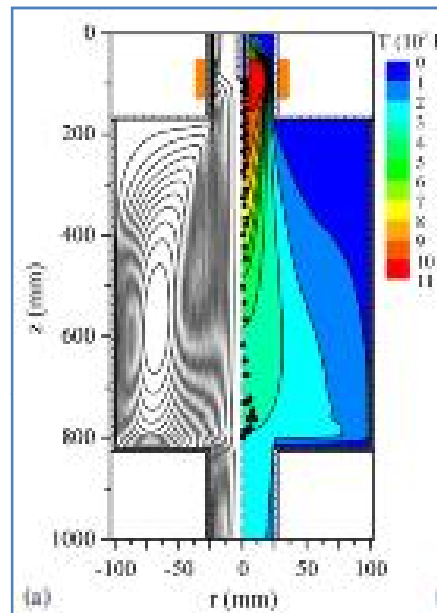
100 slm Ar περιμετρικά
 $d_{50\%} = 52 \text{ nm}$



100 slm Ar αντίθετα
 $d_{50\%} = 34 \text{ nm}$



Εξομοίωση της ροής του αερίου και του πεδίου θερμοκρασίας - κουκκίδες=σωματίδιο ελέγχου

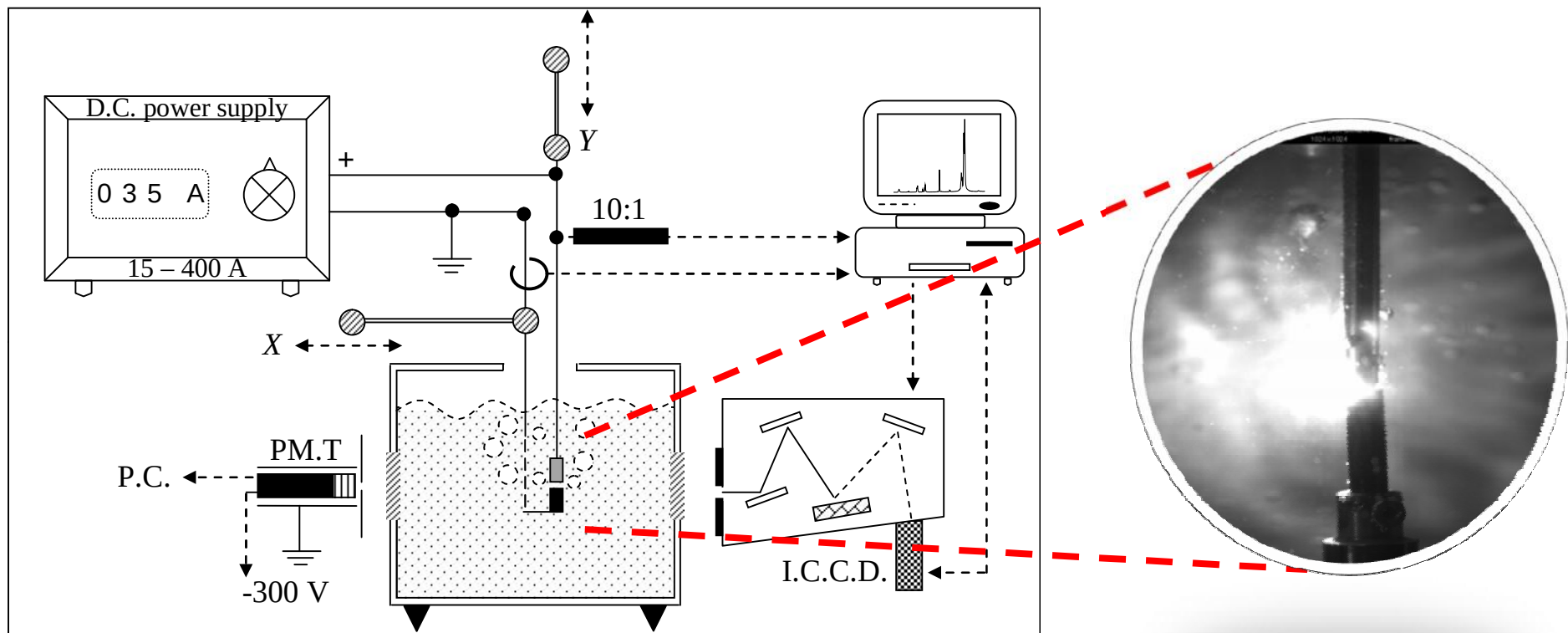


απουσία αερίου ψύξης

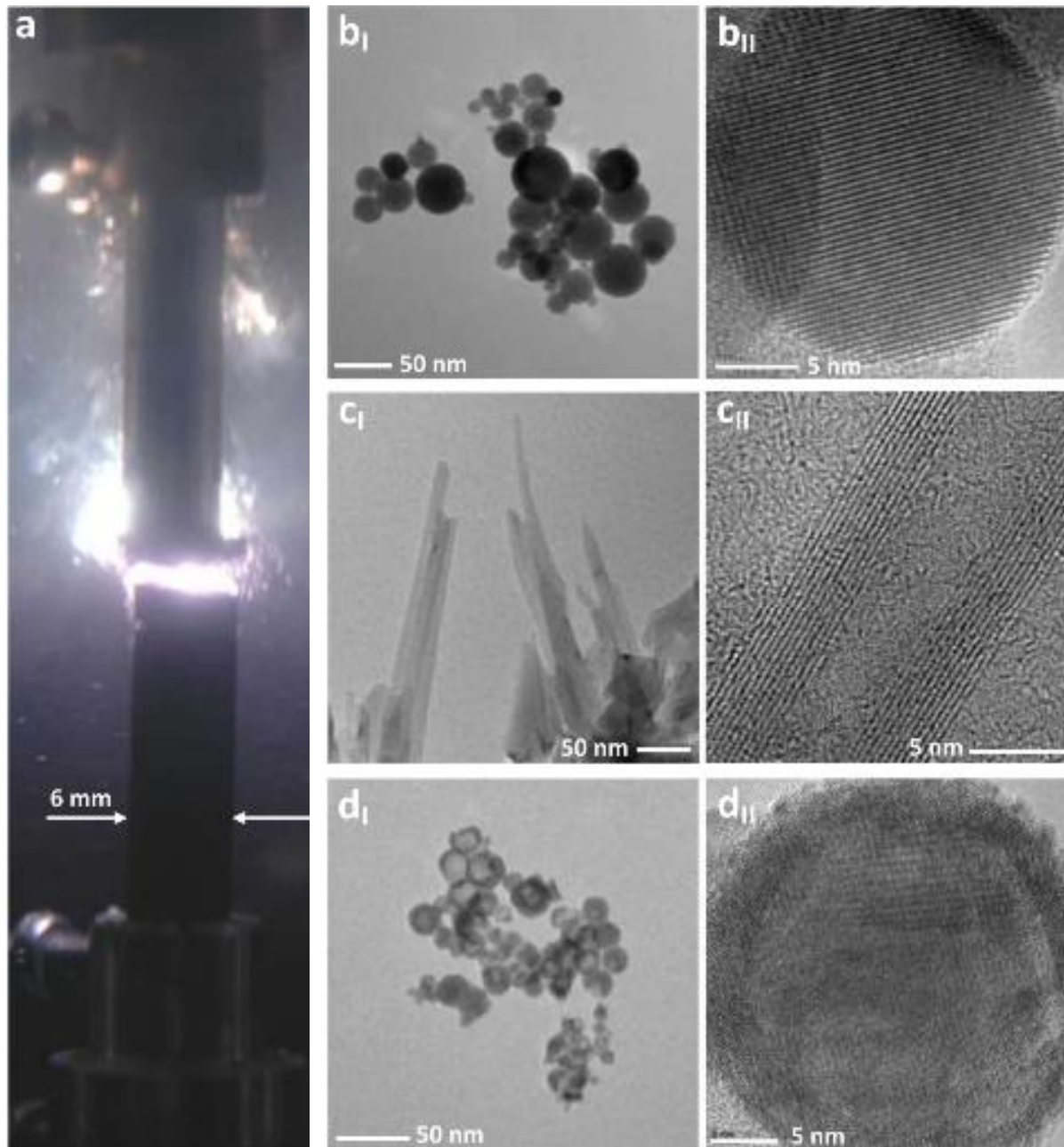
100 slm Ar περιμετρικά

100 slm Ar αντίθετα

Σχηματισμός νανοδομών σε θερμικό πλάσμα εντός υγρών



διάσπαση H_2O , ανοδικό τόξο, υπερκορεσμός ατμών....

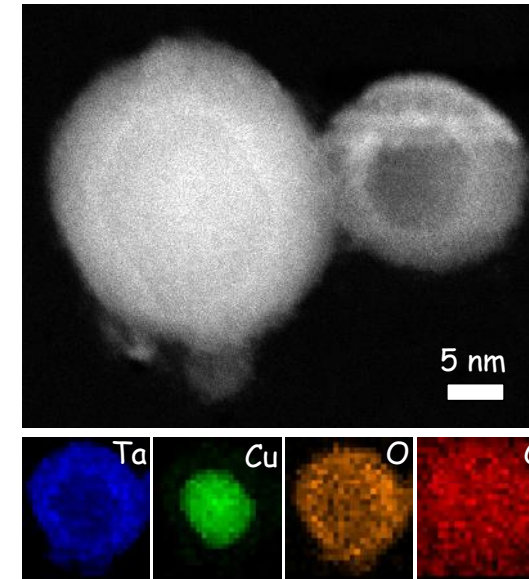
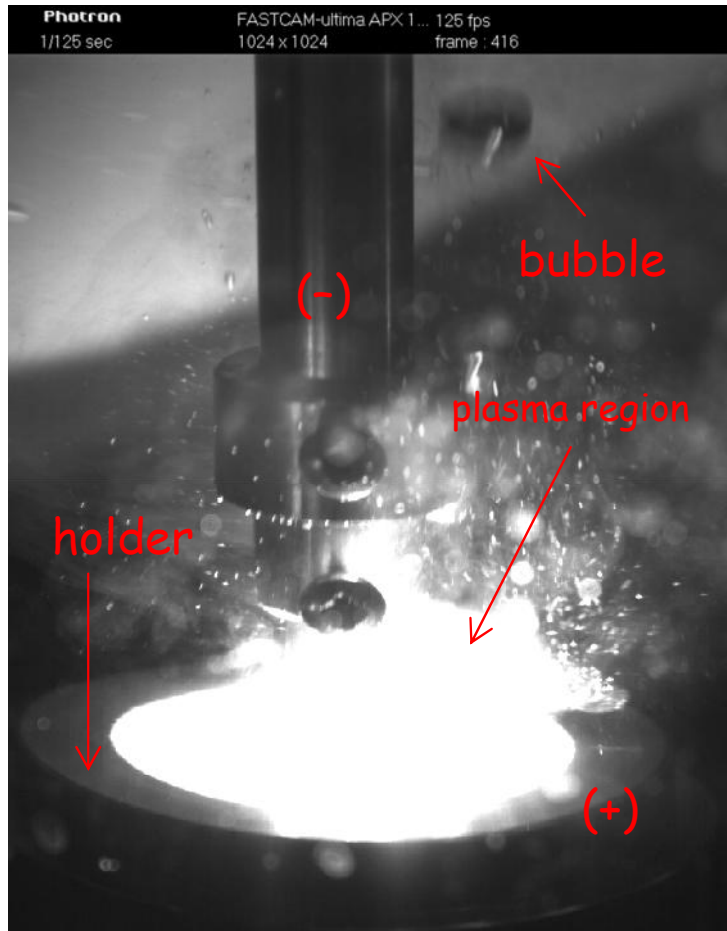


Νανοσφαιρίδια
 Al_2O_3

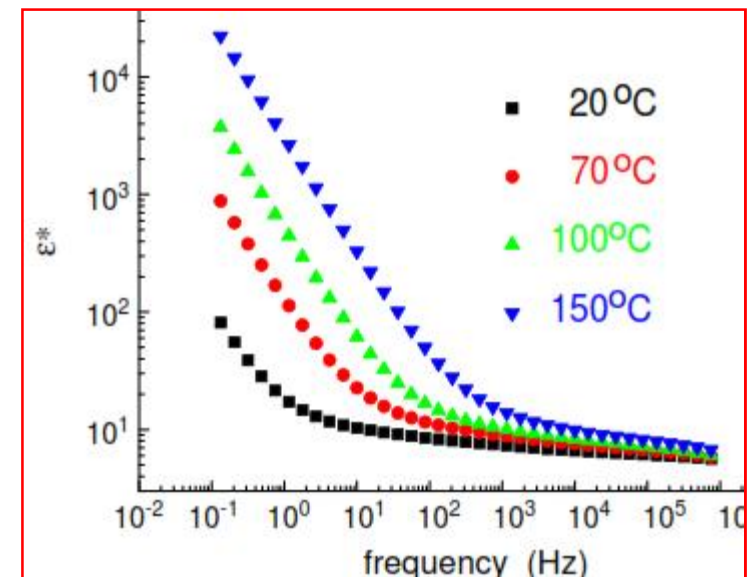
Νανοσωλήνες
C

Πιο σύνθετες δομές;

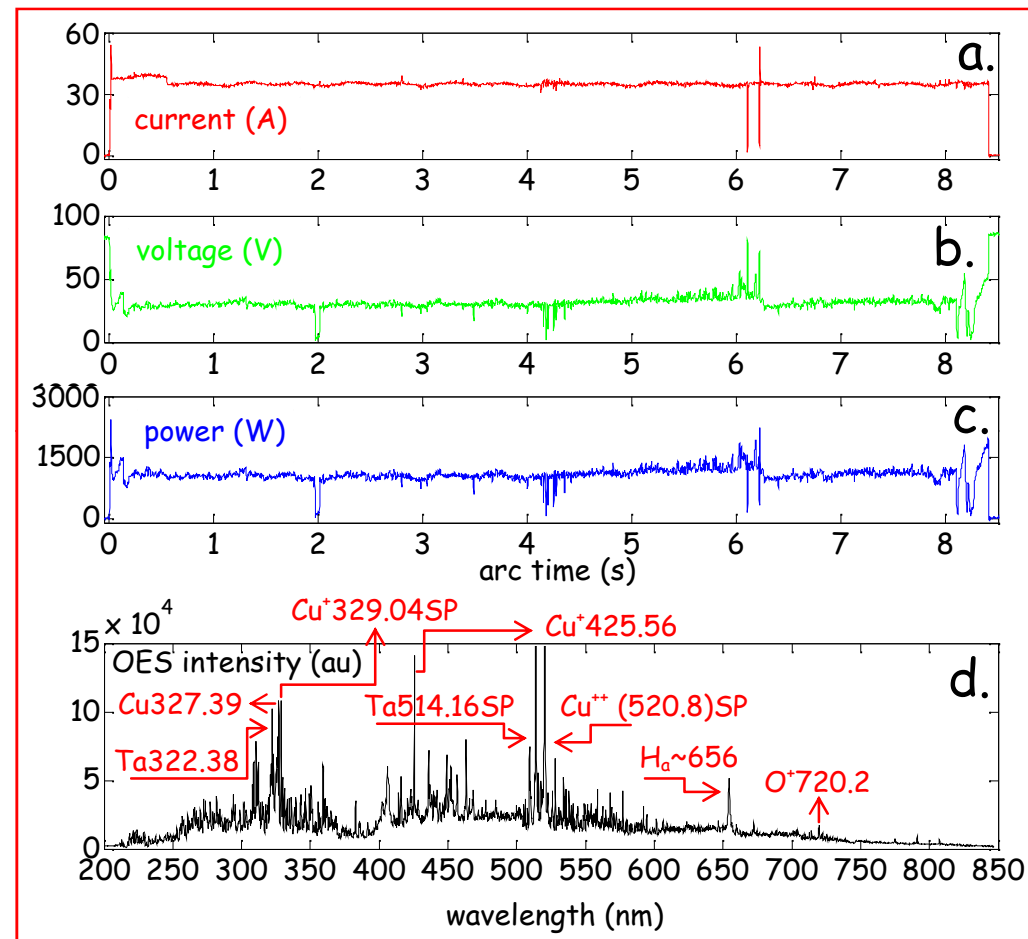
Σχηματισμός "core-shell" νανοσφαιριδίων σε θερμικό πλάσμα εντός υγρών



διηλεκτρικές νανοσκόνες

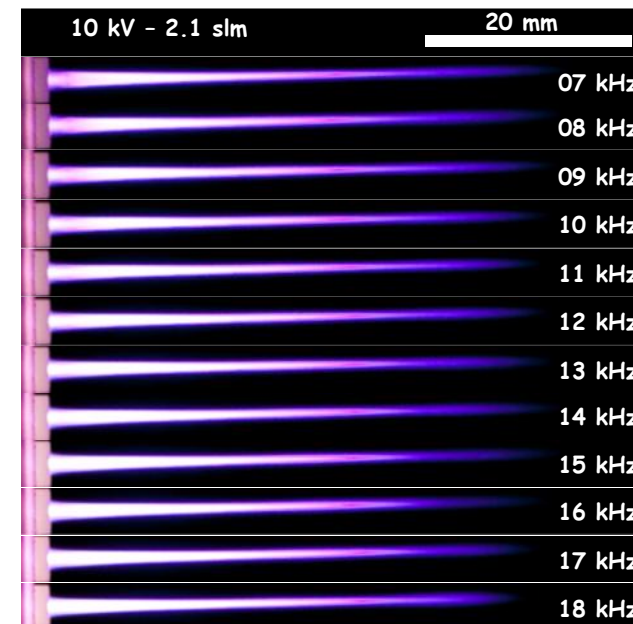
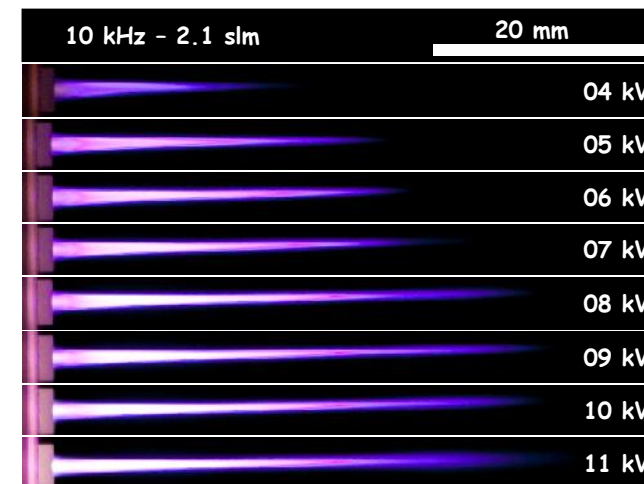
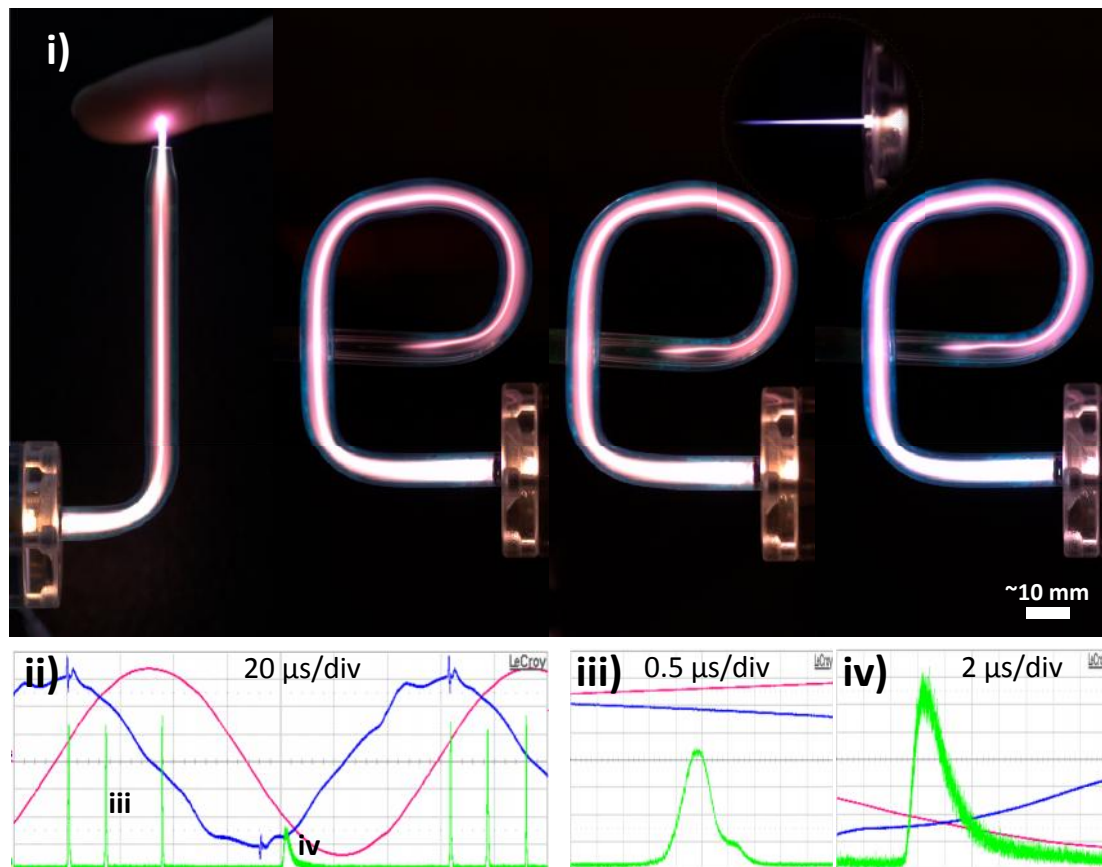


φασματοσκοπία οπτικής εκπομπής - ταυτοποίηση ριζών, ιόντων κ.α. & υπολογισμός ενεργειών

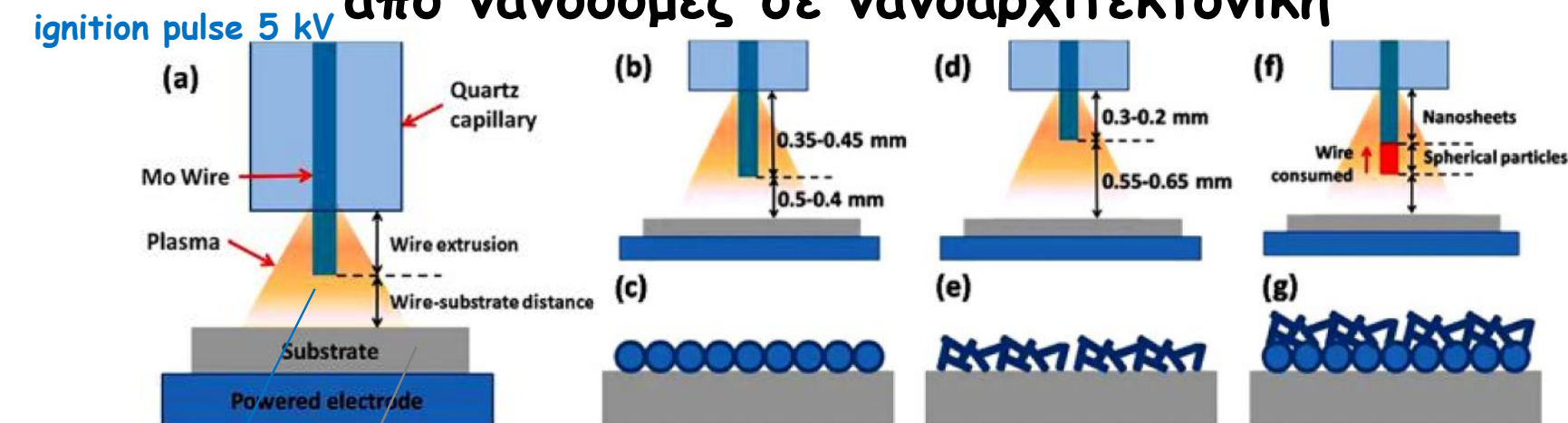


**Διαδικασίες βασισμένες σε “μικρο-πλάσμα”:
ένα ανερχόμενο γνωστικό αντικείμενο**

Τα “micro-plasmas” του Εργαστηρίου Υ.Τ.



Ελεγχόμενες νανοκατασκευές με μικροπλάσμα: από νανοδομές σε νανοαρχιτεκτονική



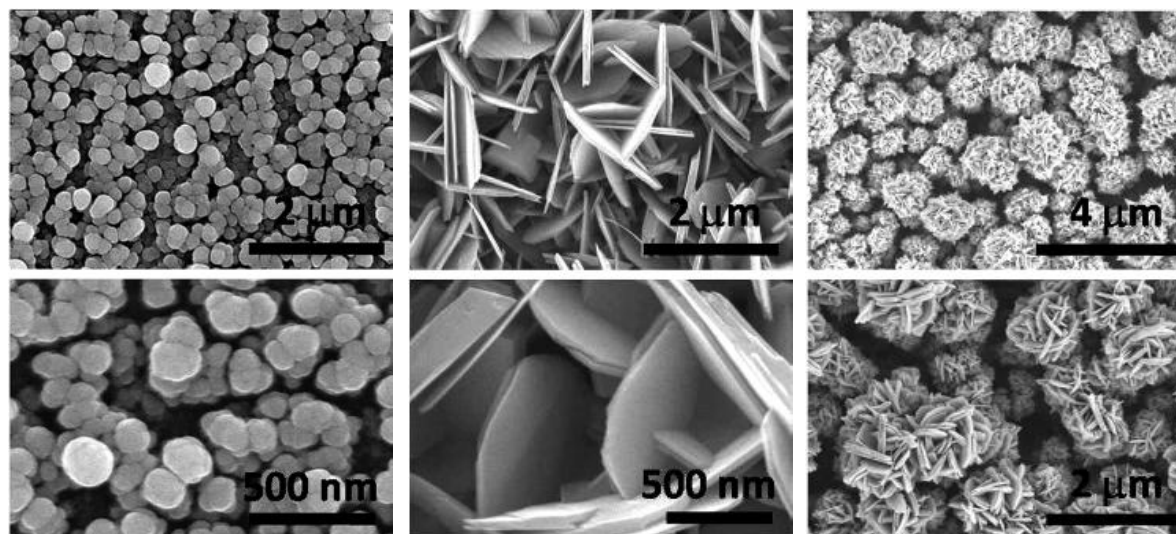
450 MHz, 31 W

μολυβδαίνιο

πυρίτιο

βασικές παράμετροι:
μήκος & εγκάρσια διατ. ανόδου

?



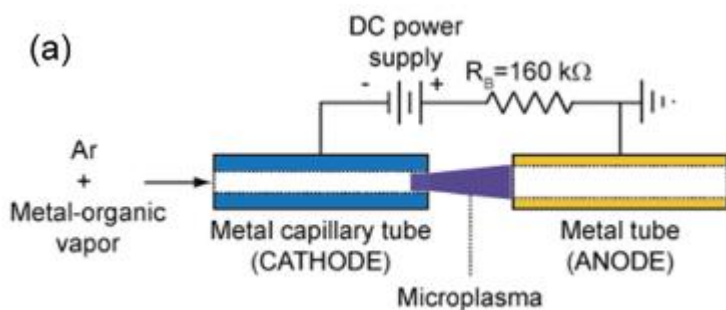
νανοσφαίρες

νανοφύλλα

σύνθετες δομές

Ανεξάρτητος έλεγχος μεγέθους και σύνθεσης νανοσωματιδίων - Σύνθεση σε ΑΕΡΙΑ ΦΑΣΗ

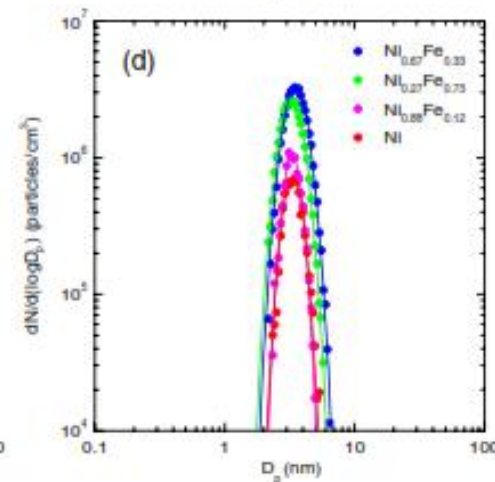
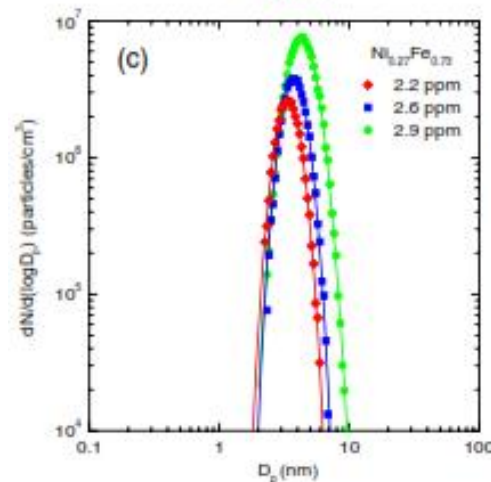
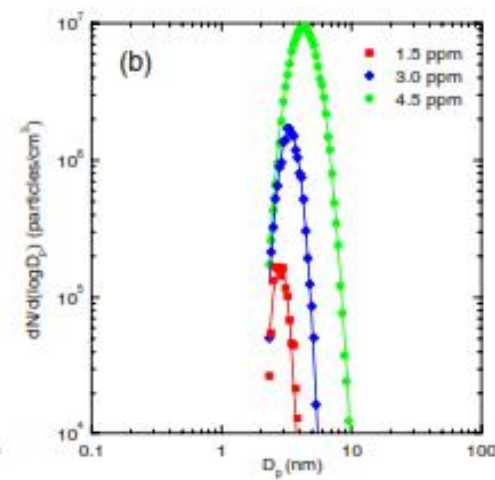
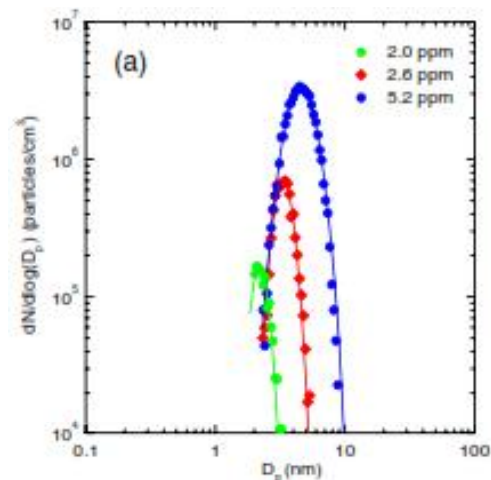
Πρόδρομοι νανοσωματιδίων:
ferrocene & nickelocene



Η υψηλή πυκνότητα ενεργητικών ηλεκτρονίων στην ατμοσφαιρική πίεση επιτρέπει τη μη-θερμική αποσύνθεση των ατμών προς σχηματισμό δραστικών ριζών.

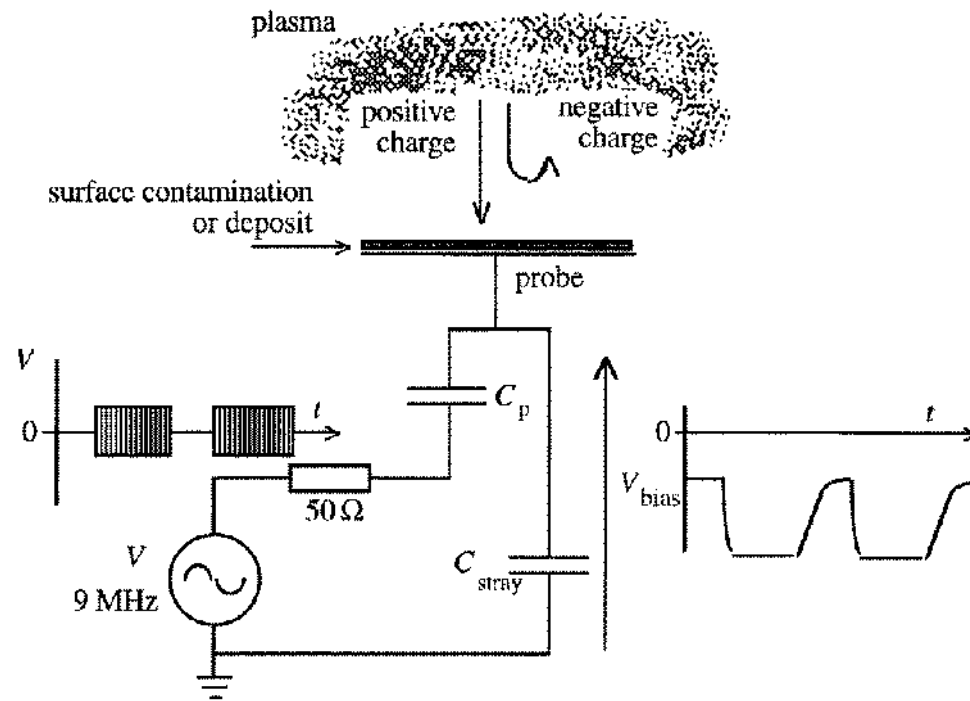
Σε αυτές τις πιέσεις οι κρούσεις αέριας φάσης είναι αυξημένες, οδηγώντας σε μοναδικές δυνατότητες σύνθεσης νανοσωματιδίων.

Επίσης η συνεχής ροή σε αυτούς τους αντιδραστήρες μικρών γεωμετριών περιορίζουν τον χρόνο παραμονής των νανοδομών στις περιοχές σύνθεσης, καταλήγοντας σε μικρότερες διαστάσεις των δομών και σε στενότερες κατανομές αυτών.



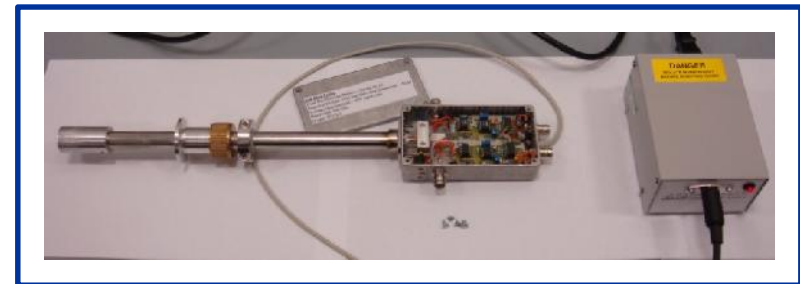
Διαγνωστικές τεχνικές ψυχρού πλάσματος

καθετήρας ροής ιόντων - κριτήριο του Bohm

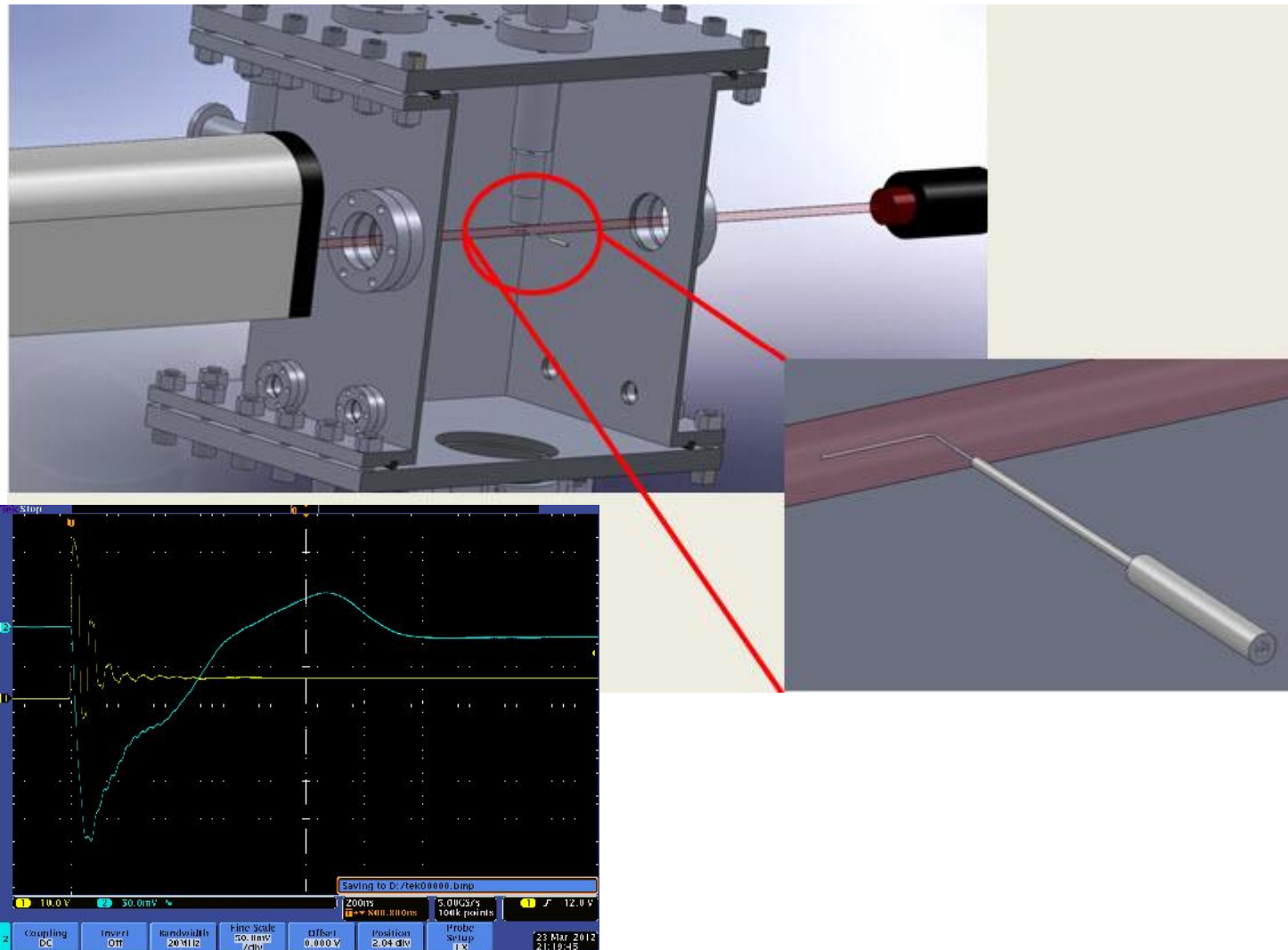


$$dV_{bias}/dt = eA[\Gamma_i - \Gamma_e(V_{bias})]/C_p$$

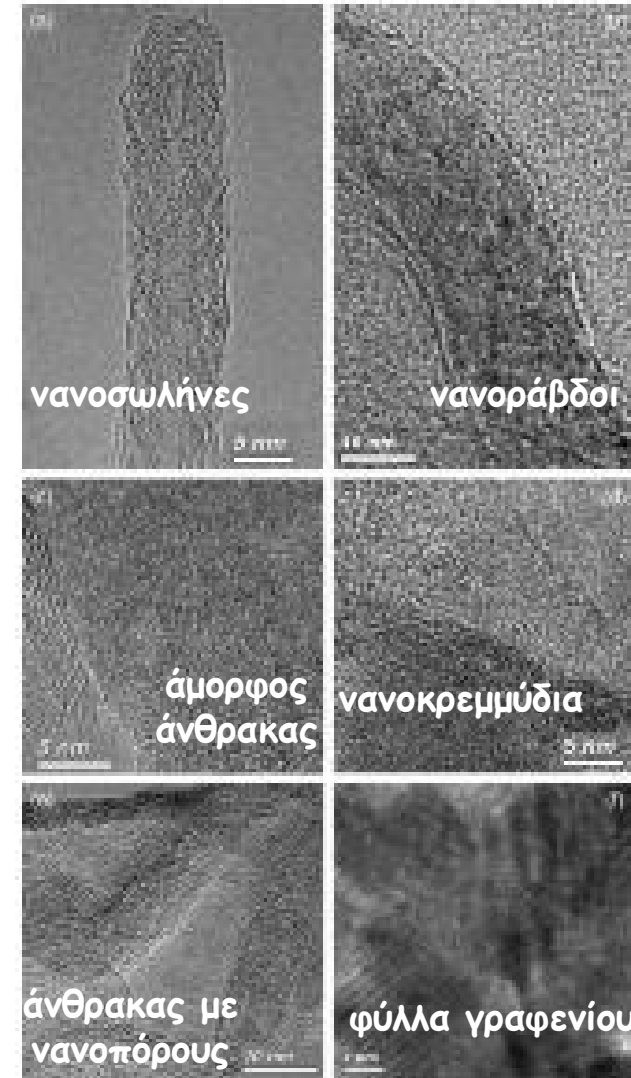
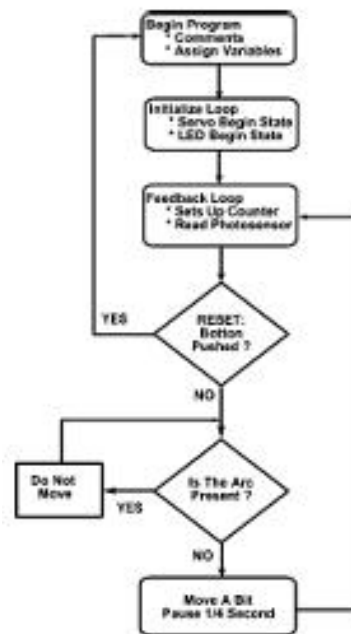
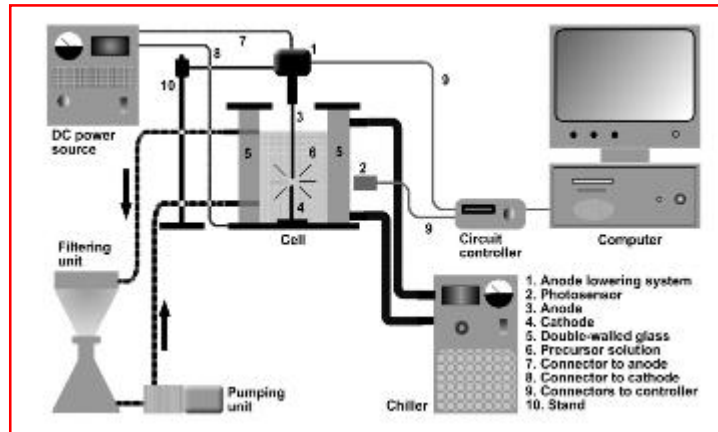
$$\Gamma_i = n_+ \{ [(n_- + n_e)kT_- T_e] / [(n_- T_e + n_e T_-)M] \}^{1/2}$$



Φωτοαπόσπαση ηλεκτρονίων από αρνητικά ιόντα με χρήση Laser



αυτοματοποιημένο σύστημα παραγωγής νανοδομών άνθρακα σε θερμικό πλάσμα εντός ύδατος



Γενικά Συμπεράσματα

• Το ψυχρό πλάσμα ως ένα 'πολυ-εργαλείο' για τη νανοτεχνολογία, παρουσιάζει τα ακόλουθα πλεονεκτήματα έναντι άλλων μεθόδων:

- ✓ Ιδιαίτερα χημικά δραστικό μέσο
- ✓ Πληθώρα πιθανών χημικών διεργασιών
- ✓ Φιλικό στο περιβάλλον
- ✓ Ποικιλία παραμέτρων για έλεγχο διαδικασιών
- ✓ Μεγάλη ευελιξία μέσω ηλεκτρικών/ηλεκτρονικών διατάξεων
- ✓ Επεκτασιμότητα σε μεγάλη κλίμακα

• Η κύρια ίσως πρόκληση είναι η άμεση συνεργασία επιστημόνων υλικών με "plasmaciens" για τη βελτιστοποίηση κι επέκταση των διαδικασιών ως προς τη νανοτεχνολογία