



*Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών
Επιστημών*

*Καθαρισμός αρχαιολογικών
ευρημάτων από σίδηρο με χρήση
αναγωγικού πλάσματος
ενκένωσης αίγλης*

Λεωνίδας Ξαπλαντέρης

Γενικά

Πλάσμα είναι το ιονισμένο αέριο που αποτελείται από φορτισμένα σωματίδια (ηλεκτρόνια, θετικά και αρνητικά ιόντα) και ουδέτερα σωματίδια (μόρια, άτομα, ελεύθερες ρίζες), είναι μακροσκοπικά ουδέτερο και παρουσιάζει συλλογική συμπεριφορά.

Πού συναντάται

- Φλόγα
- Ηλεκτρικές εκκενώσεις (πχ. αστραπές, κεραυνός)
- Αστέρες (πχ. Ήλιος)
- Μεσοαστρικό χώρο
- Ηλιακό άνεμο, ιονόσφαιρα, μαγνητόσφαιρα

Πώς δημιουργείται

- Θερμικός ιονισμός (σύγκρουση των ατόμων)
- Φωτοϊονισμός (αλληλεπίδραση ακτινοβολίας με τα άτομα)

Γενικά

Πλάσμα εκκένωσης αίγλης (glow discharge plasma)

- Η πιο ήπια από ενεργητική άποψη κατηγορία πλάσματος
- Ηλεκτρική εκκένωση σε αέριο χαμηλής πίεσης ($P < 10 \text{ Torr}$)
- Μικρός βαθμός ιονισμού
- Αποτελείται κυρίως από ουδέτερα σωματίδια και δευτερευόντως από ίσους πληθυσμούς θετικά και αρνητικά φορτισμένων σωματιδίων
- Η ισχύς που προσδίδουμε είναι είτε DC είτε RF στην συχνότητα των 13.56MHz ή στην αρμονική της 27.12MHz (διεθνή σύμβαση)
- Μεγάλη διαφορά θερμοκρασίας ιόντων-ηλεκτρονίων ($T_e \gg T_i$) και περίπου ίση θερμοκρασία ιόντων και ουδέτερου αερίου $T_i \approx T_n$

Γενικά

- Εργαστήριο πλάσματος στο ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος
- Ινστιτούτο Ανόργανης Χημείας, Τμήμα Συντήρησης του Πανεπιστημίου της Ζυρίχης
- Ινστιτούτο Χημείας του Πολυτεχνείου του Μονάχου
- Σχολή des Mines στη Νανσύ της Γαλλίας σε συνεργασία με το Εργαστήριο Αρχαιολογίας των Μετάλλων της Jarville-la-Malgrange
- Εργαστήριο πλάσματος του Ινστιτούτου Φυσικής και Τεχνολογίας συσκευών ακτινοβολίας του Βουκουρεστίου
- Τμήμα Μεταλλουργίας του Πολυτεχνείου της Κοπεγχάγης
- Ελβετικό Εθνικό Μουσείο της Ζυρίχης
- Αρχαιολογικό Μουσείο της Val d' Oise της Γαλλίας
- Κεντρικό Μουσείο ρωμαϊκών και γερμανικών αρχαιοτήτων στο Mainz της Γερμανίας
- Μουσείο Schwäbisch Gmünd

Γενικά

Κύριες διαδικασίες στην αέρια φάση της εκκένωσης

- Η διέγερση ατόμου ή μορίου του αερίου σε υψηλότερο ενεργειακό επίπεδο με απορρόφηση κβαντικής ενέργειας. Ακολουθείται αυτόματα από την αποδιέγερση στην βασική του κατάσταση με ταυτόχρονη εκπομπή φωτονίων,
- ο ιονισμός του ατόμου/μορίου με την αποβολή του ηλεκτρονίου και μετατροπή σε θετικό ιόν,
- η διάσπαση του μορίου σε κομμάτια του (μόρια ή/και άτομα),
- η επανασύνδεση όπου α) το ιονισμένο άτομο/μόριο μπορεί προσλαμβάνοντας ένα ηλεκτρόνιο να μετατραπεί σε ουδέτερο άτομο, β) το διασπασμένο άτομο/μόριο, να επανασυνδεθεί στο αρχικό μόριο (δεν λαμβάνει μέρος ηλεκτρόνιο). Για να πραγματοποιηθεί η επανασύνδεση, πρέπει στη σύγκρουση εκτός από το άτομο/μόριο ή/και το ηλεκτρόνιο να λαμβάνει μέρος και 3ο σώμα, π.χ. μία επιφάνεια.

Γενικά

Η ευκολία με την οποία διασπώνται τα μόρια σε χημικά ενεργά άτομα και ελεύθερες ρίζες είναι ο κύριος λόγος της έντονης χημικής δραστηριότητας του πλάσματος, που του επιτρέπει να πραγματοποιεί σε χαμηλές σχετικά θερμοκρασίες χημικές δράσεις που μόνο σε συνθήκες φλόγας θα μπορούσαν να πραγματοποιηθούν.

Γενικά

Εφαρμογές του αναγωγικού πλάσματος

- Καθαρισμός των “ακαθαρσιών” στους αντιδραστήρες ΤΟΚΑΜΑΚ θερμοπυρηνικής σύντηξης
- Καθαρισμός αρχαίων μεταλλικών ευρημάτων
- Εναζώτωση αντικειμένων που οδηγεί στην σκλήρυνσή τους
- Ενδεχόμενη αποκατάσταση φθορών αντικειμένων με χρήση πλάσματος αλκαλίων

Διάβρωση του σιδήρου

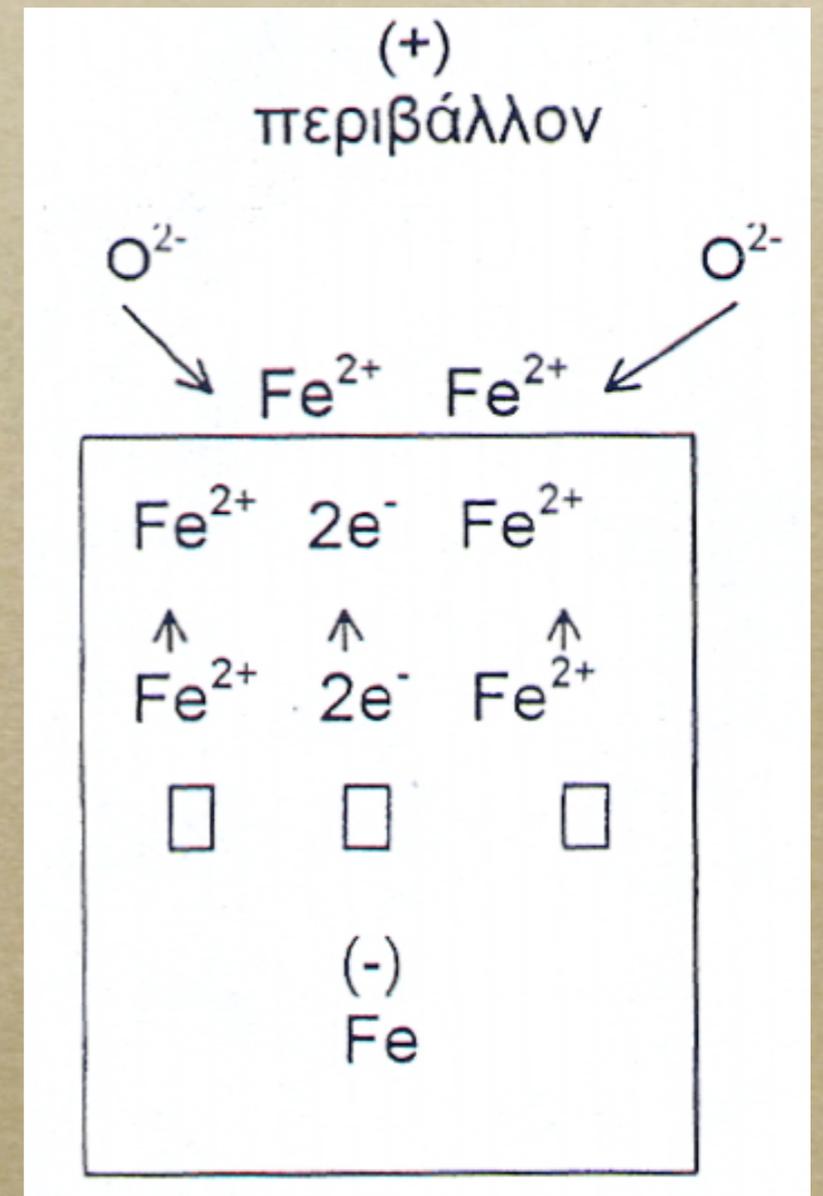
Διάβρωση είναι κάθε αυθόρμητη, κατ' επέκταση εκβιασμένη, αλλοίωση της επιφάνειας των μετάλλων και κραμάτων τους μετά από ηλεκτροχημική, κατ' επέκταση χημική, κατ' επέκταση μηχανική και κατ' επέκταση βιολογική δράση. (Σκουλικίδης και Βασιλείου - 1994)

Ανάμεσα στο μέταλλο και στο διαβρωτικό περιβάλλον αναπτύσσεται δυναμικό γαλβανικού στοιχείου με πόλους το μέταλλο (στερεό) και το διαβρωτικό περιβάλλον (αέριο ή υγρό ή διάλυμα ή στερεό) και ηλεκτρολύτη τα προϊόντα διάβρωσης (στερεό). (Wagner)

Διάβρωση του σιδήρου

Στάδια

- Δημιουργία βραχυκυκλωμένου στοιχείου με πόλους το μέταλλο Fe (-, άνοδος) και το διαβρωτικό περιβάλλον (+, κάθοδος)
- Ιόντα Fe^{2+} με ισοδύναμο αριθμό e^- διαχέονται στην διεπιφάνεια μετάλλου-διαβρωτικού περιβάλλοντος
- Τα e^- απομακρύνονται και ανάγουν το O_2 σε O^{2-} που με τα ελευθερωμένα ιόντα σιδήρου δομούν ένα οξείδιο του σιδήρου (ή υδροξείδιο)
- Τα άτακτα ιόντα Fe^{2+} απελευθερώνονται τώρα από τα οξείδια και δρουν με την επιφάνεια, ενώ αντικαθιστώνται με άλλα άτακτα ιόντα του εσωτερικού του οξειδίου



Διάβρωση του σιδήρου

Οξείδιο		Κρυσταλλικό σύστημα	Χρώμα
$\alpha - Fe_2O_3$	Αιματίτης	ρομβοεδρικό	ερυθρό σκουριάς
$\gamma - Fe_2O_3$	Μαγκεμίτης	κυβικό	καστανό
Fe_3O_4	Μαγνητίτης	κυβικό	μαύρο
$\alpha - FeOOH$	Γκαιίτης	ορθορομβικό	καστανοκίτρινο
$\beta - FeOOH$	Ακαγκανίτης	μονοκλινές	καστανοπορτοκαλόχρουν
$\gamma - FeOOH$	Λεπιδοκροκίτης	ορθορομβικό	καστανέρυθρο
$FeOOH.nH_2O,$ $Fe_2O_3.nH_2O$	Λειμωνίτης ή σκουριά	άμορφο	καστανό

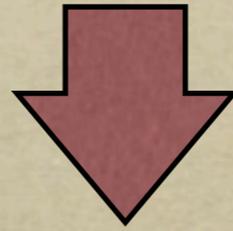
Διάβρωση του σιδήρου

Διάβρωση του σιδήρου

•ξ• *Υψηλή περιεκτικότητα σε οξυγόνο στην ατμόσφαιρα*

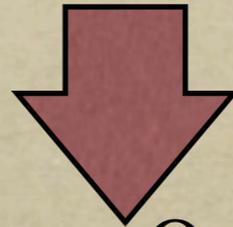
Διάβρωση του σιδήρου

·ξ· Υψηλή περιεκτικότητα σε οξυγόνο στην ατμόσφαιρα



Διάβρωση του σιδήρου

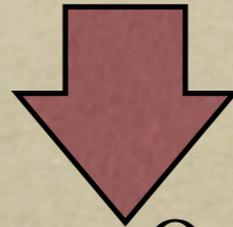
•ξ• *Υψηλή περιεκτικότητα σε οξυγόνο στην ατμόσφαιρα*



- Αυξάνεται η μερική πίεση του O_2 , μεγαλώνει το δυναμικό διάβρωσης και άρα η ταχύτητα της διάβρωσης
- Η απότομη αλλαγή της υγρασίας, οδηγεί στην δημιουργία ρωγμών στο εξωτερικό στρώμα διάβρωσης

Διάβρωση του σιδήρου

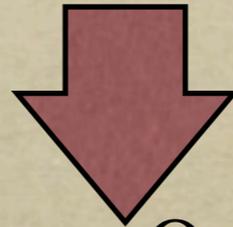
·ξ· *Υψηλή περιεκτικότητα σε οξυγόνο στην ατμόσφαιρα*



- Αυξάνεται η μερική πίεση του O_2 , μεγαλώνει το δυναμικό διάβρωσης και άρα η ταχύτητα της διάβρωσης
- Η απότομη αλλαγή της υγρασίας, οδηγεί στην δημιουργία ρωγμών στο εξωτερικό στρώμα διάβρωσης
 - ξ· *Καταλυτική δράση των χλωριόντων*

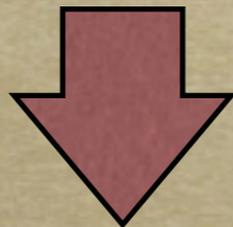
Διάβρωση του σιδήρου

·ξ· *Υψηλή περιεκτικότητα σε οξυγόνο στην ατμόσφαιρα*



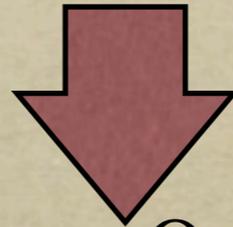
- Αυξάνεται η μερική πίεση του O_2 , μεγαλώνει το δυναμικό διάβρωσης και άρα η ταχύτητα της διάβρωσης
- Η απότομη αλλαγή της υγρασίας, οδηγεί στην δημιουργία ρωγμών στο εξωτερικό στρώμα διάβρωσης

·ξ· *Καταλυτική δράση των χλωριόντων*



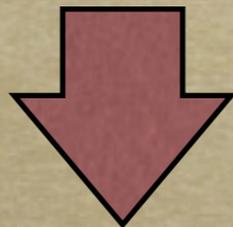
Διάβρωση του σιδήρου

• *Υψηλή περιεκτικότητα σε οξυγόνο στην ατμόσφαιρα*



- Αυξάνεται η μερική πίεση του O_2 , μεγαλώνει το δυναμικό διάβρωσης και άρα η ταχύτητα της διάβρωσης
- Η απότομη αλλαγή της υγρασίας, οδηγεί στην δημιουργία ρωγμών στο εξωτερικό στρώμα διάβρωσης

• *Καταλυτική δράση των χλωριόντων*



- Αυξάνεται η ιοντική αγωγιμότητα στο ηλεκτρολυτικό κελί του αντικειμένου-διαβρωτικού περιβάλλοντος
- Αν σχηματιστεί ακαγκανίτης σε ρωγμές και πόρους, θα δημιουργηθούν μεγάλοι κρύσταλλοί του που θα δημιουργήσουν εσωτερικές τάσεις

Καθαρισμός και συντήρηση

- Μηχανική αποκατάσταση (νυστέρι, σφυράκι και σμίλη, πινέλα, βούρτσες, τροχός, αμμοβολή, υπέρηχοι κ.ά.)
- Μέθοδοι απογύμνωσης χημικής ή ηλεκτροχημικής φύσης:
 - Ηλεκτρολυτική αναγωγή σε διαλύματα όπως NaOH
 - Χημικός καθαρισμός με λουτρό των αντικειμένων σε διαλύματα όπως:
 - i) EDTA διαλυμένο σε NaOH,
 - ii) οργανικών οξέων και φωσφορικού οξέος,
 - iii) εμπορικών προϊόντων απομάκρυνσης σκουριάς

Καθαρισμός και συντήρηση

Υγρές μέθοδοι

- i) Πλύσιμο σε θερμό απιονισμένο νερό (αφαλάτωση) ή σε απιονισμένο νερό σε αδρανή ατμόσφαιρα αζώτου
- ii) Πλύσιμο σε αλκαλικά διαλύματα (NaOH , Na_2CO_3)
- iii) Πλύσιμο σε θερμό αλκαλικό διάλυμα θειώδους νατρίου (NaOH και Na_2SO_3)
- iv) Ηλεκτρόλυση
- v) Πλύσιμο σε μη υδατικά διαλύματα (LiOH σε αλκοόλη)

Θερμικές μέθοδοι

Θέρμανση σε υψηλές θερμοκρασίες είτε σε αδρανή ατμόσφαιρα είτε σε ατμόσφαιρα υδρογόνου. Επιτυγχάνεται η απομάκρυνση των χλωριόντων.

Καθαρισμός και συντήρηση

Συντήρηση

- Φυσικό κερί και λάδια παραφίνης (άσπρα, ημιδιαφανή, άοσμα στερεά, περιέχουν μεγάλους κρυστάλλους, διαλύονται σε αλκοόλη, πολύ λίγο διαπερατά στους υδρατμούς)
- Μικροκρυσταλλικά κεριά (προϊόντα πετρελαίου, άοσμα, άγευστα, χημικά αδρανή, ακόμη λιγότερο διαπερατά στους υδρατμούς). Εφαρμόζονται με λουτρό σε θερμοκρασία (110-130°C)
- Συνθετικές ρητίνες (σε μορφή διαλύματος με οργανικούς διαλύτες) π.χ. νιτροκυτταρίνη, πολυβινυλική αλκοόλη Paraloid, εποξικές ρητίνες. Εφαρμόζονται με πινέλο, εμβάπτιση ή με εμποτισμό υπό κενό οπότε και δημιουργείται ένα προστατευτικό φιλμ στα αντικείμενα.

Πειραματική διάταξη

Βασικά Μέρη

- Αντιδραστήρας πλάσματος
- Σύστημα κενού και ρύθμισης πίεσης
- Σύστημα παροχής αερίων
- Ηλεκτρική τροφοδοσία
- Σύστημα ασφάλειας και ελέγχου

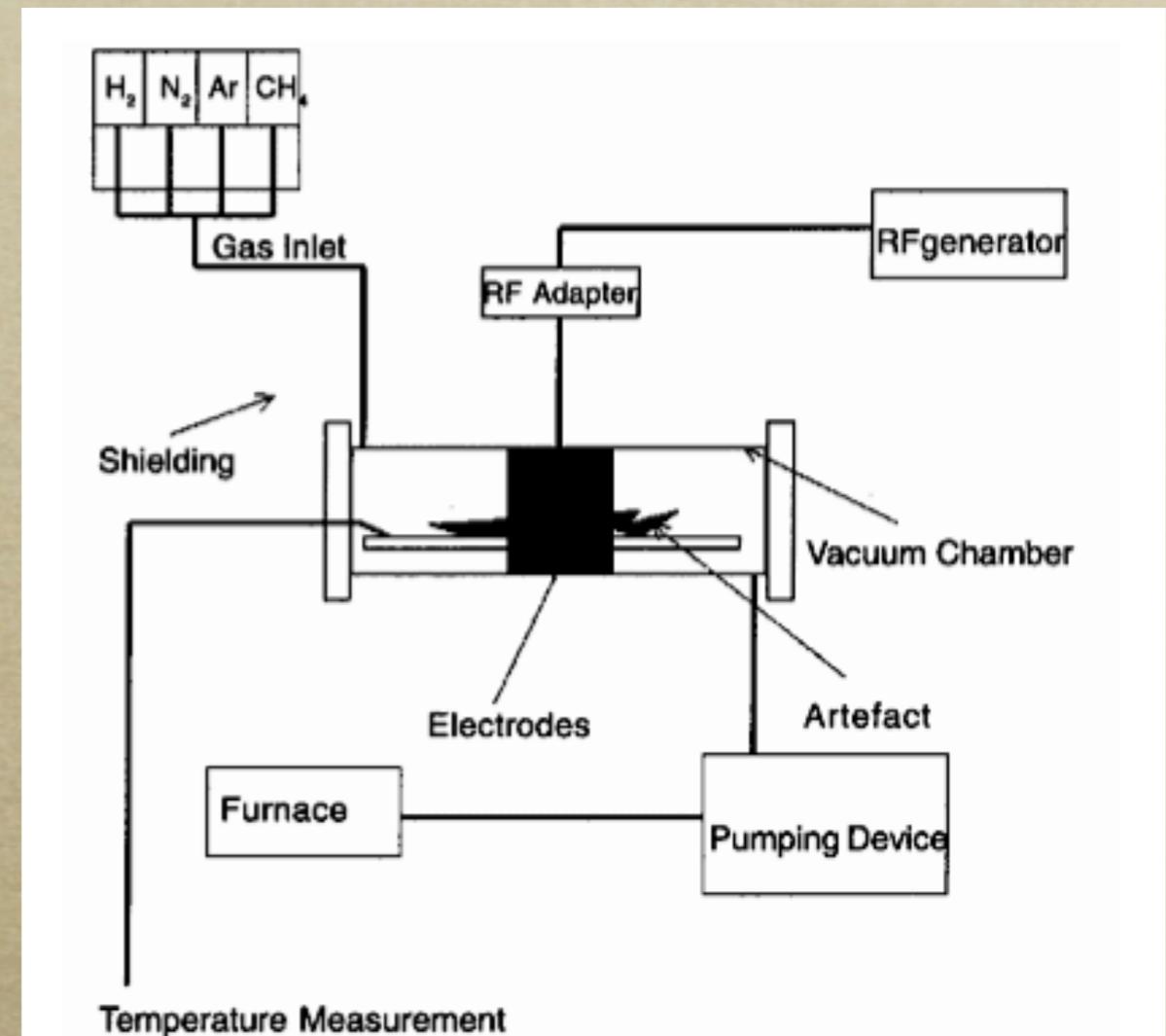


Figure 1 – Schematic of plasma reactor.

Figure 1 – Schéma de principe du réacteur de traitement par plasma.

Figure 1 – Schéma de principe du réacteur de traitement par plasma.

Figure 1 – Schematic of plasma reactor.

Πειραματική διάταξη

Αντιδραστήρας πλάσματος

- **Θάλαμος κενού:** κατασκευασμένος από Pyrex πάχους 1.5cm
- **Θερμόμετρο:** υδραργυρικό ή θερμοζεύγος, τοποθετημένο μέσα στον αντιδραστήρα και κατά μήκος του άξονά του
- **Δοκίμια και αντικείμενα προς επεξεργασία:** τοποθετημένα σε σχάρες από Pyrex
- **Ηλεκτρόδια:** στα οποία γίνεται η σύζευξη της ισχύος, βρίσκονται εξωτερικά του αντιδραστήρα, τοποθετημένα αντιδιαμετρικά στην παράπλευρη επιφάνειά του, ακολουθώντας την καμπυλότητά του. Είναι χάλκινα και ψύχονται με νερό, μέσω κλειστού κυκλώματος ψύξης νερού
- **Κλωβός Faraday:** εμποδίζει την διαφυγή του υψίσυχνου πεδίου στο περιβάλλον. Είναι αλουμινένιο ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο πλέγμα με μικρές οπές διαμέτρου 3mm

Πειραματική διάταξη

Σύστημα κενού

- **Αντλία κενού:** μηχανική περιστροφική αντλία
- **Συμπεστής αέρος:** εισάγει αέρα στην αντλία ώστε να γίνει αρραίωση των αερίων εξόδου του αντιδραστήρα
- **Φούρνος καύσης:** γίνεται οξείδωση στα αέρια εξόδου της αντλίας.
Θερμοκρασία λειτουργίας, 650°C
- **Μανόμετρο χωρητικότητας:** μέτρηση πίεσης στον αντιδραστήρα
- **Σύστημα παροχής αερίων:** φιάλες αερίων H₂, CH₄, και N₂ υψηλής καθαρότητας (99%)
- **Ηλεκτρομαγνητικές βάνες ασφαλείας:** δεν επιτρέπουν την είσοδο αερίων όταν η ολική πίεση στον αντιδραστήρα ξεπεράσει μία μέγιστη τιμή
- **Θάλαμος ανάμειξης αερίων:** συνδέεται στην κορυφή του αντιδραστήρα

Πειραματική διάταξη

Ηλεκτρική τροφοδοσία

Πειραματική διάταξη

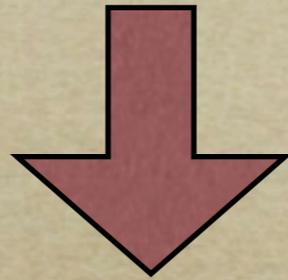
Ηλεκτρική τροφοδοσία

Γεννήτρια ραδιοσυχνότητας (RF generator)

Πειραματική διάταξη

Ηλεκτρική τροφοδοσία

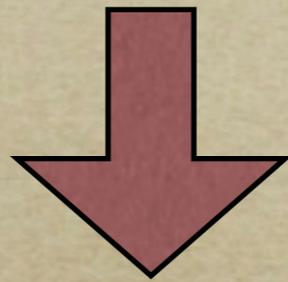
Γεννήτρια ραδιοσυχνότητας (RF generator)



Πειραματική διάταξη

Ηλεκτρική τροφοδοσία

Γεννήτρια ραδιοσυχνότητας (RF generator)

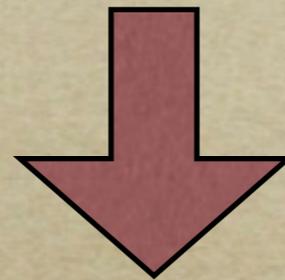


Προσαρμογέας σύνθετης αντίστασης (Π.Σ.Α.)

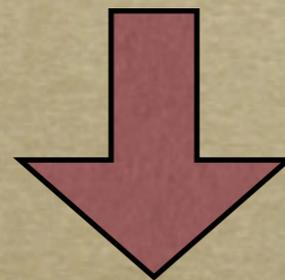
Πειραματική διάταξη

Ηλεκτρική τροφοδοσία

Γεννήτρια ραδιοσυχνότητας (RF generator)



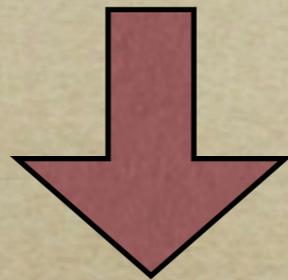
Προσαρμογέας σύνθετης αντίστασης (Π.Σ.Α.)



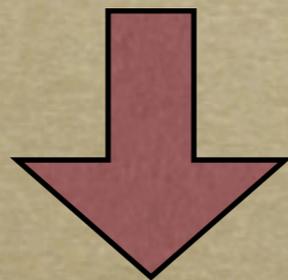
Πειραματική διάταξη

Ηλεκτρική τροφοδοσία

Γεννήτρια ραδιοσυχνότητας (RF generator)



Προσαρμογέας σύνθετης αντίστασης (Π.Σ.Α.)



Ηλεκτρόδια

Πειραματική διάταξη

Σύστημα Ασφάλειας και Ελέγχου

Ηλεκτρονική μονάδα ελέγχου και ασφάλειας

- Σωστή λειτουργία της αντλίας κενού και έλεγχος της επαρκούς διάλυσης των αερίων επεξεργασίας στην αντλία
- Σωστή λειτουργία του φούρνου καύσης
- Ροή του νερού που ψύχει την γεννήτρια και τα ηλεκτρόδια
- Πίεση στον αντιδραστήρα

Πειραματική διάταξη



Πειραματική διάταξη



Πειραματική διάταξη



Πειραματική διάταξη



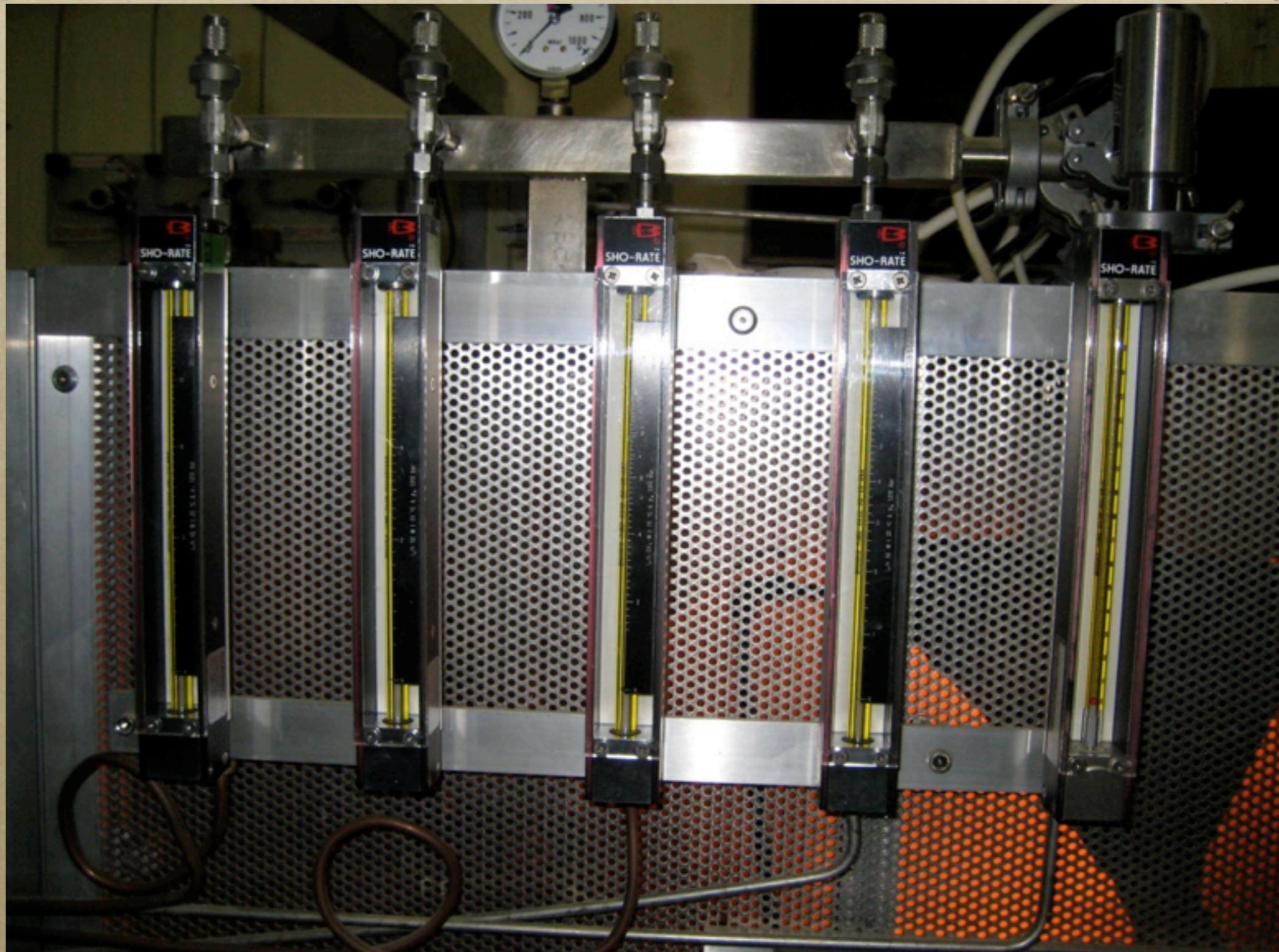
Πειραματική διάταξη



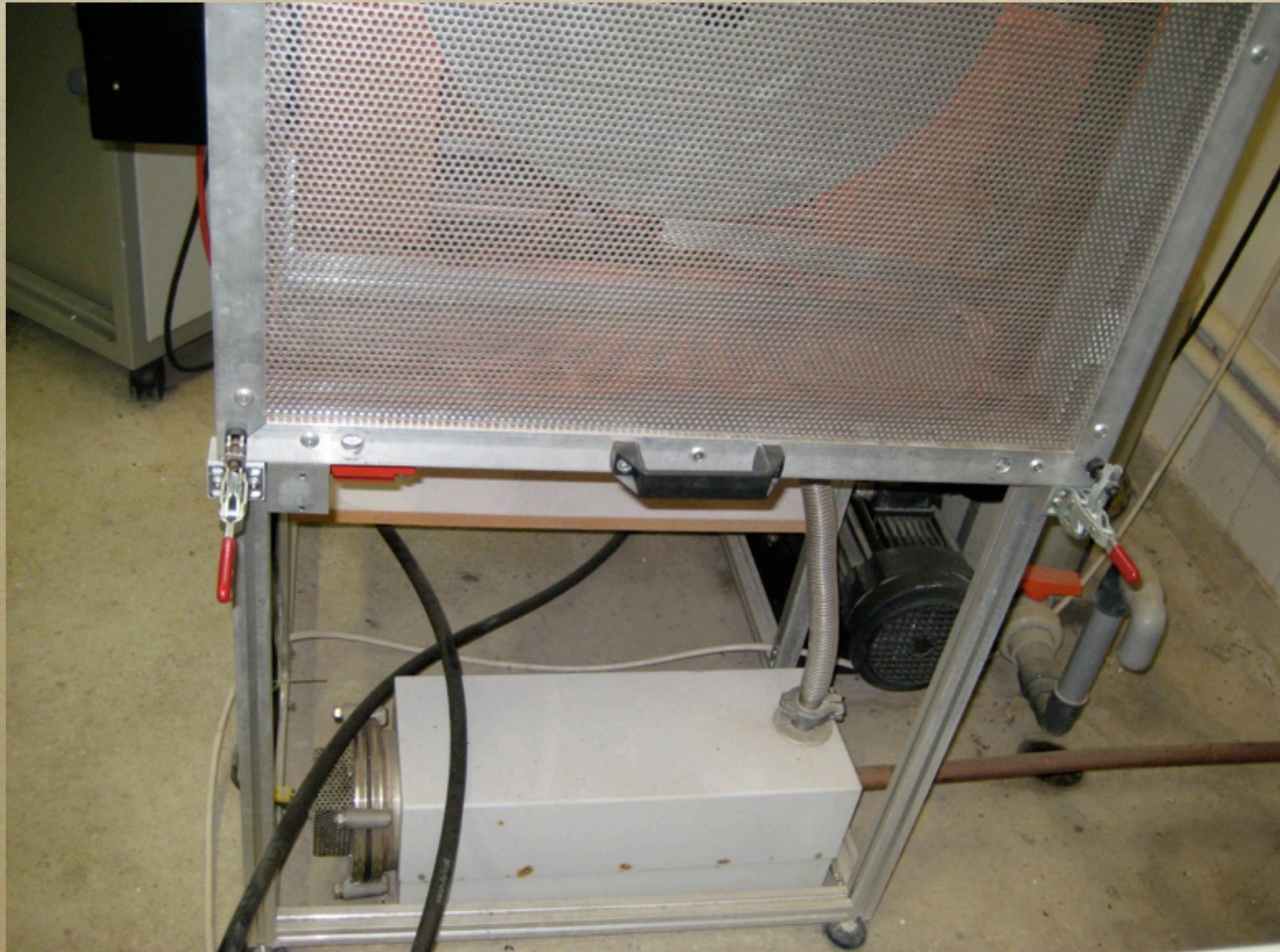
Πειραματική διάταξη



Πειραματική διάταξη



Πειραματική διάταξη



Επεξεργασία των ευρημάτων

- Αρχική επεξεργασία σε αναγωγικό πλάσμα H_2 θερμοκρασίας 250-300°C διάρκειας 1-10 ωρών
- Επανάληψη διαδικασίας έως ότου γίνει εφικτή η αποκάλυψη της αρχικής επιφάνειάς του
- Τελική επεξεργασία πλάσματος στην ίδια θερμοκρασία για 10-20 ώρες
- Επικάλυψη με εμπορικά προστατευτικά

Επεξεργασία των ευρημάτων

Πλάσμα	Αέρια (%)			Ισχύς (KWatt)	Πίεση P (Torr)	Θερ/σία T (°C)
	H ₂	CH ₄	N ₂			
πλάσμα H ₂	100	-	-	2.0-2.5	0.80-1.00	240-280
πλάσμα H ₂ , CH ₄	60	40	-	2.5-2.8	0.90	300
πλάσμα H ₂ , N ₂	60	-	40	2.5	1.20	350
πλάσμα H ₂ , CH ₄ , N ₂	50	25	25	2.0-2.5	0.90-1.20	280-400

Χρονική διάρκεια: 1-10 ώρες

Επεξεργασία των ευρημάτων

Επεξεργασία των ευρημάτων

Για να εξασφαλίσουμε μεγάλο βαθμό διέγερσης άρα και διάσπασης πρέπει να έχουμε τη μεγαλύτερη ισχύ στη μικρότερη δυνατή πίεση

Επεξεργασία των ευρημάτων

Για να εξασφαλίσουμε μεγάλο βαθμό διέγερσης άρα και διάσπασης πρέπει να έχουμε τη μεγαλύτερη ισχύ στη μικρότερη δυνατή πίεση

Η θερμοκρασία των αντικειμένων κυμαίνεται στην περιοχή των 300°C χωρίς να ξεπερνά σε καμία περίπτωση τους 400°C

Επεξεργασία των ευρημάτων

Για να εξασφαλίσουμε μεγάλο βαθμό διέγερσης άρα και διάσπασης πρέπει να έχουμε τη μεγαλύτερη ισχύ στη μικρότερη δυνατή πίεση

Η θερμοκρασία των αντικειμένων κυμαίνεται στην περιοχή των 300°C χωρίς να ξεπερνά σε καμία περίπτωση τους 400°C



Επεξεργασία των ευρημάτων

Για να εξασφαλίσουμε μεγάλο βαθμό διέγερσης άρα και διάσπασης πρέπει να έχουμε τη μεγαλύτερη ισχύ στη μικρότερη δυνατή πίεση

Η θερμοκρασία των αντικειμένων κυμαίνεται στην περιοχή των 300°C χωρίς να ξεπερνά σε καμία περίπτωση τους 400°C

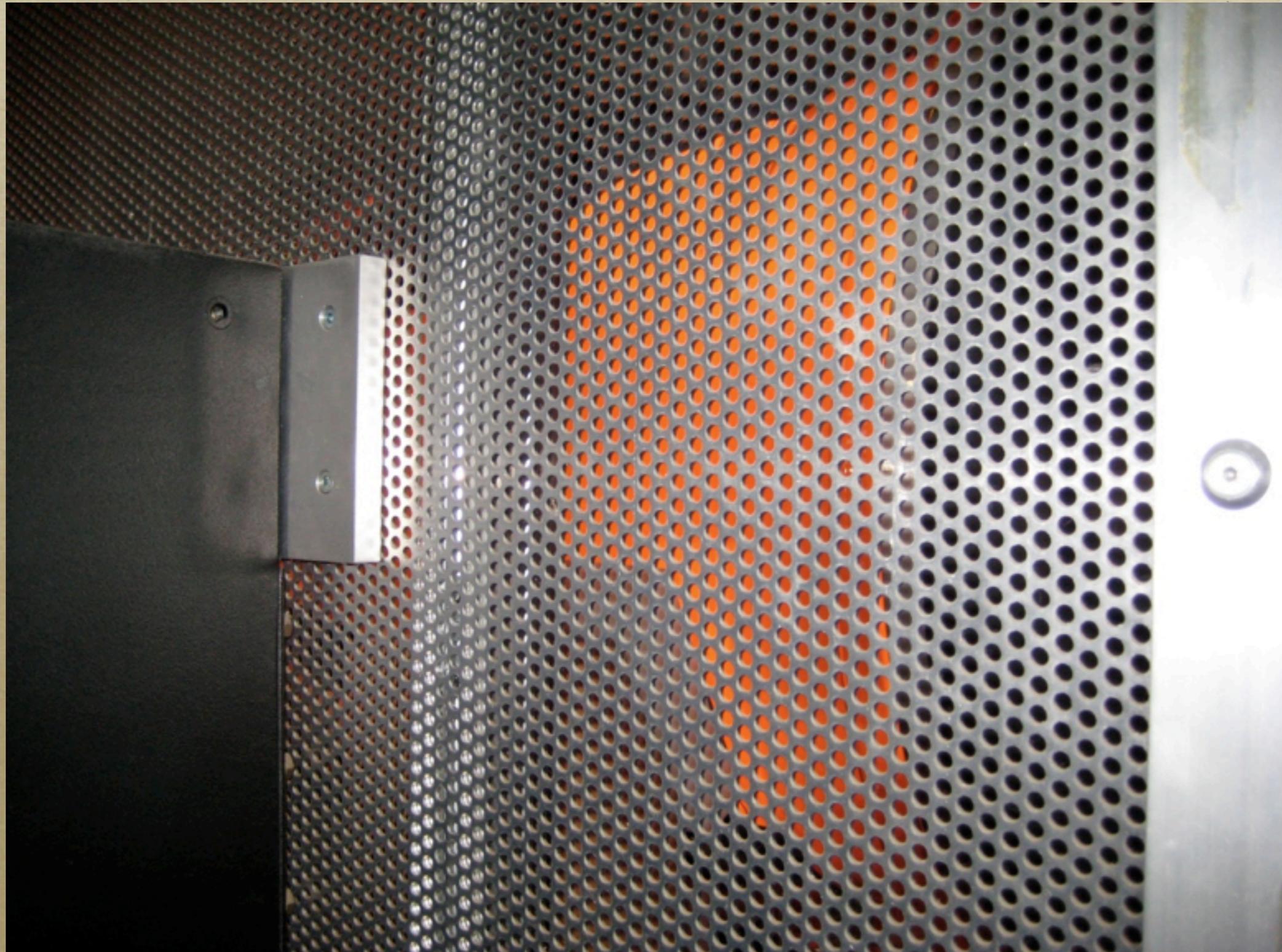


Η επεξεργασία στο πλάσμα H₂ προσφέρει τη συνδυαστική δράση της αναγωγής του επιφανειακού στρώματος οξείδωσης σε μαγνητίτη αφενός και αφετέρου τη συνεχή απομάκρυνση των Cl⁻ από το πορώδες ανηγμένο στρώμα στην ήπια θερμοκρασία των 250-300°C, η οποία δεν επιφέρει αλλαγές στη μικροδομή του αντικειμένου

Επεξεργασία των ευρημάτων



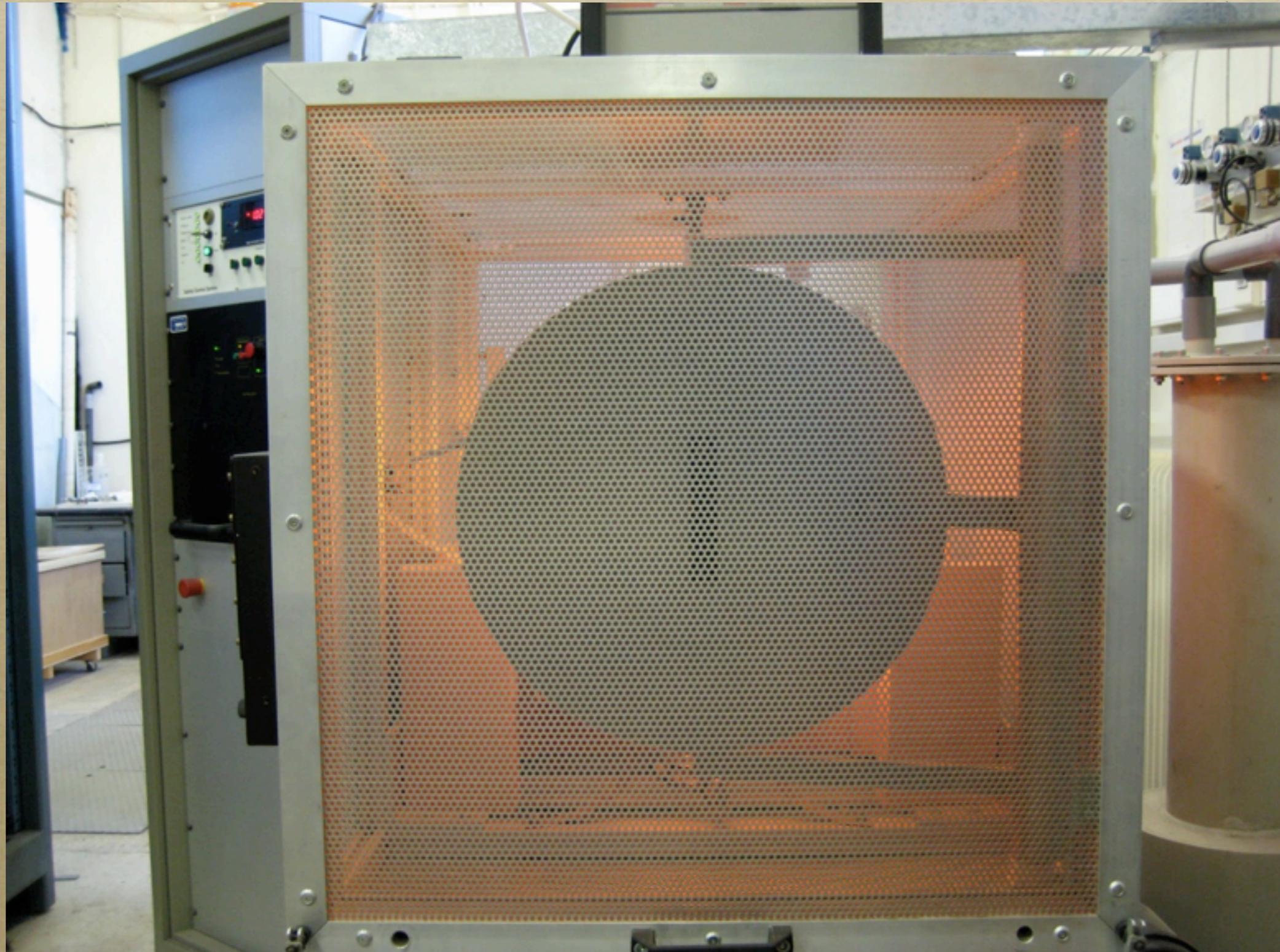
Επεξεργασία των ευρημάτων



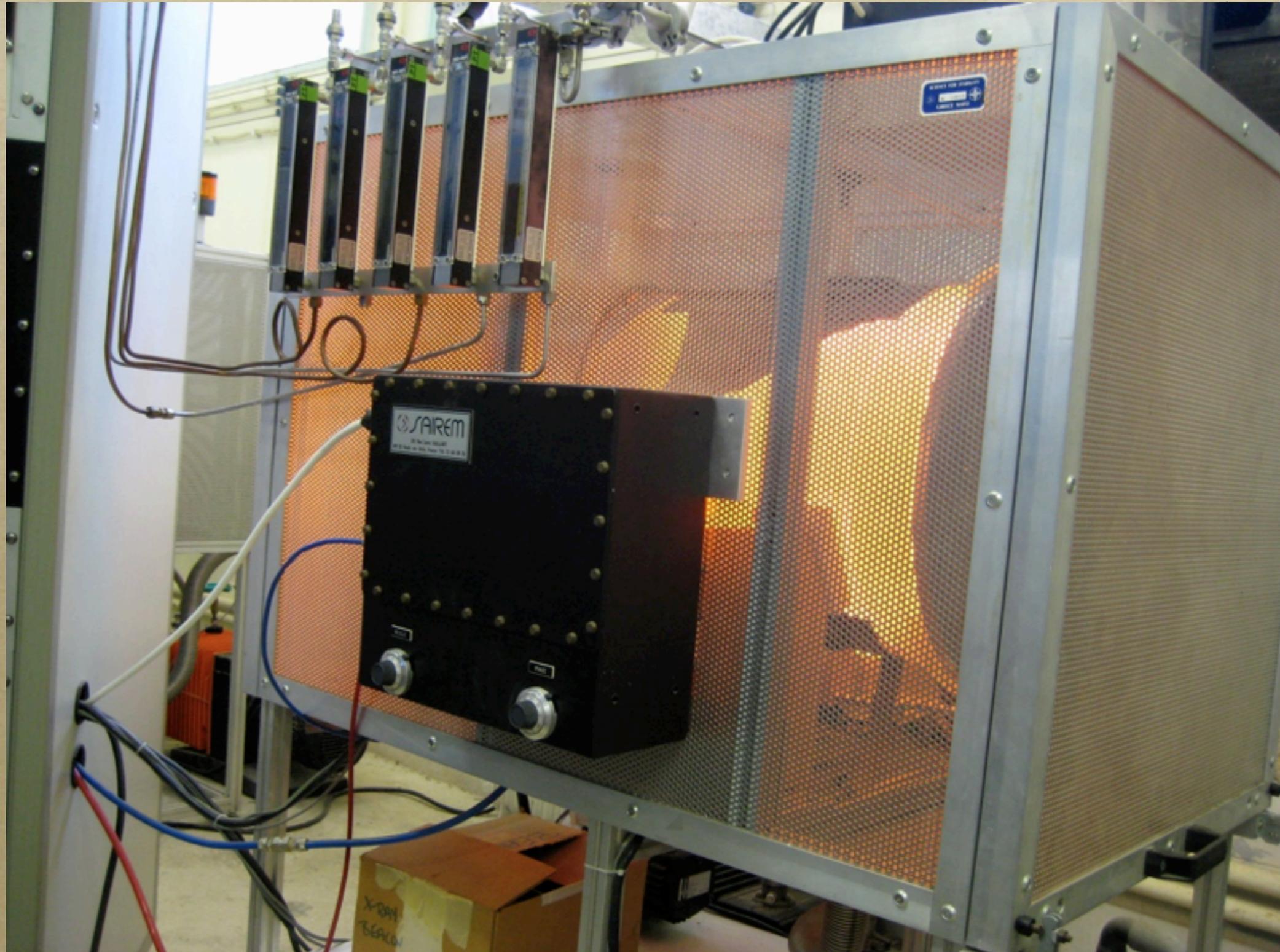
Επεξεργασία των ευρημάτων



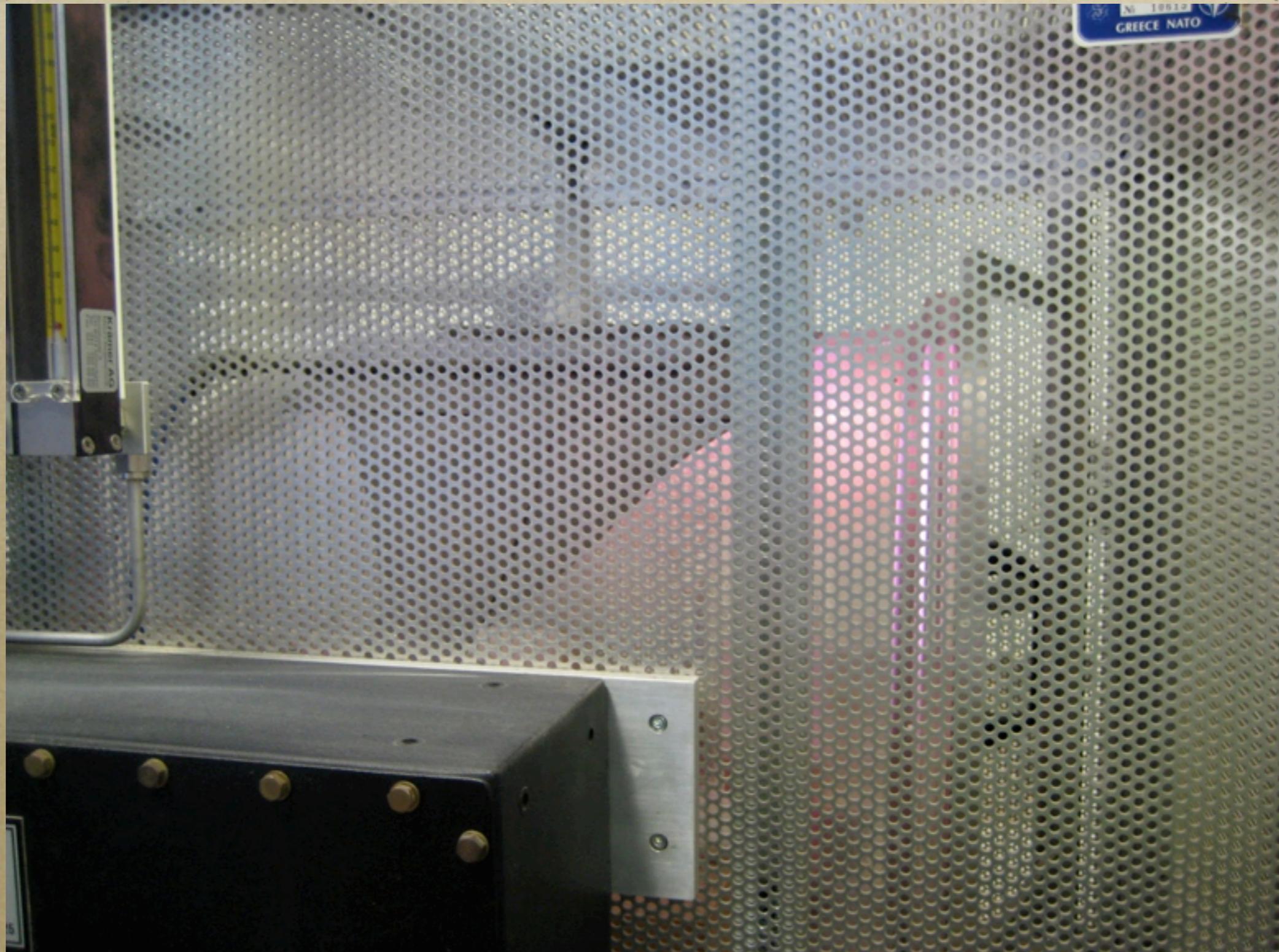
Επεξεργασία των ευρημάτων



Επεξεργασία των ευρημάτων



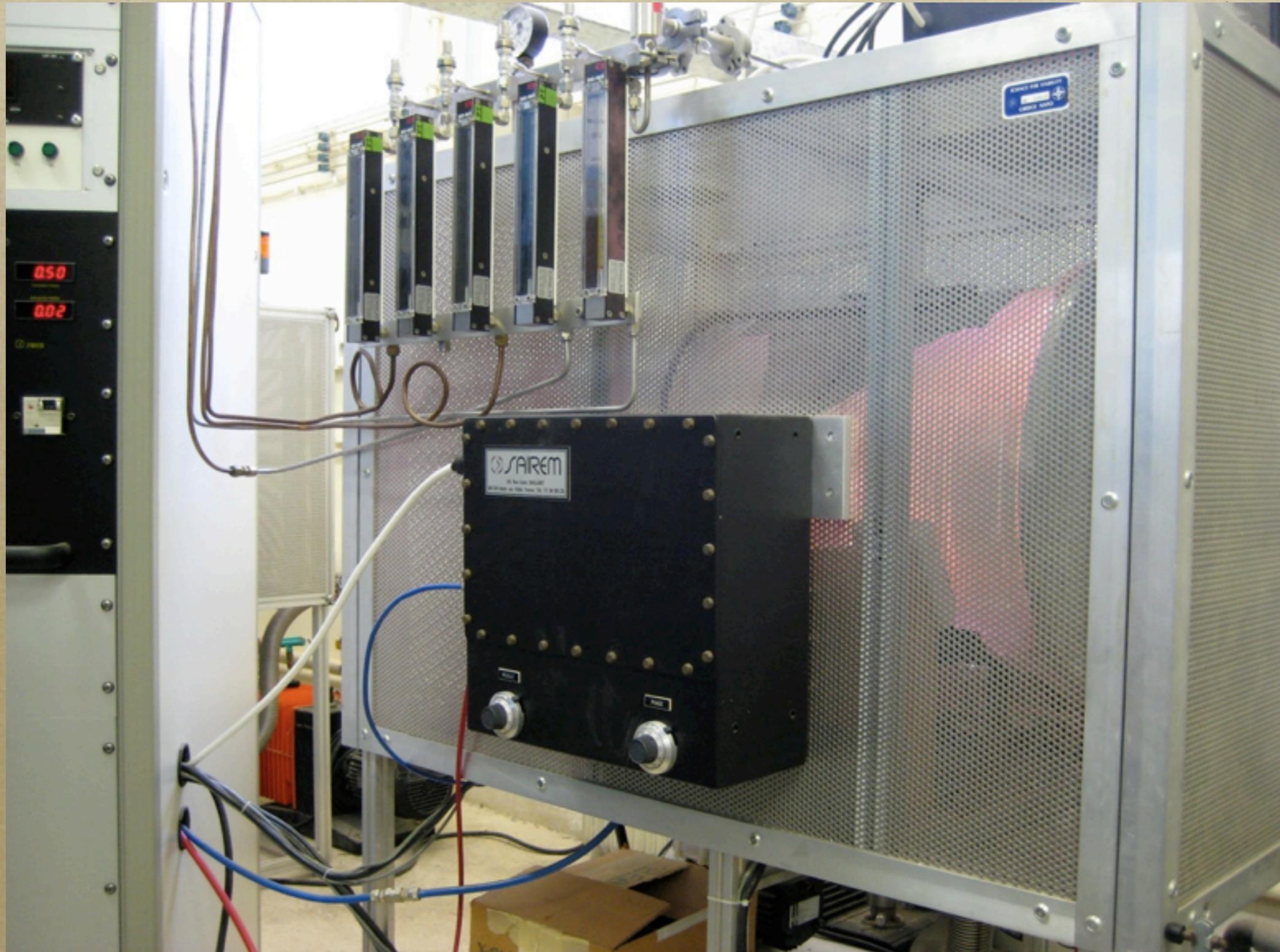
Επεξεργασία των ευρημάτων



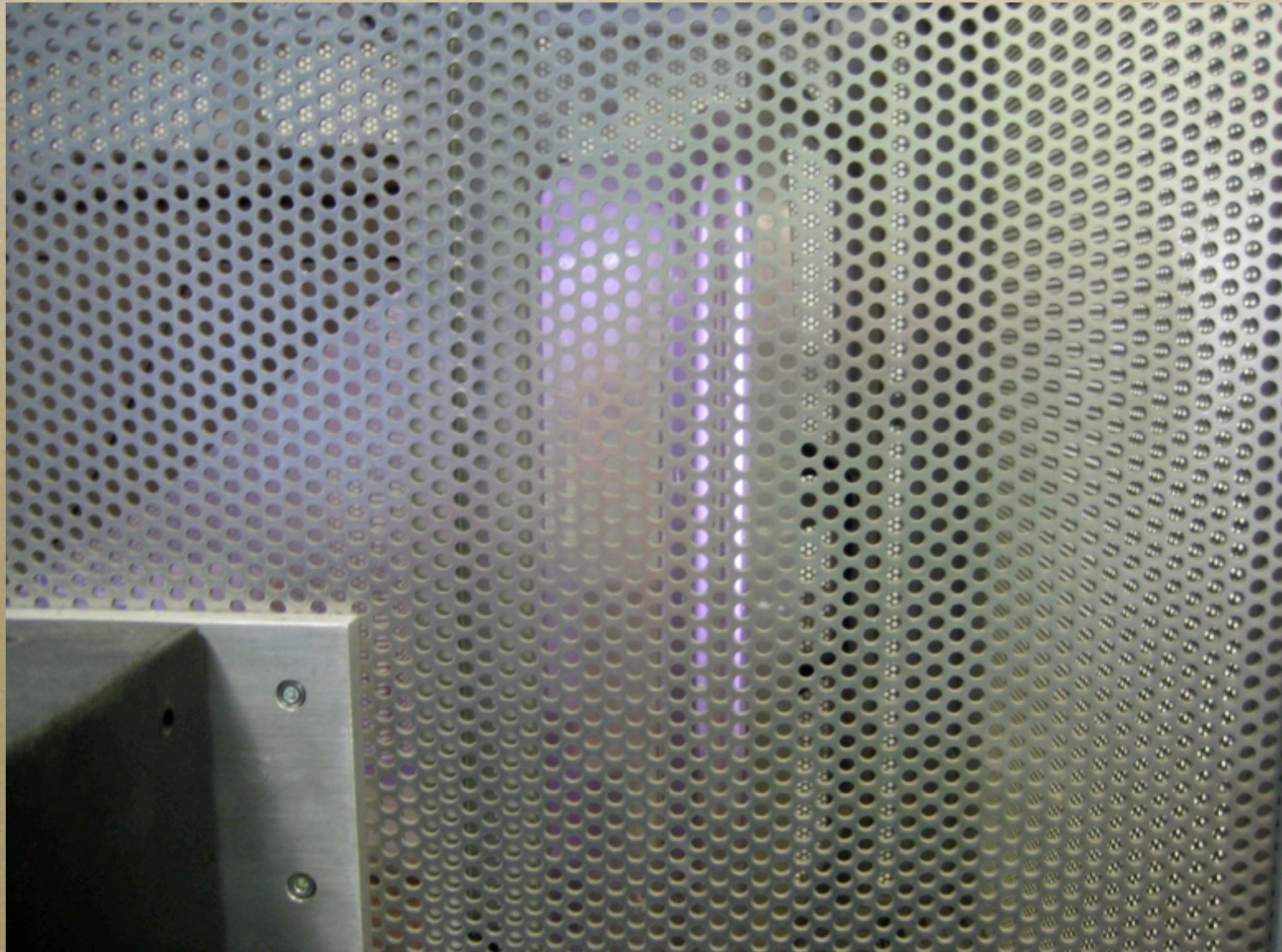
Επεξεργασία των ευρημάτων



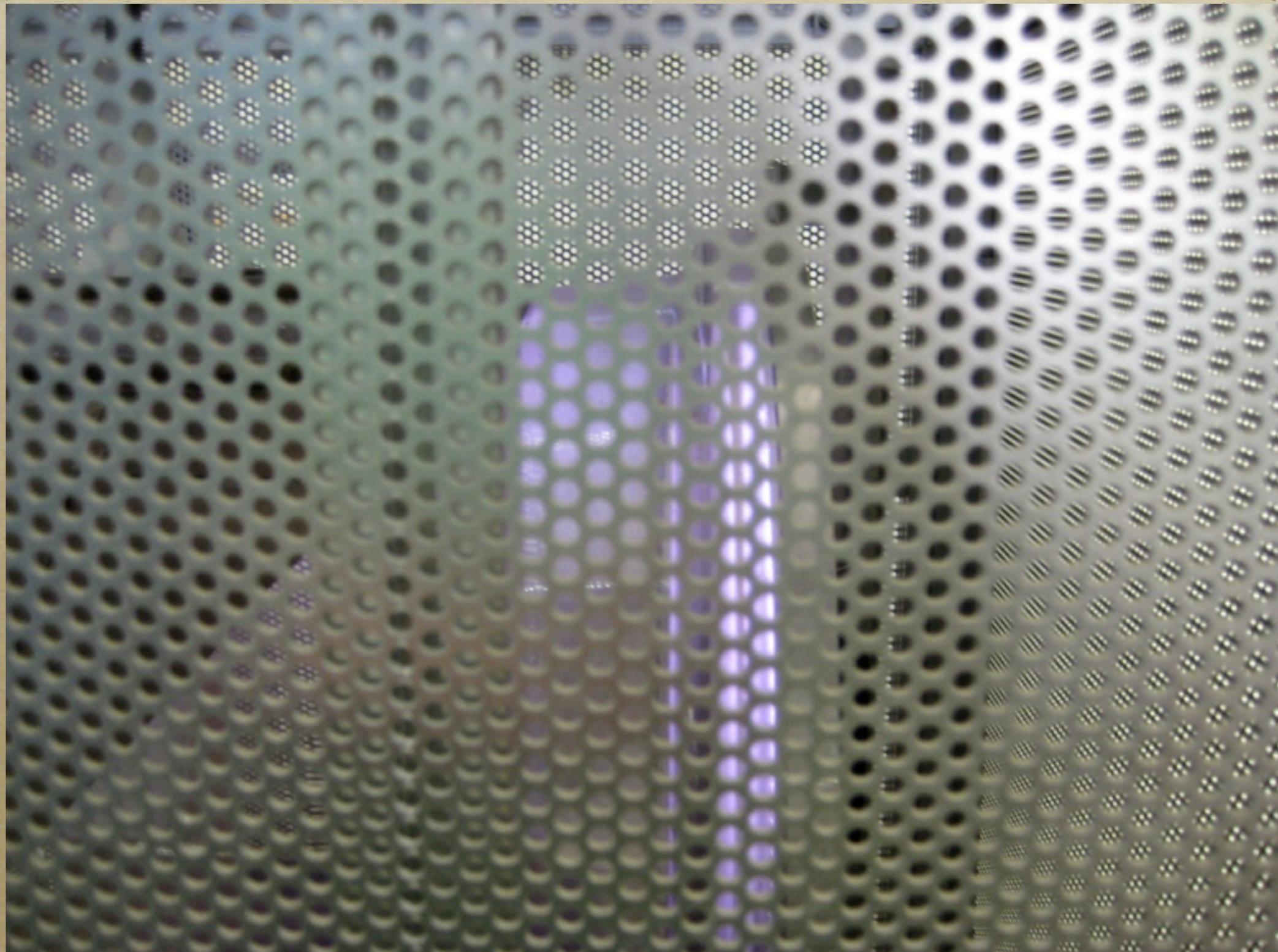
Επεξεργασία των ευρημάτων



Επεξεργασία των ευρημάτων



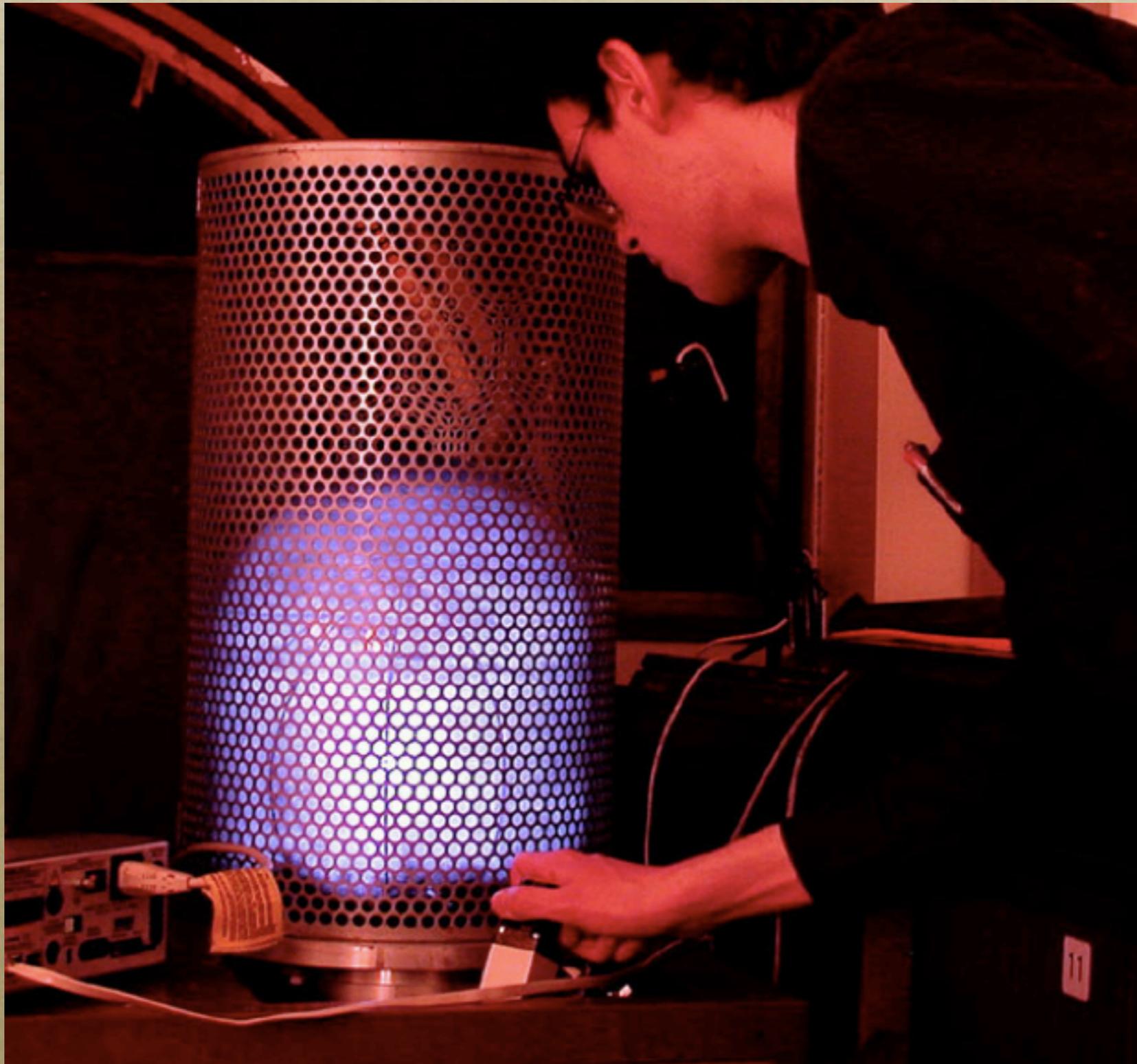
Επεξεργασία των ευρημάτων



Επεξεργασία των ευρημάτων



Επεξεργασία των ευρημάτων



Αποτελέσματα

Μέθοδοι εξέτασης των δειγμάτων και μελέτης του πλάσματος

- Φασματοσκοπία εκπομπής πλάσματος εκκένωσης αίγλης
- Περιθλασιμετρία ακτίνων X (XRD)
- Νετρονική ενεργοποίηση
- Ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης
- Μεταλλογραφικό μικροσκόπιο
- Μικροσκληρότητα κατά Vickers
- Ηλεκτροχημικές μετρήσεις διάβρωσης
- Μέτρηση ρυθμού διάβρωσης σε περιβάλλον υγρού θαλάμου

Αποτελέσματα

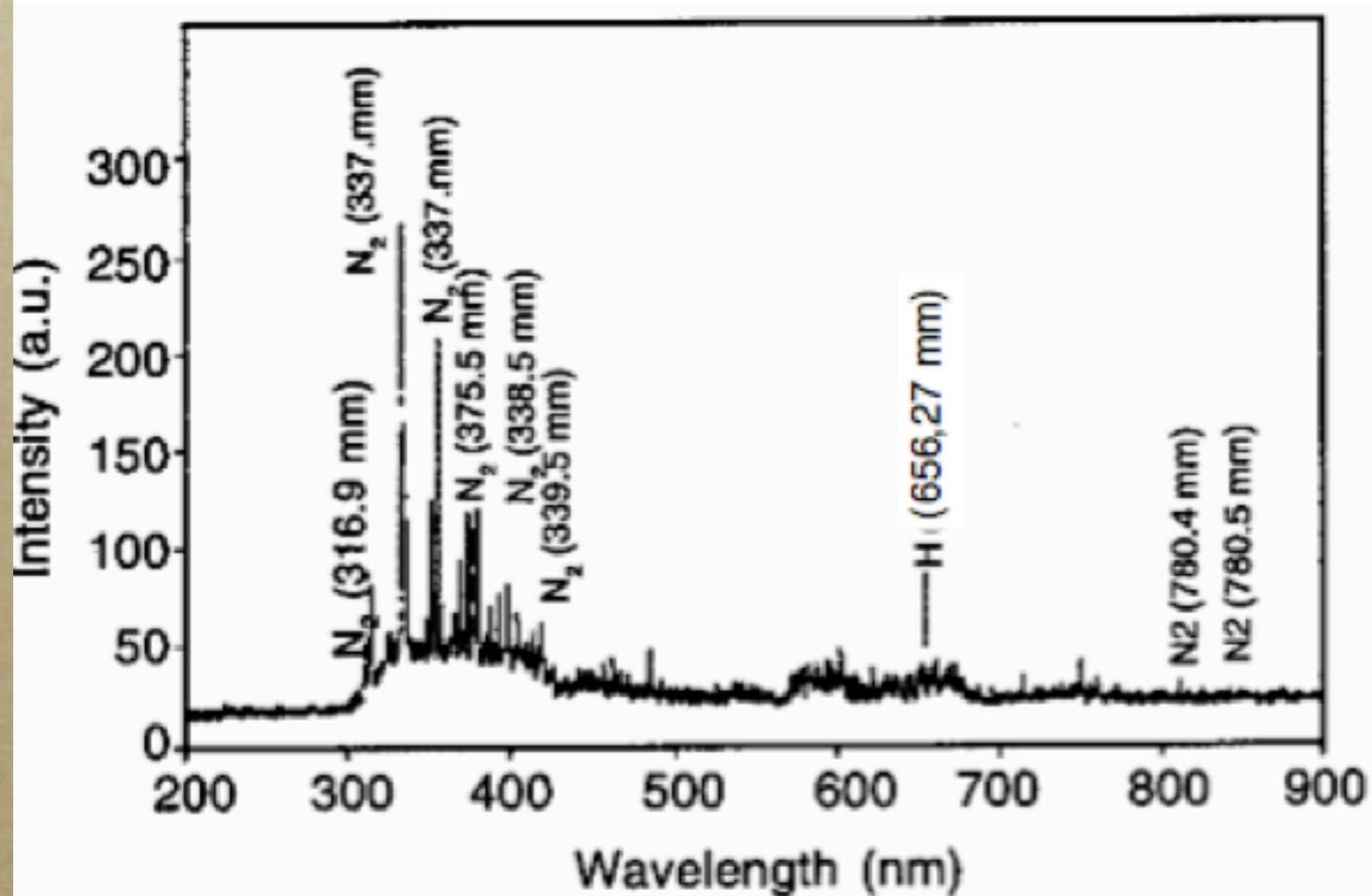
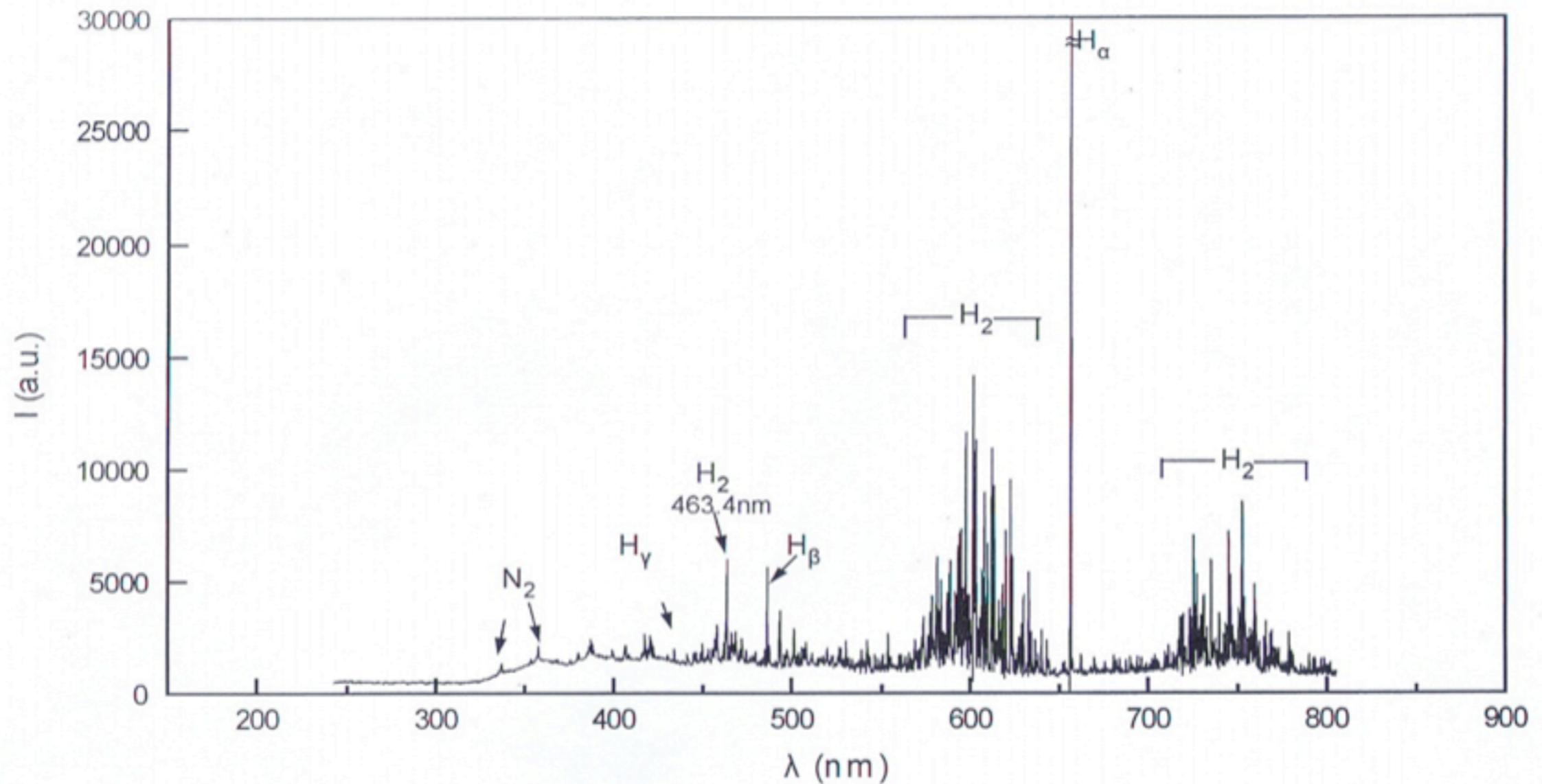


Figure 8 – Spectrum between 200 and 900 nm of a plasma in a mixture of H₂-N₂-Ar. No artefact within the plasma.

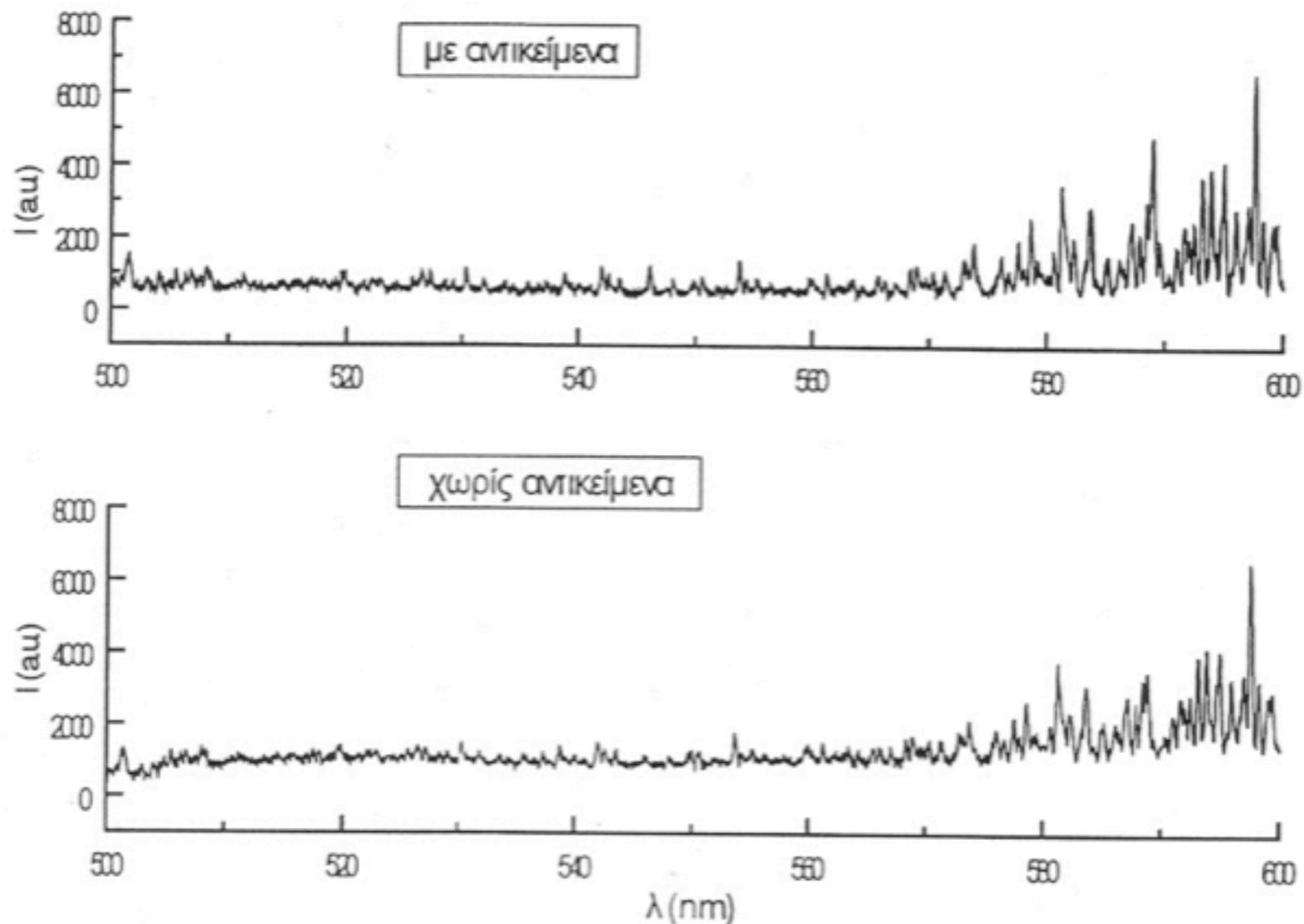
Figure 8 – Spectre entre 200 et 900 nm d'un plasma dans un mélange de H₂-N₂-Ar.

Αποτελέσματα



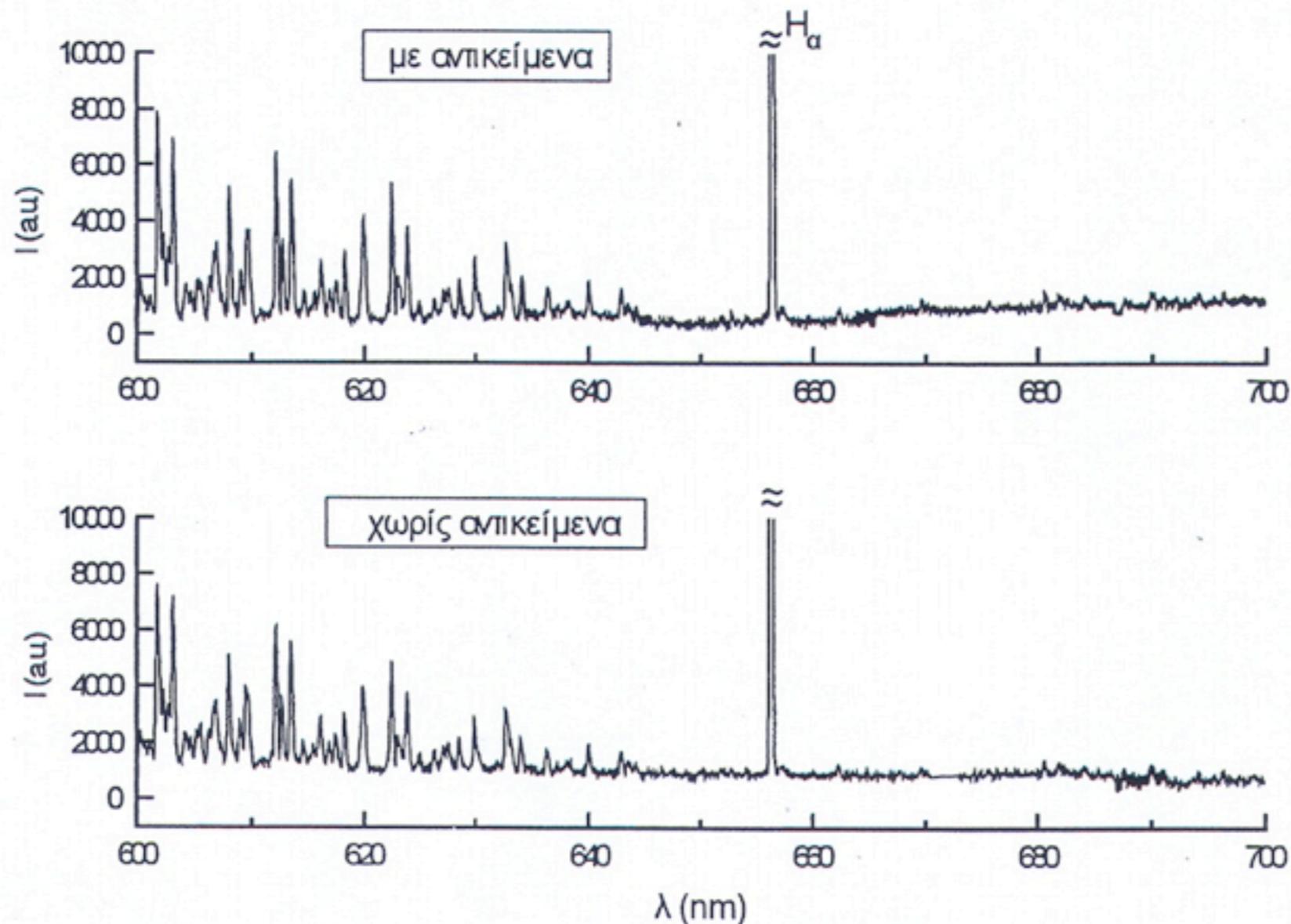
Σχήμα 5.1: Φάσμα πλάσματος H_2 , $P=1\text{Torr}$, $W=1000\text{W}$, $T=280^\circ\text{C}$

Αποτελέσματα



Σχήμα 5.20: Φάσμα εκκένωσης στην περιοχή 500-600nm, συγκριτικά για εκκένωση H_2 χωρίς αντικείμενα και με σιδερένια διαβρωμένα αντικείμενα. $100\%H_2$, πίεσης $P=1\text{Torr}$, ισχύος $W=1000\text{Watt}$ και θερμοκρασίας $T=280^\circ\text{C}$.

Αποτελέσματα



Σχήμα 5.21: Φάσμα εκκένωσης στην περιοχή 600-700nm, συγκριτικά για εκκένωση H_2 χωρίς αντικείμενα και με σιδερένια διαβρωμένα αντικείμενα. $100\%H_2$, πίεσης $P=1Torr$, ισχύος $W=1000Watt$ και θερμοκρασίας $T=280^{\circ}C$.

Αποτελέσματα

Η ακόμη και ολιγόωρη αρχική επεξεργασία στο αναγωγικό περιβάλλον της εκκένωσης H_2 στους $240-280^\circ C$ όταν εφαρμόζεται στα δείγματα, προκαλεί επιβράδυνση της διάβρωσής τους

Αποτελέσματα

Η ακόμη και ολιγόωρη αρχική επεξεργασία στο αναγωγικό περιβάλλον της εκκένωσης H_2 στους $240-280^\circ C$ όταν εφαρμόζεται στα δείγματα, προκαλεί επιβράδυνση της διάβρωσής τους

Δημιουργείται μαγνητίτης Fe_3O_4

Αποτελέσματα

Η ακόμη και ολιγόωρη αρχική επεξεργασία στο αναγωγικό περιβάλλον της εκκένωσης H_2 στους $240-280^\circ C$ όταν εφαρμόζεται στα δείγματα, προκαλεί επιβράδυνση της διάβρωσής τους

Δημιουργείται μαγνητίτης Fe_3O_4

Απομακρύνονται σε μεγάλο βαθμό τα χλωριόντα

Αποτελέσματα

Η ακόμη και ολιγόωρη αρχική επεξεργασία στο αναγωγικό περιβάλλον της εκκένωσης H_2 στους $240-280^\circ C$ όταν εφαρμόζεται στα δείγματα, προκαλεί επιβράδυνση της διάβρωσής τους

Δημιουργείται μαγνητίτης Fe_3O_4

Απομακρύνονται σε μεγάλο βαθμό τα χλωριόντα

Δεν προκαλούνται αλλαγές στη μικροδομή του μεταλλικού πυρήνα

Αποτελέσματα



Αποτελέσματα



Αποτελέσματα



Αποτελέσματα

Σύγκριση μεθόδων

Αποτελέσματα

Σύγκριση μεθόδων

“Συμβατικές” μέθοδοι (μηχανική αποκατάσταση, χημικής φύσης, ηλεκτροχημικής φύσης)

Αποτελέσματα

Σύγκριση μεθόδων

“Συμβατικές” μέθοδοι (μηχανική αποκατάσταση, χημικής φύσης, ηλεκτροχημικής φύσης)

Χρήση πλάσματος

Αποτελέσματα

Σύγκριση μεθόδων

“Συμβατικές” μέθοδοι (μηχανική αποκατάσταση, χημικής φύσης, ηλεκτροχημικής φύσης)

Χρήση πλάσματος

Χρήση laser

Έρευνα - εφαρμογές

Προοπτικές

Έρευνα - εφαρμογές

Προοπτικές

Κράματα χαλκού

Έρευνα - εφαρμογές

Προοπτικές

Κράματα χαλκού

Ασημένια αντικείμενα

Έρευνα - εφαρμογές

Προοπτικές

Κράματα χαλκού

Ασημένια αντικείμενα

Χαρτί

Έρευνα - εφαρμογές

Προοπτικές

Κράματα χαλκού

Ασημένια αντικείμενα

Χαρτί

Κεραμικά αντικείμενα

Βιβλιογραφία

- Βλάχος Λ., *Φυσική του πλάσματος*, εκδ. Τζιόλα, 2000.
- Graaf M. J. de, Severens R. J., Ijzendoorn L. J. van, Munnik F., Otorbaev D. K., et al., *Cleaning of Iron archaeological artefacts by cascaded arc plasma treatment*, Surface and Coatings Technology, **74-75** (1-3), **351-354** (1995).
- Korenberg C., Baldwin A., *Laser Cleaning Tests on Archaeological Copper Alloys Using an ND:YAG Laser*, Hindawi Publishing Corporation Laser Chemistry, Volume 2006, Article ID 75831.
- Κοτζαμανίδη Ειρ., *Εφαρμογή αναγωγικού πλάσματος εκκένωσης αίγλης ραδιοσυχνότητας για τον καθαρισμό και τη συντήρηση αρχαιολογικών ευρημάτων από σίδηρο*, Αθήνα 1999 (Διδακτορική διατριβή).
- Kotzamanidi I., Vassiliou P., Sarris Em., Anastassiadis A., Filippaki L., Filippakis S. E., *Effects of plasma cleaning and conservation treatment on the corrosion layer of corroded steel-XRD evaluation*, Anti-Corrosion Methods and Materials, Volume 49, **256-263**, 2002.
- Laguardia L., Vassallo E., Cappitelli F., Mesto E., Cremona A., Sorlini C., Bonizzoni G., *Investigation of the effects of plasma treatments on biodeteriorated ancient paper*, Applied Surface Science 252, **1159-1166**, 2005.
- Mozetič M., *Discharge cleaning with hydrogen plasma*, Vacuum 61, **367-371**, 2001.
- Normand-Chave C., Leprince P., Dussère F., *Traitement d'objets archéologiques par plasma avant restauration*, La Revue de Métallurgie-CIT/Science et Génie des Matériaux, **809-815**, Septembre 2001.
- Ξαπλαντέρης Κ., *Αλληλεπίδραση επιφανειών στερεών και 'ψυχρού' πλάσματος*, Διάλεξη ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος, ΙΕΥ, Αθήνα 2007.
- Saetone E. A. O., Matta J. A. S. de, Alva W., et al., *Plasma cleaning and analysis of archeological artefacts from Sipán*, J. Phys. D: Appl. Phys. **36** (2003) 842-848.
- Shu H. Frank, *Αστροφυσική, Δομή και εξέλιξη του Σύμπαντος*, Τόμος Ι, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης, Ηράκλειο 2004.