Η ΤΕΧΝΙΚΗ ΤΗΣ ΦΩΤΟ-ΑΠΟΣΠΑΣΗΣ ΜΕ LASER ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΛΥΤΗΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ ΑΡΝΗΤΙΚΩΝ ΙΟΝΤΩΝ ΣΕ ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΕΚΚΕΝΩΣΕΙΣ

Σπυρίδων Αλειφέρης, Παναγιώτης Σβάρνας
Χώρος Τεχνολογίας Πλάσματος, Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Πατρών
e-mail: aleiferis@ece.upatras.gr, svarnas@ece.upatras.gr

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία, καταδεικνύεται η εφαρμοσιμότητα μίας τεχνικής ικανής να δώσει χωρικά αναλυμένες μετρήσεις της απόλυτης πυκνότητας αρνητικών ιόντων σε ηλεκτρικές εκκενώσεις χαμηλής πίεσης, συνδυάζοντας ένα κατάλληλα επιλεγμένο παλμικό laser κι έναν τριχοειδή ηλεκτροστατικό καθετήρα ευθυγραμμισμένο ομοαξονικά με τη δέσμη του laser. Η τεχνική καλείται «φωτο-απόσπαση (photo-detachment)» κι εφαρμόζεται εδώ στην περίπτωση ηλεκτρικής εκκένωσης H_2 οδηγούμενης από μικροκύματα (2.45 GHz). Η πειραματική διάταξη καθώς κι η μεθοδολογία που ακολουθείται, περιγράφεται λεπτομερώς, προκειμένου να διασαφηνιστούν οι απαραίτητες προϋποθέσεις για τη σωστή εφαρμογή της τεχνικής. Τα αποτελέσματα τα οποία παρουσιάζονται, αναδεικνύουν τη σταθερή λειτουργία της πειραματικής διάταξης πλάσματος και την αξιοπιστία της διαγνωστικής τεχνικής.

Λέξεις-Κλειδιά: Ηλεκτρικές εκκενώσεις χαμηλών πιέσεων, υδρογόνο, αρνητικά ιόντα, φωτο-απόσπαση, ηλεκτροστατικοί καθετήρες.

Abstract

In the present study, the applicability of a technique for the spatially resolved measurement of absolute negative ion density in low pressure electrical discharges is presented. The technique relies on an appropriately chosen pulsed laser and an electrostatic probe aligned coaxially with the laser beam. The technique is called "photo-detachment" and is used on a microwave-driven (2.45 GHz) H_2 discharge. The experimental setup and the adopted methodology are described in detail, so that the prerequisites for the consistent application of the technique are clarified. The presented results reveal the stable operation of the plasma experimental setup and the reliability of the diagnostic technique.

Keywords: low-pressure electrical discharges, hydrogen, negative ions, photo-detachment, electrostatic probes.

1. Εισαγωγή

Οι εκκενώσεις ηλεκτραρνητικών αερίων βρίσκουν πολλές εφαρμογές σε επιστημονικές περιοχές όπως η νανοτεχνολογία (Tsuji et al., 2006), οι δομές μικροσκοπικής κλίμακας (Economou, 2007) κι οι προωθητήρες πλάσματος (Aanesland et al., 2009). Η σημαντικότερή τους εφαρμογή αφορά στις πηγές αρνητικών ιόντων υδρογόνου. Οι πηγές αυτές είναι απαραίτητες σε δύο κυρίως τομείς: α) στους επιταχυντές υψηλής ενέργειας στους οποίους γίνεται έγχυση αρνητικών ιόντων και β) στους αντιδραστήρες σύντηξης

μαγνητικού περιορισμού στους οποίους γίνεται έγχυση ουδετέρων σωματιδίων (Bacal and Wada, 2015).

Η ανάπτυξη των πηγών αυτών εξελίχθηκε σημαντικά τη δεκαετία του ‘70 με την ανακάλυψη των πηγών επιφάνειας (Belchenko, 1993). Στις πηγές αυτές η παραγωγή αρνητικών ιόντων γίνεται με τον άμεσο ιονισμό ουδετέρων ή θετικών ιόντων σε επιφάνειες με χαμηλό έργο εξόδου. Για να επιτευχθεί ένα αρκετά χαμηλό έργο εξόδου, γίνεται επικάλυψη μεταλλικών επιφανειών με καίσιο. Ωστόσο, καθώς η διαχείριση του καισίου είναι αρκετά δύσκολη, η λειτουργία των πηγών επιφάνειας συνδέεται με αρκετά μειονεκτήματα (Santoso et al., 2015).

Ένας ακόμα αποδοτικός μηχανισμός παραγωγής αρνητικών ιόντων ανακαλύφθηκε λίγο αργότερα κι αφορά στην παραγωγή ιόντων στον κύριο όγκο του πλάσματος (Bacal and Hamilton, 1979). Στις πηγές όγκου ο σχηματισμός αρνητικών ιόντων γίνεται μέσω της διαχωρίζουσας προσάρτησης ηλεκτρονίων σε δονητικά διεγερμένα μόρια υδρογόνου. Το πλεονέκτημα των πηγών αυτών είναι πως βασίζονται σε μία εκκένωση καθαρού υδρογόνου και παρουσιάζουν πιο σταθερή λειτουργία.

Η αποδοτική λειτουργία μιας τέτοιας πηγής βασίζεται στην ταυτόχρονη παρουσία ηλεκτρονίων χαμηλής ενέργειας και δονητικά διεγερμένων μορίων υδρογόνου. Τα ενεργητικά ηλεκτρόνια της εκκένωσης είναι πολύ σημαντικά για την παραγωγή των δύο παραπάνω αντιδρώντων καθώς συμμετέχουν στις κρούσεις που τα δημιουργούν (Mario Capitelli et al., 2016). Ωστόσο, τα ενεργητικά ηλεκτρόνια μπορούν και να καταστρέψουν τα αρνητικά ιόντα μέσω κρούσεων που προκαλούν απόσπαση ηλεκτρονίων. Για το λόγο αυτό οι πηγές αρνητικών ιόντων σχεδιάζονται με ένα μαγνητικό φίλτρο που σκοπό έχει το διαχωρισμό της πηγής σε δύο μέρη. Μία περιοχή όπου τα ενεργητικά ηλεκτρόνια διεγείρουν κι ιονίζουν το πλάσμα, και μία περιοχή στην οποία διαχέονται τα ηλεκτρόνια χαμηλής ενέργειας για να αντιδράσουν με τα επίσης διαχέοντα διεγερμένα μόρια και να σχηματίσουν αρνητικά ιόντα. Η πηγή Προμηθέας Ι, που μελετάται στην εργασία αυτή, έχει σχεδιαστεί ως μία τέτοια πηγή όγκου.

Η μέτρηση τόσο της πυκνότητας όσο και της θερμοκρασίας των αρνητικών ιόντων, είναι απαραίτητη για τη μελέτη της παραγωγής τους. Η διαγνωστική τεχνική της φωτο-απόσπασης αναπτύχθηκε για τη μέτρηση αυτών των παραμέτρων (Bacal and Hamilton, 1979). Έκτοτε, η τεχνική αυτή χρησιμοποιήθηκε τόσο σε ηλεκτρικές εκκενώσεις υδρογόνου (Christ-Koch et al., 2009), όσο και σε εκκενώσεις άλλων αερίων. Παραδείγματα αποτελούν η εκκένωση οξυγόνου (Dodd et al., 2010) που βρίσκει εφαρμογή στην επεξεργασία επιφανειών καθώς και η εκκένωση εξαφθοριούχου θείου (SF_6) (Ishikawa et al., 1990).

Για τη μέτρηση των αρνητικών ιόντων έχουν αναπτυχθεί κι άλλες τεχνικές. Μία από αυτές αφορά στη χρήση ηλεκτροστατικών καθετήρων. Ωστόσο, τα αποτελέσματα της τεχνικής αυτής παρουσιάζουν σημαντικά σφάλματα σε σχέση με αυτά της φωτο-απόσπασης (Nikitin et al., 1996). Άλλοι τρόποι μέτρησης των αρνητικών ιόντων αφορούν σε φασματοσκοπικές μεθόδους (Cavity Ring-Down Spectroscopy ή CRDS), οι οποίες όμως πραγματοποιούν ολοκληρωμένες στο χώρο μετρήσεις (Berger et al., 2009). Για το λόγο αυτό, η τεχνική της φωτο-απόσπασης, η οποία μπορεί να δώσει ακριβή χωρικά αναλυμένα αποτελέσματα, με καλή χρονική ανάλυση, έχει γίνει ένα σημαντικό εργαλείο για τη μελέτη αρνητικών ιόντων. Η αξιοπιστία της τεχνικής αυτής ενισχύεται περαιτέρω από τη συμφωνία που έχουν τα αποτελέσματα με άλλες παραμέτρους των ηλεκτρικών εκκενώσεων, όπως π.χ. το εξαγόμενο ρεύμα σε πηγές αρνητικών ιόντων (Bacal, 2000).

Γενικά, για την εφαρμογή της τεχνικής αυτής, η εκκένωση ακτινοβολείται με έναν ή περισσότερους παλμούς laser, οι οποίοι αποσπούν τα ηλεκτρόνια από τα αρνητικά ιόντα, προκαλώντας μία τοπική περίσσεια ηλεκτρονίων (φωτο-ηλεκτρόνια). Μετρώντας την πυκνότητα των ηλεκτρονίων αυτών, μέσω ενός θετικά πολωμένου ηλεκτροστατικού καθετήρα, γίνεται μέτρηση της πυκνότητας των αρνητικών ιόντων. Με τη χρήση ενός δεύτερου παλμού laser μπορεί να μετρηθεί η εξέλιξη της πυκνότητας των φωτο-ηλεκτρονίων, από την οποία μπορεί να υπολογιστεί η θερμοκρασία των αρνητικών ιόντων (Bacal, 2000).

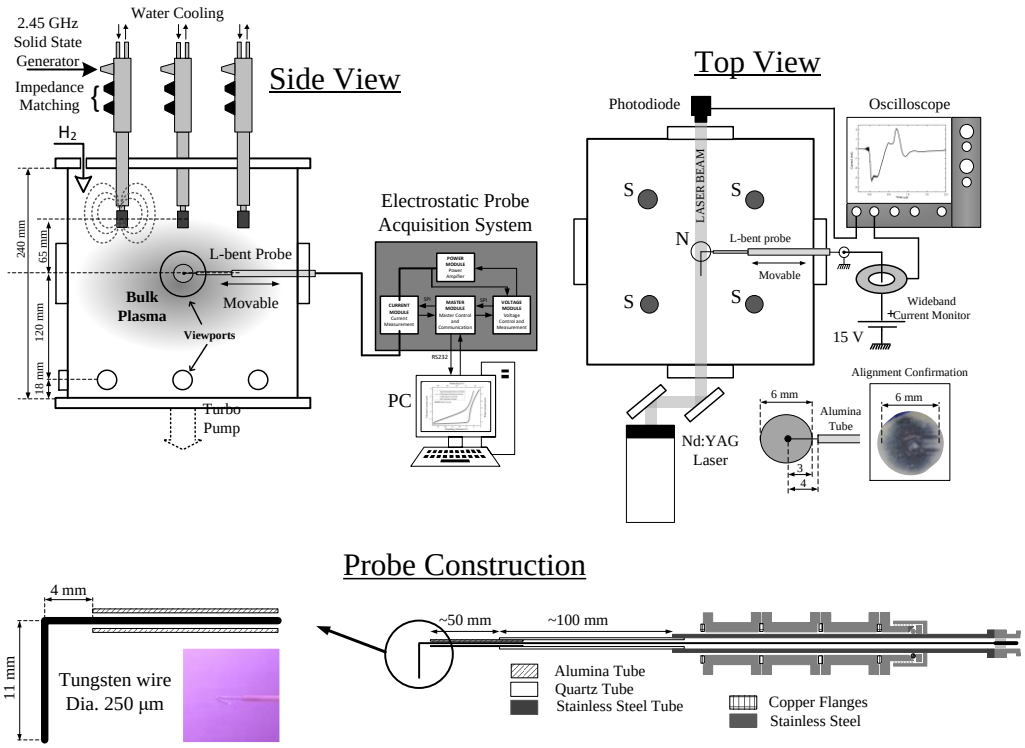
Η παρούσα εργασία αφορά σε ένα σύστημα με έναν παλμό laser για τη μέτρηση της πυκνότητας αρνητικών ιόντων. Η αναλυτική παρουσίαση του εξοπλισμού και της πειραματικής διαδικασίας γίνεται στην επόμενη ενότητα. Όπως θα εξηγηθεί, η πρωθύστερη μέτρηση της πυκνότητας ηλεκτρονίων της εκκένωσης είναι απαραίτητη προϋπόθεση για την εφαρμογή της τεχνικής. Για το λόγο αυτό, μια διάταξη μετρήσεων ηλεκτροστατικών καθετήρων τύπου Langmuir είναι αναπόσπαστο κομμάτι ενός συστήματος φωτο-απόσπασης όπως προτείνεται εδώ. Η παρουσίαση του συστήματος αυτού γίνεται στην υποενότητα 2.1, ενώ η παρουσίαση του συστήματος φωτο-απόσπασης γίνεται στη 2.2. Στην ενότητα 3 παρουσιάζονται αποτελέσματα από ηλεκτρικές εκκενώσεις υδρογόνου στην πηγή αρνητικών ιόντων Προμηθέας Ι.

2. Πειραματική Διάταξη – Μεθοδολογία

Η πειραματική διάταξη της πηγής αρνητικών ιόντων Προμηθέας Ι παρουσιάζεται στο Σχήμα 1. Η αναλυτική παρουσίαση της πηγής καθώς κι όλων το διαγνωστικών που χρησιμοποιούνται γίνεται στην αναφορά (Αλειφέρης, 2016). Ο θάλαμος της πηγής είναι κυβικού σχήματος με εσωτερικό μήκος ακμής 24 cm κι είναι κατασκευασμένος από ανοξείδωτο ατσάλι. Στην μπροστά και στην πίσω όψη του θαλάμου έχουν προσαρμοστεί παράθυρα ώστε να υπάρχει διαμπερής διάβαση της δέσμης laser της φωτο-απόσπασης καθώς και πρόσβαση με άλλες διαγνωστικές τεχνικές. Στις υπόλοιπες όψεις της πηγής υπάρχουν ανοίγματα για εν κενώ εγκατάσταση αισθητήρων πίεσης, ηλεκτροστατικών καθετήρων κ.α..

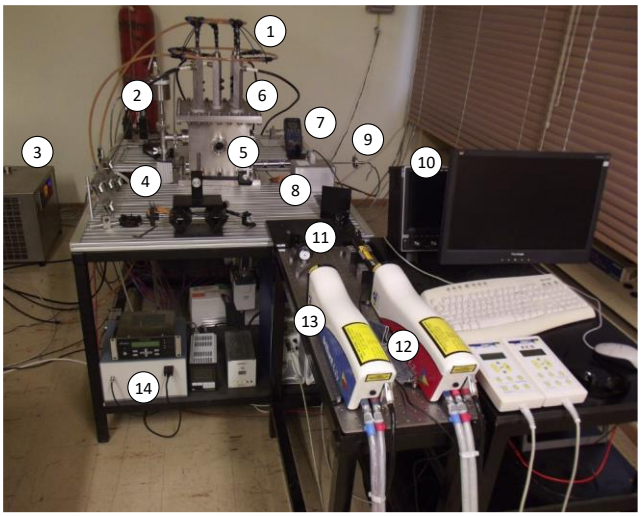
Η πίεση βάσης της πηγής είναι $3x10^{-7}$ Torr, η οποία επιτυγχάνεται μέσω μία εν κενώ αντλίας ισχύος. Η εκκένωση γίνεται σε σταθερή ροή υδρογόνου κι η πίεση λειτουργίας φτάνει έως τα 20 mTorr. Το πλάσμα συντηρείται από ένα δίκτυο πέντε διπολικών πηγών Κυκλοτρονικού Συντονισμού Ηλεκτρονίων (Electron Cyclotron Resonance, ECR) (Béchu et al., 2013), οι οποίες οδηγούνται από ανεξάρτητες στοιχειώδεις μικροκυματικές (2.45 GHz) πηγές μέγιστης ισχύος 180 W.

Συνοπτικά, η οδήγηση του πλάσματος από πηγές ECR συνίσταται στην έγχυση μικροκυμάτων στο πλάσμα, σε μία περιοχή με κατάλληλο μαγνητικό πεδίο ώστε να ικανοποιείται η συνθήκη κυκλοτρονικού συντονισμού των ηλεκτρονίων. Η σύζευξη των μικροκυμάτων με το πλάσμα στην περιοχή αυτή, αποδίδει με αποδοτικό τρόπο ενέργεια στα ηλεκτρόνια και μπορεί να οδηγήσει στον απαραίτητο ρυθμό διέγερσης και ιονισμού του πλάσματος. Ταυτόχρονα, μία διάταξη ECR δεσμεύει τα ηλεκτρόνια στην περιοχή όπου το μαγνητικό πεδίο ικανοποιεί την παραπάνω συνθήκη συνεισφέροντας στο χωρικό διαχωρισμό των θερμών και των ψυχρών ηλεκτρονίων λειτουργώντας με τον τρόπο αυτό και σαν μαγνητικό φίλτρο. Οι συγκεκριμένες πηγές ECR που χρησιμοποιούνται εδώ, έχουν ένα ιδιαίτερα πρακτικό σχεδιασμό, βασισμένο σε μόνιμους μαγνήτες σαμαρίου-κοβαλτίου, και τις χαρακτηρίζει σταθερή λειτουργία (Lacoste et al., 2002).



Σχήμα 1. Πειραματική διάταξη της πηγής Προμηθέας Ι στην οποία είναι εγκατεστημένη η τεχνική της φωτο-απόσπασης. Πρόσοψη παρουσία της διάταξης ηλεκτροστατικών καθετήρων, κάτοψη παρουσία της διάταξης φωτο-απόσπασης και λεπτομερής δομή του καθετήρα.

Στο Σχήμα 2 παρουσιάζεται (φωτογραφία) η διάταξη για τη μέτρηση με ηλεκτροστατικούς καθετήρες και φωτο-απόσπαση. Σε αυτό το στάδιο της ανάπτυξης της πηγής, η εφαρμογής της τεχνικής της φωτο-απόσπασης γίνεται με ένα μόνο laser, με σκοπό τη μέτρηση της πυκνότητας των ιόντων. Ωστόσο, μελλοντικά, το δεύτερο laser το οποίο είναι διαθέσιμο θα χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με το πρώτο προκειμένου να γίνει η μέτρηση της θερμοκρασίας των αρνητικών ιόντων (Bacal, 2000).



1. Closed circuit of water for cooling
2. Baratron (Working pressure monitoring)
3. Industrial Cooler
4. Pinani (Base pressure monitoring)
5. Negative Ion Source Prometheus I
6. Dipolar ECR sources
7. Chamber temperature monitoring
8. Photodetachment current measuring circuit
9. Electrostatic probe
10. Oscilloscope for photodetachment signal
11. Optics for the alignment of the two lasers
12. First laser for single pulse photodetachment
13. Second laser for two pulse photodetachment
14. Electrostatic probe acquisition system

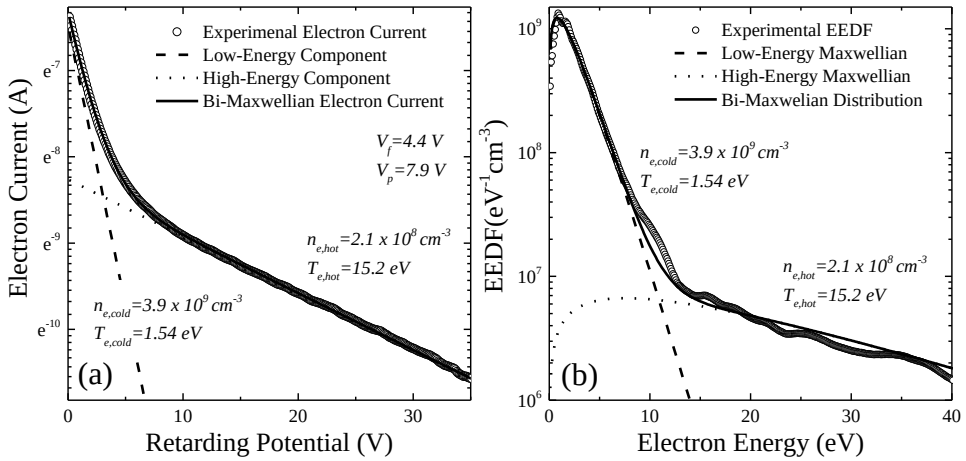
Σχήμα 2. Η πηγή Προμηθέας Ι με εγκατεστημένες τις διαγνωστικές τεχνικές των ηλεκτροστατικών καθετήρων και της φωτο-απόσπασης.

2.1 Η τεχνική των ηλεκτροστατικών καθετήρων

Ένας κυλινδρικός ηλεκτροστατικός καθετήρας εισάγεται στην εκκένωση όπως φαίνεται στο Σχήμα 1. Η μύτη του καθετήρα είναι ένα σύρμα βολφραμίου, διαμέτρου 0.25 mm, το οποίο είναι λυγισμένο σε σχήμα «Γ», ώστε να μπορεί να ευθυγραμμιστεί με τη δέσμη laser για την τεχνική της φωτο-απόσπασης. Το εκτεθειμένο μέρος του σύρματος είναι 15 mm, με το μακρύ σκέλος 11 mm και το κοντό 4 mm. Το υπόλοιπο σύρμα προστατεύεται από το πλάσμα από μία τηλεσκοπική διάταξη διηλεκτρικών (κύλινδρος αλουμίνας μέσα έναν κύλινδρο χαλαζία). Ο κύλινδρος χαλαζία στηρίζεται μέσα σε έναν κύλινδρο από ανοξείδωτο ατσάλι το οποίο τελειώνει σε έναν τυποποιημένο κονέκτορα BNC. Ένας στυπιοθλίπτης με O-ring, ο οποίος σφίγγει γύρω από τον κύλινδρο από ανοξείδωτο ατσάλι, διατηρεί το κενό επιτρέποντας ταυτόχρονα τη γραμμική κίνηση του καθετήρα.

Η επίκτηση των δεδομένων των ηλεκτροστατικών καθετήρων γίνεται με ένα αυτοματοποιημένο σύστημα (Aleiferis and Svarnas, 2014). Συνοπτικά, η διαδικασία της μέτρησης έχει ως εξής. Πριν από κάθε μέτρηση, ο καθετήρας ερυθροπυρώνεται με ρεύμα ηλεκτρονίων προκειμένου να καθαριστεί. Έπειτα γίνεται η σημείο-προς-σημείο επίκτηση της χαρακτηριστικής καμπύλης ρεύματος-τάσης με βήματα περίπου 100 mV. Για κάθε σημείο υπολογίζεται ο μέσος όρος από 2^{12}-2^{13} δείγματα τάσης-ρεύματος, ώστε να ελαττωθεί ο θόρυβος που επάγεται από το πλάσμα.

Το μαγνητικό πεδίο στη μύτη του καθετήρα εξαρτάται από τη θέση του κι από τη θέση των στοιχειωδών πηγών. Στη παρούσα εργασία, η ένταση του μαγνητικού πεδίου είναι 51 G (από το μαγνητοστατικό υπολογισμό με τη χρήση του λογισμικού Comsol Multiphysics), με διεύθυνση κάθετη στον καθετήρα. Η χαμηλότερη ηλεκτρονική θερμοκρασία η οποία παρατηρείται είναι 0.5 eV. Η τιμή αυτή αντιστοιχεί σε μία ακτίνα Larmor για τα ηλεκτρόνια ίση με 0.34 mm. Έτσι, ακόμα και στην χειρότερη περίπτωση, η ακτίνα του καθετήρα (0.125 mm) είναι μικρότερη από την ακτίνα Larmor, επιτρέποντας τη χρήση της «κλασσικής» μη μαγνητικής θεωρίας ηλεκτροστατικών καθετήρων (Aanesland et al., 2012; Godyak and Demidov, 2011).



Σχήμα 3. Τυπική μέτρηση ηλεκτροστατικών καθετήρων (Ισχύς = 180/στοιχειώδη πηγή, Πίεση = 4 mTorr). (a) Παρεμβολή διπλο-εκθετικής στο ρεύμα ηλεκτρονίων για τον καθορισμό των πυκνοτήτων και των θερμοκρασιών των ηλεκτρονίων (b) Σύγκριση της πειραματικής EEDF (μέθοδος Druyvesteyn), με την EEDF που υπολογίστηκε στο από το (a).

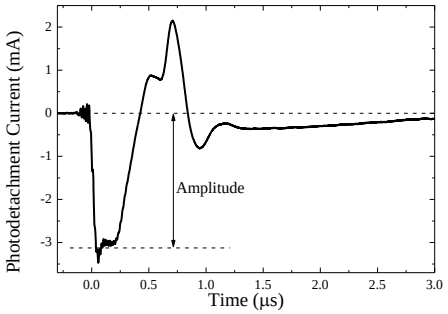
Τυπικές παράμετροι του πλάσματος καθορίζονται από μία διαδικασία παρεμβολής στην καμπύλη τάσης-ρεύματος (Hershkowitz, 1989). Το δυναμικό αιωρούμενου ηλεκτροδίου εκτιμάται από το σημείο τομής της καμπύλης με τον άξονα της τάσης και το δυναμικό πλάσματος από το μέγιστο της πρώτης παραγώγου του ρεύματος (dI/dV). Η εκτίμηση του ρεύματος θετικών ιόντων γίνεται από γραμμική παρέκταση του ρεύματος

καθετήρα για μεγάλα αρνητικά δυναμικά κι αφαιρείται από το συνολικό ρεύμα. Στο υπόλοιπο ρεύμα (ρεύμα ηλεκτρονίων) παρεμβάλλεται μία διπλο-εκθετική συνάρτηση (Σχήμα 3a) η οποία αντιστοιχεί σε μία διπλή Maxwell-Boltzmann Συνάρτηση Κατανομής της Ενέργειας των Ηλεκτρονίων (Electron Energy Distribution Function ή EEDF). Η πειραματική EEDF υπολογίζεται από τη δεύτερη παράγωγο του συνολικού ρεύματος του καθετήρα (μέθοδος Druyvesteyn) (Druyvesteyn, 1930; Godyak and Demidov, 2011). Το Σχήμα 3b δείχνει πόσο καλά συμπίπτει η πειραματική EEDF με τη διπλή κατανομή Maxwell-Boltzmann που αντιστοιχεί στις παραμέτρους που καθορίστηκαν με τη διαδικασία της παρεμβολής. Ένας άλλος τρόπος να υπολογιστεί η πυκνότητα ηλεκτρονίων, η οποία είναι απαραίτητη για την τεχνική της φωτο-απόσπασης, είναι ολοκληρώνοντας την EEDF.

Η επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων γίνεται με ένα πρόγραμμα που αναπτύχθηκε σε Matlab™. Το πρόγραμμα αυτό εφαρμόζει τη διαδικασία της παρεμβολής για τον καθορισμό των πυκνοτήτων και των θερμοκρασιών, κι έπειτα υπολογίζει τη δεύτερη παράγωγο του ρεύματος για τον καθορισμό της πειραματικής EEDF. Η απομάκρυνση του θορύβου, γίνεται με ένα συρόμενο φίλτρο Savitzky-Golay (Savitzky and Golay, 1964). Το παράθυρο του φίλτρου ξεκινά από ~0.3 eV στην περιοχή των χαμηλών ενεργειών κι αυξάνεται σταδιακά κατά περίπου 0.2–0.3 eV ανά eV ενέργειας ηλεκτρονίων (Hopkins and Graham, 1987). Προφανώς, αυτή ή διαδικασία μειώνει την ανάλυση της πειραματικής EEDF για μεγάλες ενέργειες.

2.2 Η τεχνική της φωτο-απόσπασης

Ένας βραχύς (~5 ns) παλμός laser Nd:YAG 1064 nm, ο οποίος παράγεται από ένα laser Quantel-Brilliant EaZy (330 mJ/παλμό), ομοαξονικά ευθυγραμμισμένος με το μακρύ σκέλος του ηλεκτροστατικού καθετήρα που παρουσιάστηκε παραπάνω, προκαλεί απόσπαση των ηλεκτρονίων των αρνητικών ιόντων στον κυλινδρικό όγκο που ακτινοβολείται. Η ευθυγράμμιση της δέσμης του laser και του καθετήρα φαίνεται στο ένθετο του Σχήματος Σχήμα 1. Η επιλογή του συγκεκριμένου laser έγινε επειδή το μήκος κύματος των 1064 nm είναι πολύ κοντά στο μέγιστο της ενεργού διατομής της αντίδρασης της φωτο-απόσπασης με ($H^- + h\nu \rightarrow H + e$, ενεργειακό κατώφλι ~0.75 eV) (Bacal, 2000). Για εκκενώσεις διαφορετικών αερίων, το υψηλότερο ενεργειακό κατώφλι της φωτο-απόσπασης (π.χ. ~1.45 eV για το οξυγόνο και ~3.16 eV για το SF_6 (Datskos et al., 1995)), θα επέβαλε και διαφορετικό μήκος κύματος για το laser. Για το οξυγόνο θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί η δεύτερη αρμονική του laser Nd:YAG (532 nm) (Dodd et al., 2010), ενώ για το SF_6 μία λύση θα ήταν το laser αζώτου (337 nm) (Ishikawa et al., 1990).



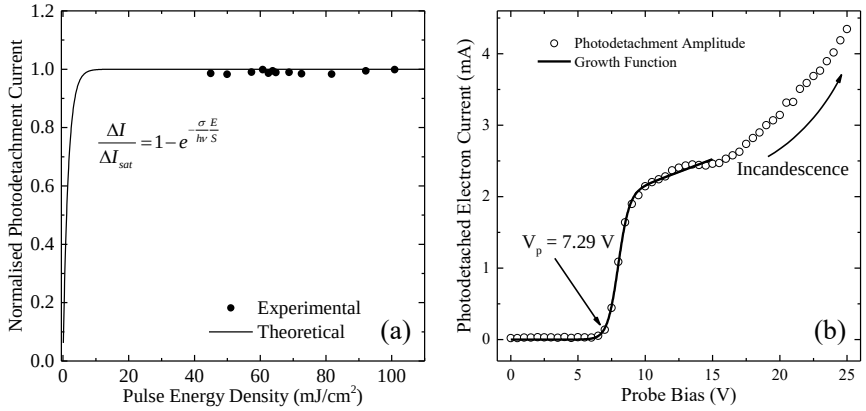
Σχήμα 4. Τυπικό σήμα φωτο-απόσπασης. Από το πλάτος του σήματος αυτού, μπορεί να καθοριστεί η πυκνότητα αρνητικών ιόντων.

Η περίσσεια ηλεκτρονίων στην περιοχή αυξάνει το ρεύμα ηλεκτρονίων που συλλέγεται από τον θετικά πολωμένο καθετήρα. Ένας τυπικός παλμός ρεύματος φωτο-απόσπασης παρουσιάζεται στο Σχήμα 4. Η πυκνότητα αρνητικών ιόντων (n_-) μπορεί να υπολογιστεί από την παρακάτω εξίσωση (Christ-Koch et al., 2009):

$$n_{-} = \frac{\Delta I_{PD}}{I_{DC}} n_e \quad (1)$$

όπου ΔI_{PD} είναι το πλάτος του σήματος φωτο-απόσπασης, I_{DC} είναι το συνεχές ρεύμα ηλεκτρονίων το οποίο συλλέγεται όταν ο καθετήρας είναι πολωμένος στο δυναμικό που χρησιμοποιείται για τη φωτο-απόσπαση και n_e είναι η πυκνότητα ηλεκτρονίων που μετριέται με τη μέθοδο των ηλεκτροστατικών καθετήρων.

Για να γίνει απόζευξη του μεταβατικού παλμού ρεύματος φωτο-απόσπασης από το συνεχές ρεύμα λόγω της συνεχούς συλλογής ηλεκτρονίων πλάσματος από τον καθετήρα, χρειάζεται ένα κύκλωμα απόζευξης. Ωστόσο, το συμβατικό κύκλωμα χωρητικής απόζευξης (Bacal, 2000) έχει κάποιους περιορισμούς που αφορούν στο εύρος ζώνης του και μπορεί να οδηγήσει σε λανθασμένες μετρήσεις πυκνότητας αρνητικών ιόντων (Bryant and Bradley, 2013). Για να αποφευχθούν τα σφάλματα αυτού του είδους, το σήμα της φωτο-απόσπασης μετριέται με έναν ευρυζωνικό μετασχηματιστή εναλλασσόμενου ρεύματος (Pearson electronics 6585) ο οποίος συνδέεται απευθείας στον παλμογράφο (LeCroy WaveSurfer 104Xs-A) (Σχήμα 2-3).



Σχήμα 5. Πλάτος του σήματος φωτο-απόσπασης συναρτήσει (a) της πυκνότητας ενέργειας της δέσμης laser και (b) του δυναμικού του καθετήρα. Η ένθετη εξίσωση στο (a) δίνει τη θεωρητική τιμή του κανονικοποιημένου πλάτους, όπου σ η ενεργός διατομή της αντίδρασης της φωτο-απόσπασης, hν η ενέργεια των φωτονίων, E η ενέργεια του παλμού και S η διατομή της δέσμης.

Για την έγκυρη εφαρμογή της τεχνικής αυτής πρέπει να γίνει κατάλληλη επιλογή των παραμέτρων της (Bacal, 2000; Christ-Koch et al., 2009; Dodd et al., 2010). Αυτές οι παράμετροι αφορούν στην ακτίνα της δέσμης laser, στην πυκνότητα ενέργειάς της, καθώς επίσης και στο δυναμικό πόλωσης του καθετήρα. Η ακτίνα της δέσμης πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την ακτίνα συλλογής του καθετήρα, η οποία καθορίζεται από την ακτίνα του καθετήρα και το πάχος της ηλεκτρονικής ζώνης θωράκισης. Η ακτίνα του καθετήρα είναι 0.125 mm ενώ το πάχος της ζώνης θωράκισης είναι της τάξης του μήκους Debye. Βάσει των μετρήσεων ηλεκτροστατικών καθετήρων, το μήκος Debye μπορεί να φτάσει τα 0.4 mm. Ωστόσο, η ακτίνα της δέσμης laser είναι 3 mm, δηλαδή σημαντικά μεγαλύτερη από την ακτίνα συλλογής.

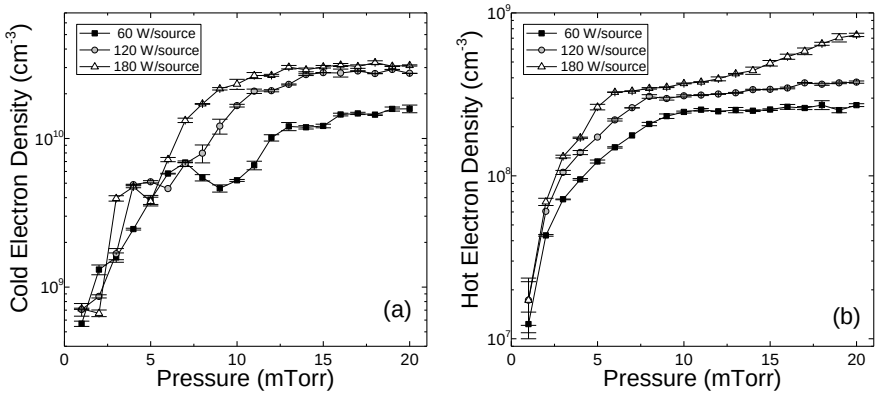
Η πυκνότητα ενέργειας της δέσμης laser θα πρέπει να είναι αρκετά υψηλή, ώστε να αποσπά τα ηλεκτρόνια από όλα τα αρνητικά ιόντα στον όγκο που ακτινοβολεί. Η πυκνότητα ενέργειας που είναι απαραίτητη μπορεί να υπολογιστεί θεωρητικά από την ενεργό διατομή της αντίδρασης της φωτο-απόσπασης (Bacal, 2000). Ωστόσο, πιο αξιόπιστη είναι η σάρωση της ενέργειας του laser ώστε να βεβαιωθεί ότι το σήμα της φωτο-απόσπασης κορεννύται. Η εξέλιξη του κανονικοποιημένου πλάτους του παλμού ως συνάρτηση της πυκνότητας ενέργειας του laser παρουσιάζεται στο Σχήμα 5a. Πυκνότητα ενέργειας περίπου ίση με 20 mJ/cm^2 είναι αρκετή για τον κορεσμό. Ωστόσο, η λειτουργία

του διαθέσιμου laser γίνεται ασταθής για πυκνότητες μικρότερες από 40 mJ/cm^2. Παρόλα αυτά, μεταβάλλοντας την πυκνότητα ενέργειας ανάμεσα στα 40 και τα 100 mJ/cm^2 επιβεβαιώνεται ότι το πλάτος του σήματος της φωτο-απόσπασης είναι κορεσμένο. Η ενέργεια η οποία επιλέχτηκε τελικά για τα πειράματα ήταν 70 mJ/cm^2.

Το κατάλληλο δυναμικό του καθετήρα είναι μεγαλύτερο από το δυναμικό πλάσματος, έτσι ώστε να συλλέγονται όλα τα φωτο-αποσπώμενα ηλεκτρόνια γύρω από τον καθετήρα. Η εξέλιξη του πλάτους του παλμού φωτο-απόσπασης ως συνάρτηση του δυναμικού πλάσματος παρουσιάζεται στο Σχήμα 5b. Εμφανώς, για πολώσεις μεγαλύτερες από το δυναμικό πλάσματος, το πλάτος του ρεύματος φωτο-απόσπασης αυξάνεται ραγδαία και κορεννύται. Ωστόσο, αν ο καθετήρας πολωθεί σε ακόμα μεγαλύτερα δυναμικά, το μεγάλο ρεύμα ηλεκτρονίων αρχίζει να ερυθροπυρώνει τον καθετήρα. Αυτό συνδέεται με μία αύξηση του ρεύματος φωτο-απόσπασης κι η λειτουργία σε αυτή την περιοχή πόλωσης θα πρέπει να αποφευχθεί. Μία σειρά από μετρήσεις όπως αυτή του Σχήμα 5b έδειξε πως ένα δυναμικό καθετήρα ίσο με +15 V είναι πάντα μεγαλύτερο από το δυναμικό πλάσματος στις παρούσες συνθήκες, χωρίς παράλληλα να οδηγεί σε ερυθροπύρωση. Έτσι, η πόλωση του καθετήρα σταθεροποιήθηκε εδώ στα +15 V για όλες τις μετρήσεις φωτο-απόσπασης.

3. Ενδεικτικά αποτελέσματα - Συμπεράσματα

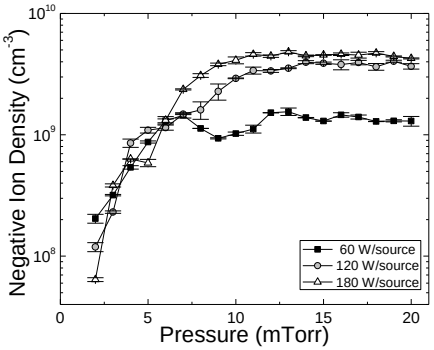
Η παραπάνω τεχνική έχει χρησιμοποιηθεί εκτεταμένα για μετρήσεις σε πλάσμα υδρογόνου στην πηγή Προμηθέας Ι. Πολλά από τα αποτελέσματα αυτά έχουν δημοσιευτεί και μπορούν να βρεθούν στην βιβλιογραφία (Aleiferis et al., 2014, 2016, 2017; Αλειφέρης, 2016). Στα Σχήματα 6(a) και 6(b) παρουσιάζονται ενδεικτικές σειρές μετρήσεων της πυκνότητας ψυχρών και θερμών ηλεκτρονίων, αντίστοιχα, στον κύριο όγκο του πλάσματος, συναρτήσει της πίεσης και με παράμετρο τη μικροκυματική ισχύ. Η πίεση είναι μία πολύ σημαντική παράμετρος των πηγών αρνητικών ιόντων. Ειδικά στην περίπτωση της εφαρμογής σε σύντηξη μαγνητικού περιορισμού, η παράμετρος αυτή υπόκειται σε αυστηρούς περιορισμούς, λόγω της άμεσης σύνδεσης της πηγής αρνητικών πάνω στον αντιδραστήρα TOKAMAK (Hemsworth et al., 2008).



Σχήμα 6. Πυκνότητες (a) ψυχρών και (b) θερμών ηλεκτρονίων συναρτήσει της πίεσης στην πηγή Προμηθέας Ι, με παράμετρο τη μικροκυματική ισχύ.

Η πυκνότητα των ηλεκτρονίων (Σχήμα 6) μεταβάλλεται σημαντικά για μικρές πιέσεις φτάνοντας τελικά σε κορεσμό, με τιμές μέχρι και ~3x10^{10} m^{-3}. Τα ψυχρά ηλεκτρόνια, τα οποία συμμετέχουν στην παραγωγή αρνητικών ιόντων, έχουν σημαντικά μεγαλύτερη πυκνότητα (περίπου δύο τάξεις μεγέθους). Η χαμηλή πυκνότητα του πληθυσμού των θερμών ηλεκτρονίων οφείλεται στο ότι τα περισσότερα από αυτά παγιδεύονται στις περιοχές ECR. Η πυκνότητα ιόντων παρουσιάζεται στο Σχήμα 7. Όπως και για την πυκνότητα των ηλεκτρονίων, η τιμή παρουσιάζει σημαντική αύξηση στην περιοχή των

χαμηλών πιέσεων και κορεσμό για μεγαλύτερες πιέσεις. Η πυκνότητα αρνητικών ιόντων φτάνει τα ~5x10^9 m^{-3}. Εμφανής στις παραπάνω μετρήσεις είναι και η επιρροή της ισχύος. Η αύξηση της ισχύος από 60 W σε 120 W διπλασιάζει περίπου και τη μέγιστη πυκνότητα των ψυχρών ηλεκτρονίων, ενώ σχεδόν τετραπλασιάζει τη μέγιστη πυκνότητα αρνητικών ιόντων. Η μετάβαση στα 180 W, δεν φαίνεται να έχει το ίδιο σημαντική επιρροή.



Σχήμα 7. Πυκνότητα αρνητικών ιόντων συναρτήσει της πίεσης στην πηγή Προμηθέας Ι, με παράμετρο τη μικροκυματική ισχύ..

Σε σχέση με τη διαγνωστική τεχνική της φωτοαπόσπασης, ένα σημαντικό συμπέρασμα αφορά στην επαναληψιμότητα των μετρήσεων. Οι τυπικές αποκλίσεις στα παραπάνω δεδομένα (error bars) υπολογίζονται από δύο σειρές μετρήσεων, οι οποίες έχουν πραγματοποιηθεί με μεγάλη χρονική διαφορά (εβδομάδων ή και μηνών), με την πηγή να λειτουργεί ενδιάμεσα σε διαφορετικές συνθήκες. Το γεγονός αυτό αναδεικνύει αφενός τη σταθερή λειτουργία της πηγής, αφετέρου την αξιοπιστία της προτεινόμενης τεχνικής με την παραπάνω πειραματική διάταξη.

Όπως σημειώθηκε παραπάνω, αν και στην παρούσα εργασία γίνεται μέτρηση μόνο της πυκνότητας των αρνητικών ιόντων, η τεχνική της φωτο-απόσπασης μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για τη μέτρηση της ταχύτητάς τους (Ivanov, 2004). Τέτοιου είδους μετρήσεις είναι απαραίτητες τόσο για τη θεμελιώδη μελέτη των εκκενώσεων ηλεκτραρνητικών αερίων, όσο και για την ανάπτυξη των τεχνολογικών τους εφαρμογών, και αποτελούν αντικείμενο μελλοντικής εργασίας.

4. Βιβλιογραφία

Αλειφέρης, Σ., *Πειραματική μελέτη της παραγωγής αρνητικών ιόντων H- από πλάσμα κυκλοτρονικού συντονισμού ηλεκτρονίων (Διδακτορική Διατριβή)*, 2016, Πανεπιστήμιο Πατρών.

Aanesland, A., Bredin, J., Chabert, P., Godyak, V., 2012. *Electron energy distribution function and plasma parameters across magnetic filters*. Appl. Phys. Lett. 100, 044102.

Aanesland, A., Meige, A., Chabert, P., 2009. *Electric propulsion using ion-ion plasmas*. J. Phys. Conf. Ser. 162, 012009.

Aleiferis, S., Laulainen, J., Svarnas, P., Tarvainen, O., Bacal, M., Béchu, S., 2017. *VUV emission spectroscopy combined with H^- density measurements in the ion source Prometheus I*. AIP Conf. Proc. 1869, 030045.

Aleiferis, S., Svarnas, P., 2014. *Automated electrostatic probe device of high resolution and accuracy*. Rev. Sci. Instrum. 85, 123504.

Aleiferis, S., Svarnas, P., Tsiroudis, I., Béchu, S., Bacal, M., Lacoste, A., 2014. *H^- Negative Ion Production From a 2D Network of ECR Dipolar Plasma Sources*. IEEE Trans. Plasma Sci. 42, 2828.

Aleiferis, S., Tarvainen, O., Svarnas, P., Bacal, M., Béchu, S., 2016. *Experimental investigation of the relation between H^- negative ion density and Lyman-α emission intensity in a microwave discharge*. J. Phys. Appl. Phys. 49, 095203.

Bacal, M., 2000. *Photodetachment diagnostic techniques for measuring negative ion densities and temperatures in plasmas*. Rev. Sci. Instrum. 71, 3981.

Bacal, M., Hamilton, G.W., 1979. *H^- and D^- Production in Plasmas*. Phys. Rev. Lett. 42, 1538.
Bacal, M., Wada, M., 2015. *Negative hydrogen ion production mechanisms*. Appl. Phys. Rev. 2, 021305.
Béchu, S., Soum-Glaude, A., Bès, A., Lacoste, A., Svarnas, P., Aleiferis, S., Ivanov, A.A., Bacal, M., 2013. *Multi-dipolar microwave plasmas and their application to negative ion production.* Phys. Plasmas 20, 101601.
Belchenko, Y., 1993. *Surface negative ion production in ion sources*. Rev. Sci. Instrum. 64, 1385.
Berger, M., Fantz, U., Christ-Koch, S., NNBI Team, 2009. *Cavity ring-down spectroscopy on a high power rf driven source for negative hydrogen ions*. Plasma Sources Sci. Technol. 18, 025004.
Bryant, P.M., Bradley, J.W., 2013. *Optimum circuit design for the detection of laser photodetachment signals*. Plasma Sources Sci. Technol. 22, 015014.
Christ-Koch, S., Fantz, U., Berger, M., NNBI Team, 2009. *Laser photodetachment on a high power, low pressure rf-driven negative hydrogen ion source*. Plasma Sources Sci. Technol. 18, 025003.
Datskos, P.G., Carter, J.G., Christophorou, L.G., 1995. *Photodetachment of $SF6^-$*. Chem. Phys. Lett. 239, 38.
Dodd, R., You, S.-D., Bryant, P.M., Bradley, J.W., 2010. *Negative ion density measurements in a reactive dc magnetron using the eclipse photodetachment method*. Plasma Sources Sci. Technol. 19, 015021.
Druyvesteyn, M.J., 1930. *Der Niedervoltbogen*. Z. Für Phys. 64, 781.
Economou, D.J., 2007. *Fundamentals and applications of ion–ion plasmas*. Appl. Surf. Sci. 253, 6672.
Godyak, V.A., Demidov, V.I., 2011. *Probe measurements of electron-energy distributions in plasmas: what can we measure and how can we achieve reliable results?* J. Phys. Appl. Phys. 44, 269501.
Hemsworth, R.S., Tanga, A., Antoni, V., 2008. *Status of the ITER neutral beam injection system (invited)*. Rev. Sci. Instrum. 79, 02C109.
Hershkowitz, N., 1989. *How Langmuir Probes Work*, in: Auciello, O., Flamm, D. (Eds.), Plasma Diagnostics: Vol 1, Discharge Parameters and Chemistry. Academic Press, San Diego, p. 113.
Hopkins, M.B., Graham, W.G., 1987. *Electron energy distribution function measurements in a magnetic multipole plasma*. J. Phys. Appl. Phys. 20, 838.
Ishikawa, I., Koike, K., Akitsu, T., Suganomata, S., Matsuzawa, H., 1990. *Detection Technique of Negative Ions by Photodetachment in SF_6 Low-Frequency Discharge*. Jpn. J. Appl. Phys. 29, 767.
Ivanov, A.A., 2004. *Two negative ion groups in volume H^- sources*. Rev. Sci. Instrum. 75, 1754.
Lacoste, A., Lagarde, T., B chu, S., Arnal, Y., Pelletier, J., 2002. *Multi-dipolar plasmas for uniform processing: physics, design and performance*. Plasma Sources Sci. Technol. 11, 407.
Mario Capitelli, Roberto Celiberto, Gianpiero Colonna, Fabrizio Esposito, Claudine Gorse, Khaled Hassouni, Annarita Laricchiuta, Savino Longo, Mario Capitelli, 2016. *Fundamental aspects of plasma chemical physics: Kinetics*, Springer, New York.
Nikitin, A.G., Balghiti, F.E., Bacal, M., 1996. *Comparison of negative ion density measurements by probes and by photodetachment.* Plasma Sources Sci. Technol. 5, 37–42.
Santoso, J., Manoharan, R., O'Byrne, S., Corr, C.S., 2015. *Negative hydrogen ion production in a helicon plasma source.* Phys. Plasmas 22, 093513.
Savitzky, A., Golay, M.J.E., 1964. *Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures.* Anal. Chem. 36, 1627.
Tsuji, H., Arai, N., Gotoh, N., Minotani, T., Ishibashi, T., Okumine, T., Adachi, K., Kotaki, H., Gotoh, Y., Ishikawa, J., 2006. *Negative-ion implantation into thin SiO_2 layer for defined nanoparticle formation*. Rev. Sci. Instrum. 77, 03A510.