

9. ΡΑΔΙΟΧΗΜΙΚΕΣ ΚΑΙ ΠΥΡΗΝΙΚΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΩΣ

9.1 Η ανάλυση με νετρονική ενεργοποίηση.

Η **ανάλυση με νετρονική ενεργοποίηση** (*neutron activation analysis, N.A.A.*) είναι μία ευαίσθητη τεχνική ποιοτικού και ποσοτικού προσδιορισμού ιχνοποσοτήτων διαφόρων στοιχείων σε γεωλογικά, περιβαλλοντικά, βιολογικά και τεχνολογικά δείγματα. Η τεχνική είναι πολυστοιχειακή και επιτρέπει τον ταυτόχρονο προσδιορισμό άνω των 20 στοιχείων.

Για την πραγματοποίηση της αναλύσεως, μία μικρή ομογενής και αντιπροσωπευτική ποσότητα (μερικά mg) του δείγματος ακτινοβολείται με νετρόνια. Κατά τη διάρκεια αυτής της ακτινοβολήσεως από τα σταθερά συστατικά του προκύπτουν, με πυρηνικές αντιδράσεις του τύπου κυρίως (n,γ), τα αντίστοιχα ραδιενεργά τους ισότοπα που ανιχνεύονται και προσδιορίζονται ποσοτικά με τη βοήθεια της ακτινοβολίας, που εκπέμπουν.

Η ακτινοβολήση του δείγματος μπορεί να πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας τα νετρόνια ενός πυρηνικού αντιδραστήρα, μίας γεννήτριας νετρονίων¹ ή μίας ισοτοπικής πηγής νετρονίων².

Στους πυρηνικούς αντιδραστήρες χρησιμοποιούνται για την

¹ Οι γεννήτριες νετρονίων είναι επιταχυντές σωματιδίων χαμηλής τάσεως στους οποίους νετρόνια παράγονται από πυρηνικές αντιδράσεις με βομβαρδισμό ενός κατάλληλου στόχου με φορτισμένα σωματίδια. Η πλέον διαδεδομένη αντίδραση είναι η ${}^3\text{H}(d,n){}^4\text{He}$, η οποία παράγει μονοενεργειακά νετρόνια ενέργειας 14 MeV. Μία τυπική πυκνότητα ροής νετρονίων μίας γεννήτριας νετρονίων είναι της τάξεως των $10^9 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

² Οι πηγές νετρονίων, που αποτελούνται από ένα α-ραδιενεργό νουκλίδιο (π.χ. ${}^{227}\text{Ac}$, ${}^{226}\text{Ra}$, ${}^{239}\text{Pu}$) αναμειγμένο με βηρύλλιο, παράγουν νετρόνια μέσω αντιδράσεων του τύπου (α,n). Ως πηγές νετρονίων χρησιμοποιούνται επίσης ορισμένα ισότοπα υπερουρανίων στοιχείων που διασπώνται με αυθόρμητη σχάση. Το γνωστότερο και πιο διαδεδομένο από αυτά είναι το ${}^{252}\text{Cf}$ ($t_{1/2} = 2.64$ χρόνια) που εκπέμπει κατά μέσον όρο 3.76 νετρόνια ενέργειας 1.5 MeV ανά σχάση. Έτσι ένα mg ${}^{252}\text{Cf}$ παράγει περίπου 2.3×10^9 νετρόνια το δευτερόλεπτο.

ακτινοβόληση κυρίως θερμικά νετρόνια λόγω της μεγάλης πυκνότητας ροής τους (10^{12} - 10^{14} νετρόνια $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$) αλλά και λόγω των υψηλών διατομών των πυρηνικών τους αντιδράσεων με τα διάφορα στοιχεία. Από την άλλη μεριά, οι γεννήτριες και οι πηγές νετρονίων παρέχουν μικρότερη ροή και υψηλότερη ενέργεια νετρονίων, πράγμα που τις καθιστά χρήσιμες για ειδικές εφαρμογές (π.χ. προσδιορισμός κυρίως ελαφρών στοιχείων).

Η μέτρηση των δειγμάτων μετά την ακτινοβόληση με νετρόνια γίνεται συνήθως με ημιαγωγικούς ανιχνευτές ακτίνων-γ, που παρουσιάζουν μεγάλη διακριτικότητα ενέργειας. Η φασματοσκοπία ακτίνων-γ επιτρέπει το σύγχρονο προσδιορισμό της συγκέντρωσης πολλών στοιχείων. Η κατάλληλη επιλογή της διάρκειας της ακτινοβόλησης καθώς επίσης της διάρκειας και του χρόνου μέτρησης είναι τις περισσότερες φορές καθοριστικής σημασίας για την αύξηση της ευαισθησίας του προσδιορισμού των συστατικών στοιχείων ενός δείγματος. Όπως φαίνεται και στην *Απεικ. 9-1*, μετά από ακτινοβόληση διάρκειας ενός χρόνου υποδιπλασιασμού του προϊόντος της αντιδράσεως σχηματίζεται το 50%, μετά από δύο το 75% και μετά από πέντε περίπου το 97% της μέγιστης ποσότητας που μπορεί να παραχθεί. Ανάλογα, μετά από ένα χρόνο υποδιπλασιασμού από το τέλος της ακτινοβόλησης διασπάται το 50% της ποσότητας που σχηματίσθηκε, μετά δύο το 75% και μετά από πέντε το 97%. Όταν το κύριο συστατικό του δείγματος έχει ως προϊόν ένα βραχύβιο ραδιονουκλίδιο, τότε είναι σκόπιμο το δείγμα να ακτινοβολείται για μακρύτερο χρονικό διάστημα και η μέτρηση του να πραγματοποιείται αφού αφεθεί για κάποιο διάστημα για να διασπασθεί. Αν πάλι το κύριο συστατικό του δείγματος έχει ως προϊόν ένα μακρόβιο ραδιονουκλίδιο, τότε είναι σκόπιμο η ακτινοβόληση να είναι σύντομη και η μέτρηση του να γίνεται αμέσως μετά την ακτινοβόληση.

Πολλές φορές, λόγω ισχυρής αλληλεπικάλυψης των ακτίνων-γ που εκπέμπονται από ένα ισότοπο ενός στοιχείου ή λόγω της παρουσίας πολύ μεγαλύτερων ποσοτήτων ενός στοιχείου που παρεμποδίζει τον προσδιορισμό κάποιου άλλου, είναι απαραίτητη η χημική επεξεργασία του ακτινοβολημένου δείγματος πριν τη μέτρηση. Κατά την επεξεργασία αυτή διαχωρίζονται, με διάφορες διεργασίες, τα στοιχεία που παρουσιάζουν ενδιαφέρον από αυτά τα οποία παρεμποδίζουν τον προσδιορισμό. Η τεχνική αυτή αναλύσεως ονομάζεται **ραδιοχημική ανάλυση με νετρονική**

ενεργοποίηση (*Radiochemical Neutron Activation Analysis, R.N.A.A.*) σε αντίθεση με αυτή που δεν προϋποθέτει χημική επεξεργασία του ακτινοβολημένου δείγματος που χαρακτηρίζεται ως **ενόργανος ανάλυση με νετρονική ενεργοποίηση** (*Instrumental Neutron activation Analysis, I.N.A.A.*). Η απόδοση του διαχωρισμού είναι απαραίτητο να προσδιορισθεί με ακρίβεια χρησιμοποιώντας συνήθως ισοτοπικούς δείκτες.

Η ποσοτικοποίηση των αποτελεσμάτων πραγματοποιείται με τη βοήθεια της κλασικής σχέσεως της πυρηνικής ενεργοποίησης, που δίνει το ρυθμό διασπάσεως ενός ραδιενεργού προϊόντος μίας πυρηνικής αντιδράσεως στο τέλος της ακτινοβολήσεως σχηματισμού του

$$A = \sigma \Phi N(1 - e^{-\lambda t})$$

Στη σχέση αυτή με τα σ , N και Φ δίνεται η ενεργός διατομή της αντίδρασης, ο αριθμός των στόχων πυρήνων στο δείγμα που είναι και το ζητούμενο μέγεθος και η πυκνότητα ροής των νετρονίων σε νετρόνια ανά cm^2 και δευτερόλεπτο. Το λ και το t παριστάνουν αντίστοιχα τη σταθερά διασπάσεως του ραδιενεργού προϊόντος της ενεργοποίησης και τη διάρκεια της ακτινοβολήσεως. Αν η μέτρηση του δείγματος δεν πραγματοποιηθεί αμέσως μετά το πέρας της ακτινοβολήσεως τότε πρέπει στην παραπάνω σχέση να ληφθεί υπόψη και ο χρόνος διασπάσεως των προϊόντων της ενεργοποίησης χρησιμοποιώντας τον παράγοντα $e^{-\lambda t'}$ (t' : ο χρόνος μεταξύ του τέλους της ακτινοβολήσεως και της μέτρησης).

Για την αποφυγή των πηγών σφαλμάτων που προέρχονται από τη μη ακριβή γνώση της ενεργειακής κατανομής των νετρονίων στο σημείο ακτινοβολήσεως εντός του αντιδραστήρα χρησιμοποιούνται συνήθως μονο- ή πολυστοιχειακά πρότυπα υλικά που ακτινοβολούνται με νετρόνια συγχρόνως με το δείγμα. Στην περίπτωση αυτή, η συγκέντρωση των πυρήνων του προσδιοριστέου στοιχείου στο δείγμα, $N_{\text{δείγμα}}$, μπορεί να υπολογισθεί από το ρυθμό των διασπάσεως του προϊόντος της ενεργοποίησης του στο άγνωστο και στο πρότυπο δείγμα, $A_{\text{δείγμα}}$ και $A_{\text{πρότ.}}$, τον αριθμό των πυρήνων του στοιχείου στο πρότυπο, $N_{\text{πρότ.}}$ και το χρόνο μέτρησης του δείγματος και του προτύπου μετά το τέλος της ακτινοβολήσεως

$$N_{\text{δείγμα}} = N_{\text{πρότ.}} \frac{A_{\text{δείγμα}}}{A_{\text{πρότ.}}} \frac{e^{-\lambda t'_{\text{πρότ.}}}}{e^{-\lambda t'_{\text{δείγμα}}}}$$

Στον Πίνακα 9-1 δίνονται τα όρια ανιχνεύσεως διαφόρων στοιχείων με ενόργανη ανάλυση με νετρονική ενεργοποίηση χρησιμοποιώντας ακτινοβολήση διάρκειας 1 ώρας με 10^{14} νετρόνια/cm² s. Στον υπολογισμό θεωρήθηκε ότι ρυθμός διασπάσεως 10 s^{-1} επιτρέπει τον ποσοτικό προσδιορισμό.

Ο προσδιορισμός ελαφρών στοιχείων (π.χ. H, Li, Be, B, C, N, O) δεν είναι δυνατός με ενεργοποίηση με θερμικά νετρόνια. Τα στοιχεία αυτά προσδιορίζονται πολύ καλύτερα με ενεργοποίηση με φορτισμένα σωματίδια ή με φωτόνια.

Παρά την συνεχώς αυξανόμενη εφαρμογή νέων αναλυτικών τεχνικών όπως η ICP-MS η ανάλυση με νετρονική ενεργοποίηση παραμένει ακόμα ανταγωνιστική και απαραίτητη για την επίλυση πολλών χημικών και τεχνολογικών προβλημάτων.

Πίνακας 9-1: Όρια ανιχνεύσεως διαφόρων στοιχείων με ενόργανη ανάλυση με νετρονική ενεργοποίηση χρησιμοποιώντας ακτινοβολήση διάρκειας 1 ώρας με 10^{14} νετρόνια/cm² s.

Συγκέντρωση (g/g)	Στοιχεία
10^{-14} - 10^{-13}	Dy
10^{-13} - 10^{-12}	Co, Rh, Ag, In, Eu, Ir
10^{-11} - 10^{-10}	V, Mn, Se, Br, I, Pr, Er, Yb, Hf, Th
10^{-10} - 10^{-9}	Mg, Al, Cl, Ar, Cu, Ga, Nb, Cs, Sm, Ho, Lu, Re, Au, U
10^{-9} - 10^{-8}	F, Na, Ge, As, Kr, Rb, Sr, Mo, Ru, Pd, Sb, Te, Ba, La, Nd, Gd, W, Os, Hg, Tl

$10^{-8} - 10^{-7}$	P, Cr, Zn, Ce
$10^{-7} - 10^{-6}$	S, Zr, Pb, Bi
$10^{-6} - 10^{-5}$	O, Ca

9.2 Η ανάλυση με δέσμες ιόντων.

Οι χαμηλής ενέργειας ηλεκτροστατικοί επιταχυντές εύρισκαν αρχικά εφαρμογές αποκλειστικά στην πυρηνική φυσική. Καθώς όμως οι απαιτήσεις των πυρηνικών φυσικών για σωματίδια υψηλότερης ενέργειας γίνονταν όλο και μεγαλύτερες, η χρήση τους περιορίστηκε σημαντικά. Η διαθεσιμότητα αυτών των επιταχυντικών διατάξεων, αφυπνίζοντας το ενδιαφέρον των φυσικών στερεάς κατάστασης και των επιστημόνων υλικών, υπήρξε η αφετηρία ανάπτυξης μίας σειράς αναλυτικών τεχνικών, που φέρουν το γενικό όνομα **ανάλυση με δέσμες ιόντων** (*ion beam analysis, IBA*).

Γενικά μπορεί να λεχθεί, ότι όταν η επιφάνεια ενός στερεού βομβαρδίζεται με σωματίδια υψηλής ενέργειας από έναν επιταχυντή σωματιδίων, λαμβάνουν χώρα διάφορες αλληλεπιδράσεις. Οι πιο ενδιαφέρουσες από αυτές, που είναι οι πυρηνικές αντιδράσεις, οι σκεδασμοί και η εκπομπή ακτίνων-Χ και γ , μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ταυτοποίηση των συστατικών στοιχείων του στερεού και την εύρεση της σε βάθος κατανομής τους στις επιφανειακές στοιβάδες του. Οι κυριότερες τεχνικές που αναπτύχθηκαν πάνω σ' αυτή τη βάση, είναι η **ανάλυση με επαγόμενη από πρωτόνια εκπομπή ακτίνων-Χ** (*Proton-Induced X-ray Emission, PIXE*), η ανάλυση με σκέδαση ιόντων και ιδιαίτερα η **ανάλυση με οπισθοσκέδαση Rutherford** (*Rutherford Backscattering Spectroscopy, RBS*) και η **ανάλυση με πυρηνικές αντιδράσεις** (*Nuclear Reaction Analysis, NRA*). Στον Πίνακα 9-2 παρουσιάζονται συνοπτικά τα κύρια χαρακτηριστικά των τριών αυτών τεχνικών.

Οι τεχνικές αναλύσεως με δέσμες ιόντων, που είναι ιδιαίτερα ευαίσθητες και εκλεκτικές, επιτρέπουν τον προσδιορισμό της κατανομής

των διαφόρων στοιχείων σε επιφανειακά στρώματα υλικών πάχους μέχρι μερικών μm και μπορούν να θεωρηθούν συμπληρωματικές των τεχνικών επιφανειακής ανάλυσης (π.χ. φασματοσκοπία ηλεκτρονίων Auger (AES), φωτοηλεκτρονική φασματοσκοπία ακτίνων-X (XPS) , φασματοσκοπία μαζών δευτερογενών ιόντων (SIMS)) και αυτών της κλασικής χημικής ανάλυσης.

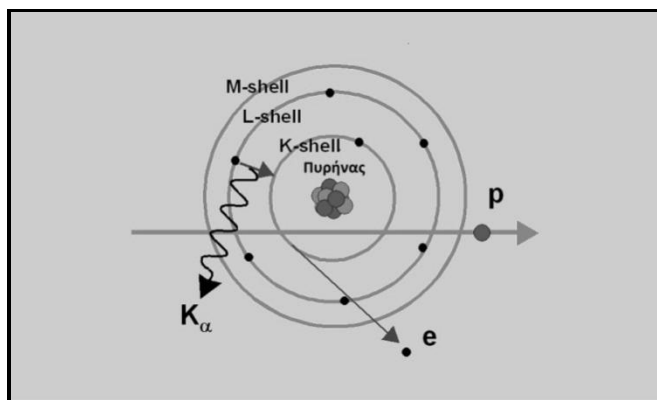
Πίνακας 9-2: Οι κυριώτερες τεχνικές ανάλυσης με δέσμες ιόντων.

Τεχνική	Σωματίδια	Εκπεμπόμενη ακτινοβολία	Δυνατότητες
Proton-induced X-ray emission (PIXE)	Πρωτόνια (E: περ. 3 MeV)	Ακτίνες-X	Ποσοτική στοιχειακή ανάλυση (περιοχή ppm), μεγάλη διακριτική ικανότητα, προσδιορισμός επιφανειακής κατανομής (mapping)
Rutherford Backscattering Spectroscopy (RBS)	Φορτισμένα σωματίδια (π.χ. $^1_1\text{H}^+$, $^4_2\text{He}^{2+}$, $^{12}_6\text{C}^{3+}$) (E: μερικά MeV)	Σκεδασμένα σωματίδια	Ποσοτική χημική ανάλυση (ευαισθησία περ. 0.1 at.%), προσδιορισμός της κατά βάθος κατανομής (depth profiling) – Διακριτική ικανότητα περ. 10 nm
Nuclear Reaction Analysis (NRA)	Φορτισμένα σωματίδια (π.χ. $^1_1\text{H}^+$, $^2_1\text{H}^+$, $^4_2\text{He}^{2+}$) (E: μέχρι μερικά MeV)	Προϊόντα της πυρηνικής αντίδρασης (σωματίδια ή ακτίνες-γ).	Ποσοτική ανάλυση ελαφρών στοιχείων (ευαισθησία περ. 0.1 at.%), προσδιορισμός της κατά βάθος κατανομής (depth profiling) – Διακριτική ικανότητα περ. 20 nm

9.2.1 Η ανάλυση με επαγόμενη από πρωτόνια εκπομπή ακτίνων-X

Η τεχνική αυτή, που αναφέρεται στην πράξη ως P.I.X.E. (*Proton-Induced X-ray emission*), είναι η πλέον χρησιμοποιούμενη μέθοδος μελέτης αντικειμένων τέχνης και πολιτισμικής κληρονομιάς καθώς επίσης γεωλογικών, περιβαλλοντικών και βιολογικών δειγμάτων.

Πρωτόνια υψηλής ενέργειας, που προσπίπτουν σ' ένα δείγμα, μπορούν να απομακρύνουν ηλεκτρόνια των εσωτερικών στοιβάδων των συστατικών του. Όταν οι κενές θέσεις των ηλεκτρονίων, που προέκυψαν κατ' αυτόν τον τρόπο, πληρωθούν με ηλεκτρόνια ανωτέρων στοιβάδων, τότε εκπέμπονται ακτίνες-Χ με ενέργειες χαρακτηριστικές των συστατικών του δείγματος (Απεικ. 9-2).



Απεικ. 9-2: Σχηματική παράσταση της επαγόμενης από πρωτόνια εκπομπής ακτίνων-Χ.

Οι ακτίνες-Χ, που εκπέμπονται μετριοούνται με τη βοήθεια ενός ημιαγωγικού ανιχνευτή (π.χ. Si(Li) ή HPGe).

9.2.2 Η φασματοσκοπία οπισθοσκέδασης Rutherford (RBS) και η ανάλυση με ανίχνευση ανακρουομένων πυρήνων (ERDA)

Η φασματοσκοπία οπισθοσκέδασης Rutherford (Rutherford

backscattering spectroscopy, RBS) είναι μια από τις πιο ισχυρές τεχνικές για τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης και της σε βάθος κατανομής διαφόρων στοιχείων σε επιφανειακές στοιβάδες υλικών.

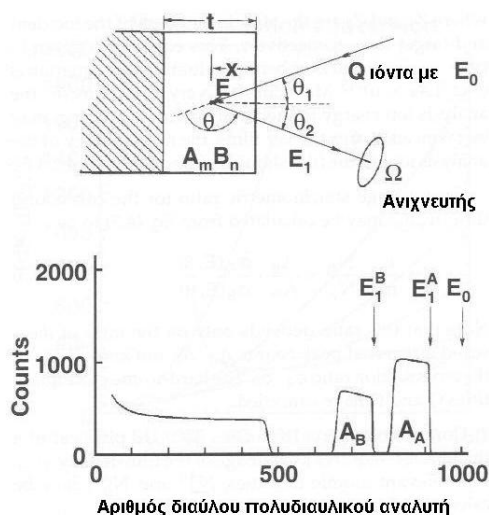
Η εφαρμογή της τεχνικής για την ανάλυση ενός ιδανικού ομογενούς λεπτού υμενίου με δύο συστατικά, που εναποτέθηκε επάνω σ' ένα υπόστρωμα χαμηλού ατομικού αριθμού Z δίνεται στην *Απεικ. 9-4*. Μία δέσμη ιόντων με αρχική ενέργεια E_0 προσπίπτει στο δείγμα υπό γωνία ϑ_1 . Τα φορτισμένα σωματίδια (ιόντα), που βομβαρδίζουν το δείγμα, χάνουν ενέργεια διεισδύοντας στο υλικό και σε βάθος x σκεδάζονται από τα συστατικά του. Τα σκεδαζόμενα σωματίδια ανιχνεύονται από ανιχνευτή ακτινοβολίας (ημιαγωγικό σωματιδιακό ανιχνευτή) τοποθετημένο σε γωνία ϑ ως προς την αρχική κατεύθυνση της δέσμης των ιόντων που βλέπει το στόχο υπό στερεά γωνία Ω . Το σήμα του ανιχνευτή οδηγείται, μετά από επεξεργασία και ενίσχυση, σε σύστημα μετρήσεως ακτινοβολίας και καταγράφεται η ενεργειακή κατανομή των σκεδαζόμενων σωματιδίων με τη μορφή ενός φάσματος. Η *Απεικ. 9-4* δείχνει δύο κορυφές με σχεδόν επίπεδο άνω τμήμα που αντιστοιχούν στα συστατικά της ένωσης A_mB_n .

Το πλάτος των κορυφών προκαλείται από την απώλεια των σωματιδίων στο στόχο. Η φαρδεια κορυφή σε χαμηλές ενέργειες (αριθμούς διαύλου) προέρχεται από το ελαφρού Z υπόστρωμα του λεπτού υμενίου.

Η αναγνώριση των συστατικών στοιχείων του υμενίου γίνεται με τη βοήθεια του **κινηματικού παράγοντα K** χρησιμοποιώντας την αρχική ενέργεια των σωματιδίων E_0 και την ενέργεια E_1 της υψηλοενεργειακής πλευράς των κορυφών των επιμέρους στοιχείων

$$K = \frac{E_1}{E_0} = \left[\frac{(M_2^2 - M_1^2 \sin^2 \theta)^{1/2} + M_1 \cos \theta}{M_1 + M_2} \right]^2$$

όπου θ η γωνία σκεδάσεως, M_1 και M_2 οι μάζες των σκεδαζόμενων



Απεικ. 9-4: Η βασική γεωμετρία και ένα φάσμα ενός ομογενούς διστοιχειακού λεπτού υμενίου που ελήφθη με φασματοσκοπία οπισθοσκέδασης Rutherford.

σωματιδίων και των σκεδαστών. Ο υπολογισμός του M_2 οδηγεί στην αναγνώριση των συστατικών του στόχου. Η παραπάνω εξίσωση μπορεί να εξηγήσει την προτίμηση της ανίχνευσης των σκεδαζόμενων σωματιδίων σε μεγάλες γωνίες.

Η ανάλυση των φασμάτων οπισθοσκέδασης πραγματοποιείται με τεχνικές προσομοίωσης χωρίζοντας την επιφανειακή περιοχή του δείγματος σε στοιβάδες διαφόρου στοιχειακής σύστασης. Γενικά, μπορεί λεχθεί ότι η φασματοσκοπία οπισθοσκέδασης Rutherford είναι μια ιδιαίτερα κατάλληλη τεχνική για τον προσδιορισμό και την εύρεση της κατανομής σχετικά βαρέων στοιχείων σε ελαφρές μήτρες. Για τον προσδιορισμό και την εύρεση της κατανομής ελαφρών στοιχείων σε βαρύτερες μήτρες χρησιμοποιείται μία εναλλακτική τεχνική, που ονομάζεται **ανάλυση με ανίχνευση ανακρουομένων πυρήνων** (*Elastic Recoil Detection Analysis, ERDA*).

9.2.3 Η ανάλυση με πυρηνικές αντιδράσεις

9.2.4 Η ανάλυση με ενεργοποίηση με φορτισμένα σωματίδια

Παρ' όλον ότι οι δυνατότητες της **ανάλυσης με ενεργοποίησης με φορτισμένα σωματίδια** (*Charged Particle Activation Analysis, C.P.A.A.*) αναγνωρίστηκαν ήδη από το 1938³, η τεχνική αυτή χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό ελαφρών στοιχείων μόνο μετά πάροδο είκοσι ετών⁴. Οι λόγοι αυτής της καθυστερημένης εφαρμογής ήταν η σπανιότητα των επιταχυντών σωματιδίων, η πολυπλοκότητα και το κόστος του εξοπλισμού καθώς επίσης η θεαματική ανάπτυξη και ευαισθησία της ανάλυσης με νετρονική ενεργοποίηση. Ακόμη και σήμερα, μόνο λίγα εργαστήρια στον κόσμο εφαρμόζουν αυτή την τεχνική.

Η ανάλυση με ενεργοποίηση με φορτισμένα σωματίδια δεν μπορεί να θεωρηθεί μη καταστροφική ούτε πολυστοιχειακή αναλυτική τεχνική. Ενώ ο σύγχρονος προσδιορισμός περισσότερων των δέκα στοιχείων με ανάλυση με νετρονική ενεργοποίηση αποτελεί πλέον κανόνα, ο ποσοτικός προσδιορισμός περισσότερων των πέντε στοιχείων με ανάλυση με ενεργοποίηση με φορτισμένα σωματίδια είναι σπάνιος. Ενώ στην ανάλυση με νετρονική ενεργοποίηση αντιδράσεις του τύπου (n,γ) οδηγούν σε σύγχρονη ενεργοποίηση μίας πληθώρας στοιχείων, η ανάλυση με ενεργοποίηση με φορτισμένα σωματίδια απαιτεί την επιλογή των πυρηνικών αντιδράσεων και της ενέργειας σωματιδίων για την ενεργοποίηση συγκεκριμένων στοιχείων. Το μεγάλο πλεονέκτημα, που προσφέρει αυτή η τεχνική είναι η δυνατότητα ποσοτικού προσδιορισμού ελαφρών κυρίως στοιχείων, που δεν είναι δυνατόν να προσδιορισθούν εύκολα με άλλες αναλυτικές τεχνικές.

Αν η πυρηνική αντίδραση είναι ενεργειακά δυνατή, τότε το προϊόν της

³ G.T. Seaborg and J.J. Livingood, Artificial radioactivity as a test for minute traces of elements, J. Am. Chem. Soc. 60(1938)1784

⁴ R.A. Gill, *Proton Activation Analysis in the Determination of Submicrogram Amounts of Boron in Silicon*, AERE Report C/R 2758 (1958)

Ph. Albert, *L'Analyse par Radioactivation*, Proc. of the Intern. Conf. on Modern Trends in Activation Analysis, Texas A&M University (College Station, TX, USA), 1961, p. 78.

μπορεί να προκύψει είτε μέσω σχηματισμού ενός σύνθετου πυρήνα είτε μέσω μίας άμεσης αλληλεπίδρασης. Η ενεργότητα του προϊόντος της αντίδρασης στο τέλος της ακτινοβόλησης σχηματισμού του μπορεί να υπολογισθεί, όπως και στην περίπτωση της ανάλυσης με νετρονική ενεργοποίηση, χρησιμοποιώντας τη κλασική σχέση

$$A = \sigma \Phi N(1 - e^{-\lambda t})$$

Στη σχέση αυτή, ως γνωστό, σ , N και Φ είναι η ενεργός διατομή της αντίδρασης για δεδομένη ενέργεια σωματιδίων, ο αριθμός των στόχων πυρήνων και η πυκνότητα ροής των βλημάτων σωματιδίων.

Για την πραγματοποίηση αναλύσεων με ενεργοποίηση με φορτισμένα σωματίδια χρησιμοποιούνται συνήθως ηλεκτροστατικοί επιταχυντές του τύπου van de Graaff με τερματική τάση της τάξεως των 7 MV. Για την ενεργοποίηση απαιτείται επίσης ένας θάλαμος ακτινοβολήσεως υπό κενό και ένα συστημα μετρήσεων, που η επιλογή του εξαρτάται από τον τύπο των αντιδράσεων, που χρησιμοποιούνται. Επειδή τα περισσότερα προϊόντα της ενεργοποίησης ελαφρών στοιχείων (Πίνακας 9-2) διασπώνται με β^+ -διάσπαση και ο προσδιορισμός τους πραγματοποιείται με τη μέτρηση της ακτινοβολίας εξαϋλώσεως, κρύσταλλοι NaI(Tl) μεγάλου όγκου είναι το πλέον χρησιμοποιούμενο είδος ανιχνευτών για τέτοιου είδους μετρήσεις.

Πίνακας 9-2: Μερικές πυρηνικές αντιδράσεις που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό ελαφρών στοιχείων με ανάλυση με ενεργοποίηση με φορτισμένα σωματίδια⁵.

Στοιχείο	Αντίδραση	$t_{1/2}$ προϊόντος	Ακτινοβολία προϊόντος
B	$^{11}\text{B}(p,n)^{11}\text{C}$	20.3 min	β^+
	$^{10}\text{B}(p,\alpha)^7\text{Be}$	53.4 ημ.	β^+ , γ
	$^{10}\text{B}(d,n)^{11}\text{C}$	20.3 min	β^+
	$^{10}\text{B}(d,\alpha n)^7\text{Be}$	53.4 ημ.	β^+ , γ

⁵ Από P. Misaelides, *Quantitative determination of light elements in semiconductor*

	$^{10}\text{B}(^3\text{He,d/pn})^{11}\text{C}$	20.3 min	β^+
	$^{11}\text{B}(^3\text{He,t})^{11}\text{C}$	20.3 min	β^+
	$^{11}\text{B}(^3\text{He,n})^{13}\text{N}$	9.96 min	β^+
C	$^{12}\text{C}(d,n)^{13}\text{N}$	9.96 min	β^+
	$^{12}\text{C}(^3\text{He},\alpha)^{11}\text{C}$	20.3 min	β^+
	$^{12}\text{C}(^3\text{He,d})^{13}\text{N}$	9.96 min	β^+
N	$^{14}\text{N}(d,n)^{11}\text{C}$	20.3 min	β^+
	$^{14}\text{N}(^3\text{He,d})^{15}\text{O}$	124 s	β^+
	$^{14}\text{N}(^3\text{He},\alpha)^{13}\text{N}$	9.96 min	β^+
O	$^{16}\text{O}(p,\alpha)^{13}\text{N}$	9.96 min	β^+
	$^{16,3}\text{He,p})^{18}\text{F}$	109.6 min	β^+
	$^{16}\text{O}(^3\text{He,n})^{18}\text{Ne} \rightarrow ^{18}\text{F}$	109.6 min	β^+
F	$^{19}\text{F}(^3\text{He},\alpha)^{18}\text{F}$	109.6 min	β^+
Si	$28\text{Si}(^3\text{He,p})^{30}\text{P}$	2.5 min	β^+
	$^{28}\text{Si}(^3\text{He,n})^{30}\text{S} \rightarrow ^{30}\text{P}$	2.5 min	β^+
P	$^{31}\text{P}(\alpha,n)^{34\text{m}}\text{Cl} \rightarrow ^{34}\text{Cl} \rightarrow ^{34}\text{S}$	32 min	I.M.
S	$^{32}\text{S}(^3\text{He,p})^{34\text{m}}\text{Cl} \rightarrow ^{34}\text{Cl} \rightarrow ^{34}\text{S}$	32 min	I.M.
	$^{34}\text{S}(p,n)^{34\text{m}}\text{Cl} \rightarrow ^{34}\text{Cl} \rightarrow ^{34}\text{S}$	32 min	I.M.

Τα όρια ανιχνεύσεως, που φυσικά εξαρτώνται από το υλικό και από την ενεργό διατομή της αντίδρασης, μπορούν να φθάσουν τα λίγα ng/g.