

Κωνσταντίνος
Χαριτίδης

Νανοδομές Νανοϋλικά



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΕΣ ΕΚΔΟΣΕΙΣ Ε.Μ.Π.

Κωνσταντίνος Α. Χαριτίδης
Νανοδομές-Νανοϋλικά

Copyright © 2018 Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π.

Γλωσσική επιμέλεια

Ελένη Γιαννακοπούλου, *Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π.*

Σελιδοποίηση, σχεδιασμός σχημάτων

Στέλλα Μπορουτζή, Άννα Τσαχουρίδου, *Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π.*

Εξώφυλλο

Άννα Τσαχουρίδου, *Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π.*



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΕΣ ΕΚΔΟΣΕΙΣ Ε.Μ.Π.

Θωμαΐδειο Κτήριο Εκδόσεων

Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 157 80 Ζωγράφου

Τηλ.: 210 772 2578, fax: 210 772 1127

www.ntua.gr/ntuapress

ISBN 978-960-254-705-2

Περιεχόμενα

Πρόλογος	9
1 Εισαγωγή	11
Αναφορές	25
2 Βασικές Αρχές	29
2.1 Μέγεθος, Κλίμακα & Μονάδες.....	29
2.2 Φαινόμενα Νανοκλίμακας	43
2.3 Επιφάνειες, ενδοεπιφάνειες	60
Αναφορές	70
3 Ιδιότητες & Κατηγορίες Νανοϋλικών	73
A. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΝΑΝΟΎΛΙΚΩΝ	73
3.1 Οπτικές ιδιότητες.....	73
3.2 Μηχανικές / Τριβολογικές ιδιότητες	86
3.3 Εξάρτηση των ιδιοτήτων από το μέγεθος.....	105
B. ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΝΑΝΟΎΛΙΚΩΝ	106
3.4 Νανοδομές μηδενικών διαστάσεων: Νανοσωματίδια	106
3.5 Μονοδιάστατες νανοδομές: Νανοκαλώδια	117
3.6 Δισδιάστατες νανοδομές: Λεπτά υμένια	125
3.7 Φουλερένια (Ο φουλερίτης C_{60} και τα παράγωγα φουλερένια).....	135
3.8 Νανοσωλήνες άνθρακα.....	151
Αναφορές	164

4 Μέθοδοι Χαρακτηρισμού Νανοϋλικών	173
4.1 Μικροσκοπία	173
4.2 Σαρωτική Μικροσκοπία Ανίχνευσης (Scanning Probe Microscopy-SPM) / Σαρωτική Μικροσκοπία Σήραγγας(Scanning Tunneling Microscopy-STM)	192
4.3 Μικροσκοπία Ατομικών Δυνάμεων (Atomic Force Microscopy-AFM)	198
4.4 Μικροσκοπία Μαγνητικών Δυνάμεων (Magnetic Force Microscopy-MFM)	204
4.5 Περίθλαση Ηλεκτρονίων Χαμηλής Ενέργειας (Low energy electron diffraction-LEED)	220
4.6 Φασματοσκοπία Απωλειών Ενέργειας (Electron Energy Loss Spectroscopy - EELS).	230
4.7 Φασματοσκοπία Θερμικής Αποκόλλησης (Thermal Desorption Spectroscopy - TDS)	231
4.8 Φασματοσκοπία Raman	236
4.9 Ελλειψομετρία	239
4.10 Νανοδιείσδυση (Nanoindentation) Επιφανειών & Λεπτών Υμενίων	254
Αναφορές	274
5 Τεχνικές Σύνθεσης Νανοϋλικών	281
5.1 Τεχνική της κολλοειδούς γέλης (Sol-Gel).....	281
5.2 Τεχνικές Μικροκατεργασίας.....	299
5.3 Τεχνικές κατεργασίας μικροδομών (1 μm-1mm).....	311
5.4 Τεχνικές Χημικής Εναπόθεσης Ατμών.....	322
Αναφορές	363
6 Κοινωνικές Επιπτώσεις της Νανοτεχνολογίας	369
6.1 Βιολογικές/τοξικολογικές μελέτες των νανοϋλικών	369
6.2 Βασική και εφαρμοσμένη έρευνα	380
6.3 Η ανάγκη της διεπιστημονικότητας.....	381
6.4 Η αγορά της νανοτεχνολογίας.....	383
6.5 Το σημερινό επίπεδο της τεχνικής	389
6.6 Τοξικολογία των νανοϋλικών.....	394
Αναφορές	420

Πρόλογος

Η Νανοτεχνολογία είναι μια σχετικά νέα επιστημονική περιοχή που σχετίζεται με την κατανόηση και την άρτια γνώση των ιδιοτήτων της ύλης στη νανοκλίμακα: ένα νανόμετρο (ένα δισεκατομμυριοστό του μέτρου) είναι το μήκος ενός μικρού μορίου. Στο επίπεδο αυτό αποκαλύπτονται διαφορετικές και συχνά καταπληκτικές ιδιότητες της ύλης και είναι δυσδιάκριτα τα όρια μεταξύ των καθιερωμένων επιστημών και τεχνικών κλάδων. Ως εκ τούτου, ο χαρακτήρας της νανοτεχνολογίας είναι άκρως διεπιστημονικός.

Στο παρόν σύγγραμμα «Νανοδομές και Νανοϋλικά» έγινε προσπάθεια να παρουσιαστούν οργανωμένα και μεθοδικά οι βασικές αρχές της Νανοτεχνολογίας και των Νανοεπιστημών. Απευθύνεται σε φοιτητές και νέους ερευνητές που επιθυμούν να κατανοήσουν τη συμπεριφορά της ύλης στη νανοκλίμακα με βάση θεμελιώδεις αρχές και νόμους.

Το Κεφάλαιο 1 αποτελεί μια εισαγωγή στη Νανοτεχνολογία και τα Νανοϋλικά. Παρατίθενται οι αντίστοιχοι ορισμοί, παρουσιάζονται οι σημαντικότεροι σταθμοί στην εξέλιξη της Νανοτεχνολογίας και τονίζεται ο διεπιστημονικός χαρακτήρας της.

Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται οι βασικές αρχές της Νανοτεχνολογίας, καθώς και τα φαινόμενα που διέπουν τη νανοκλίμακα.

Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται οι βασικές ιδιότητες των νανοϋλικών και η εξάρτησή τους από το μέγεθος αυτών. Αναλύονται οι γενικές κατηγορίες των νανοϋλικών, με έμφαση στη σύνθεση, τις ιδιότητες και τις εφαρμογές τους, καθώς και κάποιες ειδικές κατηγορίες νανοϋλικών.

Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται οι μέθοδοι χαρακτηρισμού νανοϋλικών, ενώ στο Κεφάλαιο 5 οι τεχνικές σύνθεσης νανοϋλικών.

Τέλος, στο Κεφάλαιο 6 αναλύονται οι κοινωνικές επιπτώσεις των Νανοτεχνολογιών και Νανοεπιστημών, με ιδιαίτερη έμφαση στην τοξικολογία των νανοϋλικών.

Ήδη αρκετά προϊόντα με βάση τη νανοτεχνολογία έχουν αρχίσει να εισχωρούν στην αγορά: η σημερινή αξία τους ανέρχεται στα 91 δις \$ στις Η.Π.Α. και στα 254 δις \$ παγκοσμίως. Παρατηρείται μάλιστα η τάση τόσο τα προϊόντα της νανοτεχνολογίας όσο και όσοι εργάζονται στον τομέα αυτό να διπλασιάζονται κάθε 3 χρόνια. Εκτιμάται ότι το 2020 η αξία των προϊόντων νανοτεχνολογίας θα φτάσει τα 3 τρις \$ και οι εργαζόμενοι τα 6 εκατομμύρια.

Επιπρόσθετα, η Έρευνα & Ανάπτυξη στον τομέα της Νανοτεχνολογίας αποτελεί κοινωνικοοικονομικό στόχο στις αναπτυσσόμενες χώρες και σε πολλές ανεπτυγμένες και ήδη είναι ένας τομέας έντονης διεθνούς συνεργασίας αλλά και ανταγωνισμού.

Την επόμενη δεκαετία θα δοθεί έμφαση σε περιοχές όπως:

- Η ολοκλήρωση της γνώσης στη νανοκλίμακα και των συστατικών των νανοσυστημάτων με πολύπλοκη συμπεριφορά, συμβάλλοντας στη δημιουργία νέων προϊόντων.

- Ο καλύτερος έλεγχος της μοριακής αυτοοργάνωσης, της κβαντικής συμπεριφοράς, της δημιουργίας νέων μορίων και της αλληλεπίδρασης των νανοδομών με εξωτερικά πεδία, με σκοπό την κατασκευή υλικών, συσκευών και συστημάτων μέσω προσομοιώσεων και υπολογιστικού σχεδιασμού.

- Η κατανόηση των βιολογικών διεργασιών και των νανο-βιοδιεπιφανειών με αβιοτικά υλικά και των βιοϊατρικών εφαρμογών τους.

- Η ενίσχυση της καινοτομίας και των συνεργασιών ιδιωτικών και δημόσιων φορέων, η ασφάλεια των νανοτεχνολογιών και των εφαρμογών τους με έμφαση στην καλύτερη επικοινωνία με την κοινωνία, στο συντονισμό των ερευνητικών προσπαθειών και των κανονισμών για ασφαλέστερη νανοτεχνολογία (νομικά και ηθικά ζητήματα, κοινωνικές και περιβαλλοντικές επιπτώσεις, ζητήματα ασφάλειας).

Γενικά, προβλέπεται ότι η συνεχόμενη έρευνα για τον έλεγχο της ύλης και η έμφαση στην καινοτομία στη νανοκλίμακα θα ενταθούν την επόμενη δεκαετία.

Ευχαριστώ τους συνεργάτες μου Ηλία Κούμουλο, Διπλ. Χημικό Μηχανικό ΕΜΠ, Ιωάννη Καρτσωνάκη, Διπλ. Χημικό ΕΚΠΑ, και τους Παναγιώτη Κάβουρα και Βασίλη Μαρκάκη, Διπλ. Φυσικούς ΑΠΘ, που ανταποκρίθηκαν πλήρως στις απαιτήσεις συγγραφής του βιβλίου με συνέπεια και επίπονη προσπάθεια επιμέλειας του κειμένου και των σχημάτων καθώς και για τη συμβολή τους και τις εύστοχες παρατηρήσεις τους. Ευχαριστώ τέλος όλους τους φοιτητές μου στη Σχολή Χημικών Μηχανικών για τις χρήσιμες υποδείξεις, τα σχόλια και τις συζητήσεις στο περιεχόμενο του βιβλίου.