

**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΡΗΤΗΣ**



**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΧΑΝΙΩΝ**

**ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ**

## **ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**«ΝΑΝΟΣΩΛΗΝΕΣ ΑΝΘΡΑΚΑ»**

**ΔΡΙΒΑΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ**

**A.M. 3471**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΠΕΤΡΙΔΗΣ**

**ΧΑΝΙΑ 2012**

# «ΝΑΝΟΣΩΛΗΝΕΣ ΑΝΘΡΑΚΑ- ΔΟΜΗ - ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ - ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ».



## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

---

Στόχος της παρούσας Διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της δομής, των ιδιοτήτων και των εφαρμογών των νανοσωλήνων άνθρακα. Αναλυτικότερα, στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι εννοιολογικοί προσδιορισμοί των σχετικών όρων όπως είναι η νανοτεχνολογία, τα πολυμερή νανოსύνθετα καθώς και οι ιδιότητες και τα πλεονεκτήματα των νανოსύνθετων υλικών.

Στο δεύτερο κεφάλαιο επιχειρείται μια σύντομη αλλά περιεκτική αναφορά στη δομή των νανοσωλήνων, στην ιστορική αναδρομή τους αλλά και στην ανάλυση των νανοδομών άνθρακα και στις ιδιότητες των νανοσωλήνων άνθρακα.

Στο τρίτο κεφάλαιο επιχειρείται η παρουσίαση των εφαρμογών των νανοσωλήνων άνθρακα σε διάφορους κλάδους και τομείς καθώς και οι επιδράσεις τους σε αυτούς.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται μια σύντομη βιβλιογραφική και ερευνητική επισκόπηση πάνω στο θέμα των νανοσωλήνων άνθρακα αλλά και στο ευρύτερο πεδίο της νανοτεχνολογίας.

Τέλος, στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται συνοπτικά τα γενικά συμπεράσματα που εξήχθησαν από την μελέτη της διαθέσιμης βιβλιογραφίας κατά την εκπόνηση της παρούσας εργασίας.

## **ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ**

---

ΝΑΝΟΣΩΛΗΝΕΣ ΑΝΘΡΑΚΑ, ΝΑΝΟΔΟΜΕΣ, ΝΑΝΟΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ, ΝΑΝΟΣΥΝΘΕΤΑ,  
ΠΟΛΥΜΕΡΗ ΥΛΙΚΑ.

## Περιεχόμενα

|   |    |
|---|----|
| ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....   | 7  |
| .....   | 9  |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΝΝΟΙΟΛΟΓΙΚΟΙ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΙ. ....   | 10 |
| 1.1. Νανοτεχνολογία. ....   | 10 |
| 1.2. Πολυμερή νανοσύνθετα .....   | 11 |
| 1.3. Μηχανισμοί Ανάπτυξης Νανοσωλήνων Άνθρακα .....                                   | 16 |
| 1.4. Τεχνολογικές προκλήσεις πολυμερών συνθέτων με ενίσχυση νανοσωλήνες άνθρακα ..... | 18 |
| 1.5. Αναγκαιότητα επιφανειακής τροποποίησης νανοσωλήνων .....                         | 20 |
| 1.6. ΝΑΝΟΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ .....  | 21 |
| 1.7. Ιδιότητες Νανοσυνθέτων και πλεονεκτήματα. ....                                   | 22 |
| .....   | 25 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΔΟΜΗ ΝΑΝΟΣΩΛΗΝΩΝ ΑΝΘΡΑΚΑ.....   | 26 |
| 2.1. Ιστορική αναδρομή .....  | 26 |
| .....   | 28 |
| 2.2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΝΑΝΟΣΩΛΗΝΩΝ ΑΝΘΡΑΚΑ.....   | 29 |
| 2.2.1. Μονοφλοιικοί νανοσωλήνες άνθρακα (SWCNTs) .....                                | 32 |
| 2.2.2. Πολυφλοιικοί νανοσωλήνες άνθρακα (MWCNTs).....                                 | 32 |
| 2.3. ΝΑΝΟΔΟΜΕΣ ΑΝΘΡΑΚΑ .....  | 33 |

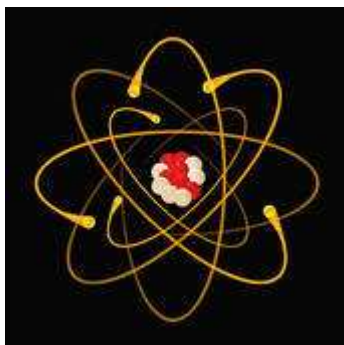
|  |    |
|--|----|
| 2.4. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΝΑΝΟΣΩΛΗΝΩΝ ΑΝΘΡΑΚΑ.....                                      | 36 |
| 2.4.1. Ηλεκτρικές Ιδιότητες .....  | 37 |
| 2.4.2. Μηχανικές Ιδιότητες .....   | 37 |
| 2.4.3. Θερμικές Ιδιότητες .....  | 42 |
| 2.4.4. Οπτικές Ιδιότητες .....   | 42 |
| 2.5. Τρόποι παρασκευής νανοσωλήνων άνθρακα.....                              | 43 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΝΑΝΟΣΩΛΗΝΩΝ ΑΝΘΡΑΚΑ.....                               | 46 |
| 3.1. βασικες εφαρμογες νανοσωληνων ανθρακα.....                              | 46 |
| 3.1.1. Ως σύνθετο υλικών .....   | 48 |
| 3.1.2. Στην Ιατρική .....  | 49 |
| 3.1.3. τρανζιστορ με νανοσωληνες ανθρακα .....                               | 50 |
| 3.1.4. τρανζιστορ νανοσωληνων ανθρακα .....                                  | 51 |
| 3.1.5. νανοσωληνες για εφαρμογες μνημης .....                                | 51 |
| 3.1.6. σε ηλεκτρικα κυκλωματα. ....  | 52 |
| 3.1.7. Στο Στρατό .....  | 52 |
| 3.1.8. Στα Υφάσματα.....   | 53 |
| 3.1.9. Στα Αυτοκίνητα.....   | 54 |
| 3.1.12. Στα Καλλυντικά.....  | 54 |
| 3.2. Επιδράσεις νανοτεχνολογιας σε υγεία, οικονομία και καθημερινή ζωή. .... | 55 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ – ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ.....                       | 57 |
| .....  | 82 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....83

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ – ΠΑΡΑΠΟΜΠΕΣ - ΠΗΓΕΣ. ....88

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

---



Ο άνθρακας, με σύμβολο 'C', είναι από τα λίγα χημικά στοιχεία γνωστά από την αρχαιότητα στον άνθρωπο. Τόσο ελεύθερος, όσο και κάτω από τη μορφή των πολυάριθμων ενώσεών του, είναι ευρύτατα διαδεδομένος στη φύση. Ενωμένος βρίσκεται στον ατμοσφαιρικό αέρα κυρίως σαν διοξείδιο του άνθρακα, στα ανθρακικά ορυκτά (ασβεστίτης, μάρμαρο κλπ), στο φυσικό αέριο και στο πετρέλαιο σαν υδρογονάνθρακας, καθώς και σε όλες ανεξαιρέτως τις ενώσεις του φυτικού και ζωικού βασιλείου. Αποτελεί το τέταρτο σε αφθονία χημικό στοιχείο στο σύμπαν ως προς τη μάζα του μετά το υδρογόνο, το ήλιο και το οξυγόνο<sup>1</sup>.

Ο άνθρακας έχει ατομικό αριθμό 6 και σαν μέλος της ομάδας 14 του περιοδικού πίνακα, είναι μη μεταλλικός και τετρασθενής, γεγονός που καθιστά τα τέσσερα ηλεκτρόνιά του ικανά να δημιουργήσουν ομοιοπολικούς δεσμούς. Ο άνθρακας σχηματίζει τις περισσότερες ενώσεις από κάθε άλλο στοιχείο, περίπου δέκα εκατομμύρια καθαρές οργανικές ενώσεις έχουν αναφερθεί έως τώρα, που με τη σειρά τους αποτελούν ελάχιστο κλάσμα από τέτοιες ενώσεις που θεωρητικά είναι πιθανές, υπό κανονικές συνθήκες. Αξίζει να σημειωθεί και η ασυνήθιστη ικανότητα σχηματισμού πολυμερών που παρουσιάζουν οι οργανικές ενώσεις. Το γεγονός αυτό συνδυασμένο με τα παραπάνω καθιστούν τον άνθρακα την χημική βάση της έως τώρα γνωστής ζωής<sup>2</sup>.

---

<sup>1</sup> Ash, Russell, The Top 10 of Everything, (2006) : The ultimate Book of Lists, Dk Pub,

<sup>2</sup> J.McMurry, Οργανική Χημεία Τόμος I ,Πανεπιστημιακές εκδόσεις Κρήτης – 2005.

Υπάρχουν αρκετές αλλοτροπικές μορφές άνθρακα. Οι πιο γνωστές είναι ο γραφίτης, το διαμάντι και ο άμορφος άνθρακας. Μολονότι οι φυσικές ιδιότητές τους διαφέρουν, όλες οι αλλοτροπικές μορφές άνθρακα εμφανίζουν μεγάλη σταθερότητα και απαιτούνται υψηλές θερμοκρασίες για να αντιδράσουν, ακόμα και με το οξυγόνο. Εκτός όμως από τις βασικές μορφές C, το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας έχει εστιαστεί σε άλλες όχι ευρέως γνωστές μορφές άνθρακα, που ανακαλύφθηκαν τα τελευταία χρόνια, όπως είναι οι φουλερίνες άνθρακα, οι νανοίνες, ο νανοαφρός, ο υαλώδης άνθρακας, οι νανοσωλήνες και οι νανοβλαστοί άνθρακα. Ο σχηματισμός τους στηρίζεται στο γεγονός ότι ένα γραφιτικό φύλλο έχει στα άκρα του πολλά άτομα άνθρακα με ελεύθερους δεσμούς, οι οποίοι αντιστοιχούν σε υψηλές ενεργειακές καταστάσεις<sup>3</sup>.

Συνακόλουθα, η συνολική ενέργεια ενός σχετικά μικρού αριθμού ατόμων άνθρακα (30-100) εξαλείφοντας τους ελεύθερους δεσμούς μειώνεται, ευνοώντας έτσι τον σχηματισμό κλειστών δομών άνθρακα, όπως οι φουλερίνες και οι νανοσωλήνες άνθρακα<sup>4</sup>.

Οι νανοσωλήνες άνθρακα ανακαλύφθηκαν το 1991 από τον Ιάπωνα φυσικό S. Iijima<sup>5</sup> αν και είχαν παρατηρηθεί και νωρίτερα. Είναι ομόκεντροι κύλινδροι γραφίτη, κλειστοί σε τουλάχιστον ένα άκρο με ημισφαιρική δομή, όπως οι φουλερίνες. Οι νανοσωλήνες μπορεί να είναι πολυφλοϊικοί- πολυτοιχωματικοί- (Multi Walled Carbon NanoTubes, MWCNTs) με ένα κεντρικό σωλήνα να περιβάλλεται από ένα ή περισσότερα στρώματα γραφίτη ή μονοφλοϊικοί – μονοχωματικοί- (Single Walled Carbon NanoTubes, SWCNTs), όπου υπάρχει μόνο ένας σωλήνας και καθόλου επιπλέον στρώματα γραφίτη. Λόγω των εξαιρετικών τους δομικών, ηλεκτρονικών και μηχανικών τους ιδιοτήτων, έχουν προσελκύσει το ενδιαφέρον του ερευνητικού κόσμου<sup>6</sup>.

<sup>3</sup> <http://nano.gtri.gatech.edu>, Georgia Tech Research Institute

<sup>4</sup> M.S. Dresselhaus and M. Endo, Top.Appl.Phys. 80 (2001) 11-28

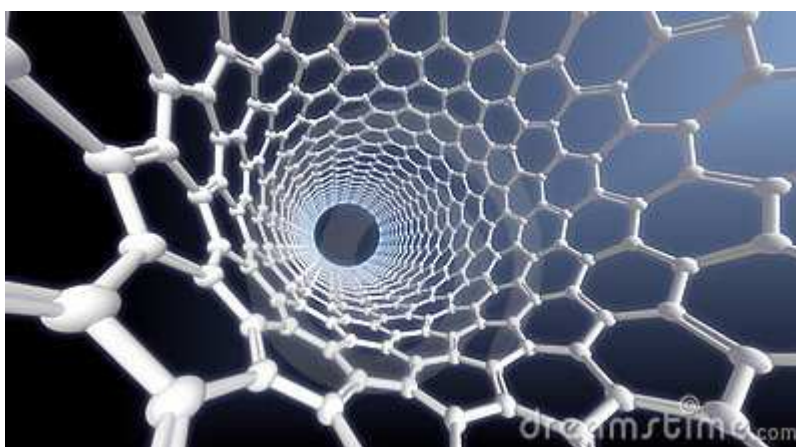
<sup>5</sup> Iijima, S. in *ieeexplore.ieee.org*

<sup>6</sup> Iijima, S. in *ieeexplore.ieee.org*



Από εμπορικής πλευράς, οι νανοσωλήνες άνθρακα ως προϊόν έχουν ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, προσφέροντας σημαντικά περιθώρια κέρδους και ανάπτυξης για την εταιρεία που θα κατορθώσει να επιτύχει και να διαθέσει στην αγορά τεχνολογικά άρτιους και ταυτόχρονα οικονομικά προσιτούς νανοσωλήνες. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ενίσχυση σύνθετων υλικών με πολυμερική, κεραμική ή άλλου τύπου μήτρα, στη δημιουργία αγώγιμων πολυμερών, απορροφητικών υλικών για καθαρισμό και διαχωρισμούς αερίων, καθώς και σε υφάσματα και επικαλύψεις (αντιστατικές, αγώγιμες, αντιδιαβρωτικές). Στον τομέα της ηλεκτρονικής εφαρμόζονται σε ηλεκτρονικά κυκλώματα, επίπεδες οθόνες, εκπομπούς πεδίου για τη βιομηχανία ηλεκτρονικών και φωτιστικών, οθόνες τηλεοράσεων (plasma display panel) και εφαρμογές ESD (electronic service delivery) όπως πχ. πρίζες υψηλής αγωγιμότητας. Χρησιμοποιούνται, επίσης, σε συσκευές αποθήκευσης ενέργειας, συσσωρευτές ηλεκτρικής ενέργειας (μπαταρίες λιθίου) και υλικά κελιών καυσίμου (φορείς καταλυτών και αποθήκευση υδρογόνου).

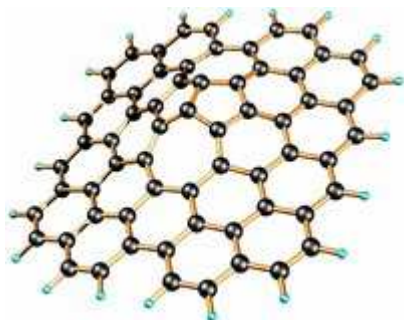
Τέλος, βρίσκουν εφαρμογή και στην αυτοκινητοβιομηχανία (επικαλύψεις, εξαρτήματα, πλαστικά τμήματα), την άμυνα (υλικά για ανθεκτικές στολές πολέμου, πολεμικά αεροσκάφη, αλεξίσφαιρα γιλέκα) και την ιατρική (ελεγχόμενη μεταφορά και αποδέσμευση φαρμακευτικών ουσιών, βιοαισθητήρες).



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΝΝΟΙΟΛΟΓΙΚΟΙ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΙ.

## 1.1. ΝΑΝΟΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ.

---



Στις 29 Δεκεμβρίου του 1959 ο Richard Feynman<sup>7</sup>, καθηγητής του τμήματος Φυσικής στο Caltech, σε ομιλία του σε σύσκεψη Αμερικανών Φυσικών στο ομώνυμο τμήμα αναφέρθηκε σε μια διαδικασία πρόβλεψης σύμφωνα με την οποία θα μπορούσε να γίνει χρήση μεμονωμένων ατόμων ή και μορίων. Η παρατήρηση αυτή θα ανέτρεπε τον τρόπο με τον οποίο εξηγούνται τα διάφορα φυσικά φαινόμενα.

Το 1965 ο Gordon Moore<sup>8</sup> περιγράφει το νόμο Moore σύμφωνα με τον οποίο ο αριθμός των τρανζίστορς που μπορεί να τοποθετηθούν σε ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα αυξάνονται εκθετικά, δίνοντας μια πολύ σημαντική κατεύθυνση στην ιστορία των ηλεκτρονικών υπολογιστών.

Το 1974 ο Norio Taniguchi, καθηγητής στο πανεπιστήμιο του Τόκιο, δημοσιεύει μία από τις πλέον γνωστές εργασίες<sup>9</sup> στην οποία αναφέρεται σαφώς στον όρο «νανοτεχνολογία». Συγκεκριμένα αναφέρει ότι «η νανοτεχνολογία κυρίως συνίσταται στον διαχωρισμό, τη συνένωση και την παραμόρφωση υλικών σε ατομικό ή μοριακό επίπεδο».

---

<sup>7</sup> Feynman, R., "Theory of Fundamental Processes", Vol. I, 1st Edition, Addison Wesley Publishing Company, New York (1961), p.p. 172.

<sup>8</sup> Moore, G.E., Electronics, 38 (1965), p.p. 114-117.

<sup>9</sup> Taniguchi, N., On the Basic Concept of "Nano-Technology", Proceeding of the Production Engineering International Conference, Part II, Japan Society of Precision Engineering, Tokyo, (1974).

Σύμφωνα με τη διαθέσιμη βιβλιογραφία, νανοτεχνολογία είναι ένας όρος ο οποίος χρησιμοποιείται για να περιγράψει τη δημιουργία και χρήση λειτουργικών δομών μεγέθους μεταξύ 1 και 100 nm, της τάξεως δηλαδή του 910 nm. Οι διαστάσεις γίνονται ευκολότερα αντιληπτές αν σκεφτούμε πως ένα νανόμετρο ισούται περίπου με το 1/80000 μιας ανθρώπινης τρίχας ή με το μήκος 10 ατόμων υδρογόνου σε σειρά. Κατά παρόμοιο τρόπο ορίζεται και ο όρος νανοεπιστήμη, αναφερόμενος σε επιστήμες οι οποίες μελετούν φαινόμενα στην κλίμακα αυτή<sup>10</sup>.

Στη συνέχεια, το 1980 ο Δρ. K.Eric Drexel περιγράφει τις ιδέες του για τη νανοτεχνολογία, τις οποίες στηρίζει στον ντετερμινισμό παρά στον στοχαστικό λογισμό. Ο Eric Drexel αναφέρεται συχνά στη νανοτεχνολογία με τον όρο «μοριακή νανοτεχνολογία» την οποία μελέτησε και αριθμητικά.

Το 1991 είναι μία χρονιά, τομή στη νανοτεχνολογία καθότι ο S.Iijima<sup>11</sup> εισάγει στη νανοτεχνολογία τους νανοσωλήνες άνθρακα πολλαπλού τοιχώματος, για τους οποίους θα γίνει εκτενής αναφορά σε επόμενη παράγραφο.

Η εξέλιξη της νανοτεχνολογίας από τα τέλη του 20ου αιώνα μέχρι και σήμερα είναι ραγδαία, κάτι που είναι λογικό καθώς οι τεχνολογίες προχωράνε και βοηθούν όχι μόνο την παρατήρηση και την πρόβλεψη φαινομένων που συμβαίνουν σε νάνο κλίμακα αλλά και στην κατασκευή νάνο διατάξεων. Τα τρία βασικά παρακλάδια της νανοτεχνολογίας είναι τα νανοδομημένα υλικά, τα νανοεργαλεία και οι νανοσυσκευές καθένα από τα οποία περιλαμβάνει πολλές εφαρμογές.

Όσον αφορά στα νανοδομημένα υλικά, είναι ο μεγαλύτερος τομέας και ίσως ο σημαντικότερος καθώς αποτελούν απαραίτητο συστατικό για τους δύο παραπάνω τομείς. Οι βασικότερες κατηγορίες νανοδομημένων υλικών είναι οι εξής:

---

<sup>10</sup> [www.nano.gr](http://www.nano.gr)

<sup>11</sup> Iijima, S., Letters of Nature, 354 (1991), p.p. 56-58.

- Νανοκρυσταλλικά υλικά
- Νανοσωλήνες άνθρακα και φουλλερένια
- Δενδριμερή
- Polyhedral Silsesquioxanes
- Nano-Intermediates
- Νανοσύνθετα

Αν και το πεδίο της νανοτεχνολογίας μόλις πρόσφατα άρχισε να αναπτύσσεται εντατικά, οι δυνατότητες της είχαν αρχίσει να γίνονται εμφανείς ήδη από την εποχή που ο φυσικός Richard Feynman έδωσε το διάλεξη με τίτλο "There's Plenty of Room at the Bottom" μιλώντας για τα μεγάλα περιθώρια που αφήνουν οι νόμοι της φύσης για τον έλεγχο της ύλης σε ατομικό επίπεδο. Στη μέχρι τώρα ανάπτυξη της νανοτεχνολογίας κύριο ρόλο έπαιξαν η σημαντική ανακάλυψη των μικροσκοπικών ατομικών δομών, ενώ σταθμοί μπορούν να θεωρηθούν οι ανακαλύψεις δομών άνθρακα σε μορφή σφαίρας, γνωστές ως φουλλερένια καθώς και σε μορφή σωλήνα γνωστές ως νανοσωλήνες άνθρακα με ιδιαίτερες ιδιότητες το καθένα. Οι εφαρμογές της φαίνεται μελλοντικά να πολλαπλασιάζονται εξαιτίας του εύρους φάσματος όπου και μπορούν ήδη να χρησιμοποιηθούν<sup>12</sup>.

Η νανοτεχνολογία αποτελεί έναν τομέα που τα τελευταία χρόνια παρουσιάζει ραγδαία ανάπτυξη, προσελκύνοντας σημαντικό ερευνητικό και εμπορικό ενδιαφέρον χάρη στις φαινομενικά ανεξάντλητες προοπτικές που υπόσχεται.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον στο πλαίσιο της καινοτόμου αυτής τεχνολογίας εμφανίζουν η παραγωγή και οι εφαρμογές νανοσωλήνων άνθρακα, που γνωρίζουν ιδιαίτερη άνθιση τόσο στη χώρα μας όσο και διεθνώς. Οι

---

<sup>12</sup> [Blogs.sch.gr/nanosp/2009/04/23](http://blogs.sch.gr/nanosp/2009/04/23)

νανοσωλήνες άνθρακα (carbon nanotubes - CNTs) είναι πολυμερικές δομές άνθρακα, κυλινδρικής γεωμετρίας με σχετικά μεγάλο λόγο μήκους ως προς τη διάμετρο. Η ιδιαιτερότητα της συγκεκριμένης τεχνολογίας οφείλεται στις εξαιρετικές μηχανικές, θερμικές, οπτικές και ηλεκτρικές τους ιδιότητες. Αρκεί να αναφέρουμε απλώς ότι η μηχανική τους αντοχή είναι 100 φορές μεγαλύτερη από αυτή του χάλυβα, του πιο διαδεδομένου σήμερα κατασκευαστικού υλικού.

Η νανοτεχνολογία είναι μια νέα προσέγγιση για την κατανόηση και την άρτια γνώση των ιδιοτήτων της ύλης σε νανοκλίμακα καθώς και για επεμβάσεις στην κλίμακα αυτή. Θεωρητικά, η νανοτεχνολογία αναφέρεται στην επιστήμη και τεχνολογία που αναπτύσσονται σε κλίμακα ατόμων και μορίων (νανοκλίμακα). Αναφέρεται επίσης σε νέες ιδιότητες που μπορούμε να παρατηρήσουμε και να εκμεταλλευτούμε.

Στον τομέα της τεχνολογίας των υλικών και κυρίως της μηχανικής, η νανοτεχνολογία καλείται να μας δώσει λύση προς την κατεύθυνση της αλλαγής των ιδιοτήτων τους, έτσι ώστε να έχουμε υλικά που να μη χαράσσονται ή να μην επηρεάζονται από τη φυσική ή τεχνητή φθορά. Πάντως, οι εφαρμογές στον τομέα των υλικών με τη χρήση της νανοτεχνολογίας έχουν ήδη αρχίσει να γίνονται πραγματικότητα με διάφορες μεθόδους, στις οποίες βασίζονται οι ελπίδες των επιστημόνων για ένα νέο κόσμο υλικών που υπόσχεται πολλά.

## **1.2. ΠΟΛΥΜΕΡΗ ΝΑΝΟΣΥΝΘΕΤΑ**

---

Η ιστορία των πολυμερικών σύνθετων υλικών ξεκινάει με την παραγωγή της εποξειδικής ρητίνης το 1939, η οποία έως σήμερα αποτελεί την ευρύτερα χρησιμοποιούμενη ρητίνη. Οι ίνες άνθρακα βρήκαν τις πρώτες τους εφαρμογές περίπου εκατό χρόνια πριν, όπου και χρησιμοποιήθηκαν ως πληρωτικό μέσο στους ηλεκτρονικούς λαμπτήρες. Οι ίνες άνθρακα με την μορφή που είχαν όταν πρωτο-παρασκευάστηκαν,

δεν μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν σε κατασκευαστικά υλικά αφού υπολείπονταν σε αντοχή και κατά συνέπεια δεν αποτελούσαν ενισχυτικό μέσο πλήρωσης. Όμως το 1963, κατόπιν κατάλληλων βελτιώσεων που πραγματοποιήθηκαν στις ίνες άνθρακα, οδηγηθήκαμε στην χρήση αυτών σε ειδικές εφαρμογές όπου το κόστος δεν αποτελούσε αποτρεπτικό παράγοντα, όπως στον σχεδιασμό αεροσκαφών και παραγωγή αθλητικών ειδών.

Στην τελευταία δεκαετία του αιώνα, οι αραμιδικές ίνες, οι ίνες άνθρακα καθώς και άλλα υλικά ενισχύουν τα υλικά μήτρας αφού επιδεικνύουν εξαιρετικά υψηλά μέτρα ελαστικότητας. Οι εξαιρετικά καλές μηχανικές ιδιότητες που εμφανίζουν οι νανοσωλήνες άνθρακα τους καθιστούν ιδανικό ενισχυτικό μέσο για πολυμερικές μήτρες με σκοπό την παραγωγή σύνθετων πολυμερικών υλικών υψηλής αντοχής.

Τα υλικά που έχουν τουλάχιστο μια διάσταση μικρότερη από 100 nm είναι τα λεγόμενα υλικά νανολίμακας. Αν αυτά τα υλικά χρησιμοποιούνται ως ενισχυτικό μέσο σε σύνθετα υλικά τότε τα τελικά σύνθετα ονομάζονται νανοσύνθετα. Για τα νανοσύνθετα υπάρχουν υψηλές προσδοκίες λόγω της πολυ-λειτουργικότητά τους, και των μοναδικών συνδυασμών ιδιοτήτων απρόσιτων με παραδοσιακά υλικά. Οι προκλήσεις στην επίτευξη αυτής των προσδοκιών είναι τεράστιες. Αυτές οι προκλήσεις περιλαμβάνουν έλεγχο της κατανομής του μεγέθους και της διασποράς των συστατικών νανομεγέθους, προσαρμογή και κατανόηση του ρόλου των διεπιφανειών μεταξύ δομικά και χημικά ανόμοιων φάσεων στις ιδιότητες του κυρίως σώματος του υλικού. Όμως δεν έχει ακόμη επιτευχθεί μεγάλης κλίμακας και ελεγχόμενη επεξεργασία πολλών νανοϋλικών<sup>13</sup>. Τα πολυμερή σύνθετα είναι σημαντικά εμπορικά υλικά με εφαρμογές που περιέχουν ελαστομερή για απόσβεση, ηλεκτρικούς μονωτές, θερμικούς αγωγούς και σύνθετα υλικά υψηλής αντοχής για χρήση σε αεροδιαστημικές εφαρμογές. Υλικά με υψηλές αντοχές ιδιότητες επιλέγονται για να

---

<sup>13</sup> N. Taniguchi, "On the Basic Concept of 'Nano-Technology - Part II'", British Society of Precision Engineering (1974)

δημιουργηθούν σύνθετα με βελτιωμένες ιδιότητες. Για παράδειγμα, οι υψηλής αντοχής αλλά ψαθυρές ίνες άνθρακα προστίθενται σε χαμηλής αντοχής πολυμερή για να δημιουργηθεί ένα δύσκαμπτο, ελαφρύ σύνθετο υλικό. Τα τελευταία χρόνια όμως έχουμε επιτύχει τα όρια των ιδιοτήτων των σύνθετων υλικών με παραδοσιακές ενισχύσεις μικρο-κλίμακας. Επίσης, οι μακροσκοπικές ατέλειες που προκύπτουν λόγω του μεγάλου ή μικρού κλάσματος όγκου της ενισχυτικής φάσης συχνά οδηγούν στην κατάρρευση ή στην αστοχία<sup>14</sup>.

Πρόσφατα έχει ανοίξει ένα μεγάλο παράθυρο ευκαιριών για να ξεπεραστούν οι περιορισμοί των παραδοσιακών πολυμερών συνθέτων μικρο-κλίμακας στα οποία η ενισχυτική φάση είναι μικρότερη των 100nm. Παρ' όλο που ορισμένα νανο-ενισχυμένα σύνθετα (με μαύρο του άνθρακα, σίλικα) έχουν χρησιμοποιηθεί για πάνω από ένα αιώνα, η έρευνα και η ανάπτυξη νανο-ενισχυμένων πολυμερών έχει αυξηθεί υπερβολικά τα τελευταία χρόνια. Αρχικά παρατηρήθηκαν καινοτόμοι συνδυασμοί ιδιοτήτων σε μερικά πολυμερή νανοσύνθετα. Για παράδειγμα, η χρήση των ισότροπων νανοσωματιδίων στα θερμοπλαστικά και ειδικά σε ημικρυσταλλικά θερμοπλαστικά αυξάνει την τάση διαρροής, την αντοχή σε εφελκυσμό, και το μέτρο ελαστικότητας συγκριτικά με το αντίστοιχο του αμιγούς πολυμερούς. Ένα κλάσμα όγκου της τάξεως του 0,04 πυριτικών τύπου mica (Mica Type Silicates, MTS) σε εποξειδική ρητίνη αυξάνει το μέτρο ελαστικότητας (κάτω από την Tg) κατά 58% και το μέτρο ελαστικότητας (στην ελαστομερική περιοχή) κατά 450%. Επιπρόσθετα, η διαπερατότητα του νερού στην πολύ(ε-καπρολακτόνη) μειώνεται κατά μια τάξη μεγέθους με την προσθήκη 4.8% κ. ο. πυριτικών. Οι Yano et al. έδειξαν μια μείωση 50% στην διαπερατότητα των πολύ-ιμιδίων σε 2% φόρτιση των MTS. Πολλά από αυτά τα νανοσύνθετα είναι οπτικά διαφανή ή οπτικά ενεργά.

Ένας δεύτερος λόγος για την τεράστια αύξηση στην έρευνα ήταν η «ανακάλυψη» των νανοσωλήνων άνθρακα στις αρχές της δεκαετίας του

<sup>14</sup> Kahn, Jennifer, "Nanotechnology", National Geographic, pp 98–119, (June – 2006)

1990. Παρ' όλο οι νανοσωλήνες είχαν παρατηρηθεί από το 1960<sup>15</sup>, μόνο στα μέσα του 1990 παρήχθησαν σε ποσότητες που απαιτούνται για εκτίμηση των ιδιοτήτων των νανοσυνθέτων. Οι μηχανικές και ηλεκτρικές ιδιότητες των νανοσωλήνων άνθρακα, είναι σημαντικά διαφορετικές από εκείνες του γραφίτη και προσφέρουν ασυνήθιστες πιθανότητες, για νέα νανοσύνθετα υλικά. Τρίτον, σημαντική βελτίωση στην χημική επεξεργασία των νανοσωματιδίων και στην επεξεργασία in situ των νανοσύνθετων έχει οδηγήσει σε ανεπανάληπτο έλεγχο της μορφολογίας τέτοιων σύνθετων. Έτσι πλέον μπορούμε σήμερα να ελέγξουμε την διεπιφάνεια μεταξύ της μήτρας και της ενίσχυσης.

Όμως τι είναι μοναδικό στην νανο-ενίσχυση συγκρινόμενο με τις ενισχύσεις σε παραδοσιακές ενισχύσεις μικρο-κλίμακας και πως τα σύνθετα υλικά συγκρίνονται με τα αντίστοιχα μακροσκοπικά τους; Η πιο προφανής διαφορά είναι το μικρό μέγεθος των ενισχύσεων. Επιπλέον, το μικρό μέγεθος σημαίνει ότι τα σωματίδια δεν δημιουργούν μεγάλες συγκεντρώσεις τάσεων και έτσι δεν μειώνουν την ολκιμότητα του πολυμερούς. Το μικρό μέγεθος των νανοενισχύσεων μπορεί επίσης να οδηγήσει σε μοναδικές ιδιότητες των ίδιων των σωματιδίων. Για παράδειγμα, οι Νανοσωλήνες Άνθρακα Μονού Τοιχίου (SWCNTs) είναι μόρια απαλλαγμένα από ατέλειες και έχουν μέτρο ελαστικότητας που φθάνουν το 1 TPa και αντοχές μέχρι 500 GPa.

### **1.3. ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΝΑΝΟΣΩΛΗΝΩΝ ΆΝΘΡΑΚΑ**

---

Αν και έχουν περάσει αρκετά χρόνια από την ανακάλυψη των νανοσωλήνων άνθρακα, εντούτοις δεν είναι πλήρως αποσαφηνισμένος ο πλήρης μηχανισμός ανάπτυξής τους. Οι παράγοντες που επηρεάζουν τους μηχανισμούς ανάπτυξής τους, έχει αποδειχθεί ότι είναι η πηγή του άνθρακα, η πηγή θερμότητας που απαιτείται για να επιτευχθεί η επιθυμητή θερμοκρασία και η παρουσία ή μη καταλύτη (το σύνολο φορέα και μετάλλου). Συγκεκριμένα, η ύπαρξη του τελευταίου είναι αναγκαία για την παραγωγή νανοσωλήνων άνθρακα μέσω χημικής απόθεσης ατμών, ενώ όταν

---

<sup>15</sup> S. Iijima, Nature, 354, 56 (1991).



χρησιμοποιούνται οι άλλες δύο μέθοδοι παραγωγής, τότε η παρουσία καταλύτη είναι απαραίτητη μόνο για την παραγωγή μονοφλοιϊκών νανοσωλήνων άνθρακα.

Ένας από τους πιο αποδεκτούς μηχανισμούς ανάπτυξης αυτών των υλικών είναι όμοιος με το μηχανισμό που προτάθηκε από τον Baker<sup>16</sup> για την περιγραφή ανάπτυξης των ινών άνθρακα, χάρη στην αναλογία που παρατηρείται μεταξύ του σχηματισμού τους και των νανοσωλήνων. Η διαφοροποίηση στο σχηματισμό των νανοσωλήνων άνθρακα, συγκριτικά με τις ίνες άνθρακα, έγκειται στη διάσταση του καταλυτικού σωματιδίου, η οποία είναι της τάξης του νανόμετρου<sup>17</sup>.

Πιο αναλυτικά, σε ένα σωματίδιο μόλις λίγων νανόμετρων περιέχεται ένα πολύ υψηλό ποσοστό επιφανειακών ατόμων, δημιουργώντας ένα τεράστιο πρόβλημα επιφανειακής ενέργειας ανά άτομο. Περίσσεια άνθρακα βοηθά στην επίλυση αυτού του προβλήματος, αφού το βασικό πλέγμα του γραφίτη έχει μια εξαιρετικά χαμηλή επιφανειακή ενέργεια (10-20 φορές μικρότερη από εκείνη των περισσότερων μετάλλων), οδηγώντας σε ελάττωση της συνολικής επιφανειακής ενέργειας μέσω του σχηματισμού ενός γραφιτικού “καπακιού” στην καταλυτική επιφάνεια, με τα άκρα του ισχυρά χημοροφημένα στο μέταλλο. Ο μηχανισμός αυτός καλείται “μηχανισμός *yarmulke*” χάρη στην ομοιότητα του “καπακιού” που σχηματίζεται, με τα εβραϊκά καπέλα *yarmulke*.

Ο άνθρακας που συνεχίζει να παρέχεται, συγκεντρώνεται στην επιφάνεια του καταλυτικού σωματιδίου και μπορεί να απορροφηθεί με 2 τρόπους. Σύμφωνα με την πρώτη εκδοχή το αρχικό κέλυφος συνεχίζει να αναπτύσσεται γύρω από το σωματίδιο, το οποίο υπερκαλύπτεται και απενεργοποιείται με τη συνεχή παροχή του άνθρακα. Διαφορετικά, ένα δεύτερο “καπάκι” θα μπορούσε να σχηματισθεί κάτω από το πρώτο.

<sup>16</sup> R.T.K. Baker, Carbon 27 (3), 315 (1989).

<sup>17</sup> H. Kanzow and A. Ding, Phys. Rev. B 60 (15) 11180 (1991). C.N. Rao, B.C. Satishkumar, A. Govindajar and A. Nath, CHEMPHYSICHEM 2, 78 (2001). C.N. Rao, RSC Publishing (2005).

Καθώς πρόσθετα “καπάκια” σχηματίζονται το ένα μέσα στο άλλο, τα παλαιότερα πιέζονται για να ανασηκωθούν και δημιουργούν ένα κυλινδρικό σωλήνα, του οποίου το ανοιχτό άκρο παραμένει χημοροφημένο στο καταλυτικό σωματίδιο. Η πυρηνοποίηση νέων εσωτερικών στρωμάτων σταματά όταν η τάση που προκαλείται από την αυξανόμενη καμπυλότητα των νέων στρωμάτων γίνει πολύ μεγάλη. Καθοριστικό ρόλο στο μηχανισμό της ανάπτυξης κατέχουν και οι αλληλεπιδράσεις μετάλλου-υποστρώματος<sup>18</sup>. Όταν οι αλληλεπιδράσεις του καταλυτικού σωματιδίου και του υποστρώματος είναι ασθενείς το καταλυτικό σωματίδιο απομακρύνεται από το υπόστρωμα καθώς ο νανοσωλήνας σχηματίζεται σταδιακά μεταξύ αυτού και του υποστρώματος. Αυτός ο μηχανισμός καλείται μηχανισμός ανάπτυξης κατά κορυφή (tip-growth) και περιλαμβάνει τη διάχυση του άνθρακα στην κύρια μάζα του υλικού<sup>19</sup>. Οι ισχυρές αλληλεπιδράσεις οδηγούν σε ανάπτυξη νανοσωλήνων προς τα πάνω, με το καταλυτικό σωματίδιο παραμένει επί του υποστρώματος και ο νανοσωλήνας αναπτύσσεται με άνθρακες να προστίθενται συνεχώς στη βάση του. Αυτός ο τρόπος ανάπτυξης καλείται ανάπτυξη κατά τη βάση (base-growth) και σε αυτόν κυριαρχεί η επιφανειακή διάχυση του άνθρακα.

#### **1.4. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΕΣ ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΜΕ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΝΑΝΟΣΩΛΗΝΕΣ ΑΝΘΡΑΚΑ**

---

Διαπιστώθηκε ότι οι τρέχουσες μέθοδοι παρασκευής πολυμερών σύνθετων υλικών δεν μπορούν να παράξουν ένα ομοιογενές υλικό (βασισμένο στους νανοσωλήνες) που να έχει μεγάλη περιεκτικότητα σε νανοσωλήνες (κατά βάρος και κατ’ όγκο) και να έχει υψηλές μηχανικές ιδιότητες διότι υπάρχουν κάποιες προκλήσεις οι οποίες δεν έχουν

<sup>18</sup> E. Borowiak-Palen, A. Bachmatiuk, M.H. Rummeli, T. Gemming, M. Kruszynska and R.J. Kalenczuk, Physica E, In Press (2007).

<sup>19</sup> C.H. See and A.T. Harris, Int. Eng. Chem. Res. 46, 997 (2007).

ξεπεραστεί ακόμα<sup>20</sup> Κάποιες από τις πιο σημαντικές προκλήσεις που πρέπει να αναφερθούν είναι οι εξής:

- Μη-ομοιόμορφη διασπορά νανοσωλήνων: Ομοιόμορφη διασπορά δεν έχει παρατηρηθεί, καθώς το ιξώδες του μίγματος ρητίνης νανοσωλήνων ήταν πολύ υψηλό στην τεχνική ανάμειξης τήγματος καθώς και στην τεχνική απευθείας ανάμειξης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την χαμηλή μεταφορά μηχανικών τάσεων και την ολίσθηση μεταξύ των δεματιών από νανοσωλήνες.
- Πτωχή διεπιφανειακή πρόσφυση: Η πτωχή διεπιφανειακή πρόσφυση παρατηρήθηκε και στις τρεις τεχνικές, που οφείλεται αρχικά στην χημική σταθερότητα των νανοσωλήνων και στην ανομοιόμορφη διασπορά των νανοσωλήνων στην μήτρα ρητίνης. Οι νανοσωλήνες άνθρακα συγκρατούνται με την μήτρα από δεσμούς van der Waals και όχι από χημικούς δεσμούς. Γι' αυτό το λόγο τα σύνθετα που σχηματίζονται δεν έχουν επαρκή διεπιφανειακή πρόσφυση, με αποτέλεσμα να παρουσιάζουν μια ασήμαντη αύξηση στο μέτρο ελαστικότητας, την αντοχή και στην τάση θραύσης.
- Χαμηλή περιεκτικότητα σε νανοσωλήνες: Για να παρασκευάσει κανείς ένα σύνθετο υψηλής αντοχής, θα πρέπει να λάβει υπόψη ότι το ποσοστό ενίσχυσης που είναι παρόν σε ένα σύνθετο παίζει ένα ζωτικό ρόλο. Η κατάλληλη επιλογή του τύπου, της ποσότητας και του προσανατολισμού των νανοσωλήνων είναι πολύ σημαντική καθώς επηρεάζει τα χαρακτηριστικά του πολυστρωτού σύνθετου, όπως το ειδικό βάρος, την αντοχή σε εφελκυσμό, την αντοχή σε συμπίεση, το μέτρο ελαστικότητας, την αντοχή σε κόπωση.

---

<sup>20</sup> Zhi Wang, Zhiyong Liang, Ben Wang,, Chuck Zhang, Leslie Kramer, “Processing and property investigation of single-walled carbon nanotube (SWNT) buckypaper/epoxy resin matrix nanocomposites”, Composites: Part A, 35, 1225–1232, (2004).

## 1.5. ΑΝΑΓΚΑΙΟΤΗΤΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΣΗΣ ΝΑΝΟΣΩΛΗΝΩΝ

---

Για την παρασκευή σύνθετων υλικών κρίθηκε απαραίτητη η χρήση χημικών αντιδραστηρίων ικανών να τροποποιήσουν την επιφάνεια των νανοσωλήνων, και με αυτό τον τρόπο να βελτιώσουν α) την διασπορά των νανοσωλήνων στην μήτρα, β) την συμβατότητα (χημική συγγένεια) τους με την μήτρα, γ) την διεπιφανειακή πρόσφυση μεταξύ μήτρας και νανοσωλήνων (δηλαδή την βελτίωση μεταφοράς μηχανικών τάσεων από την μήτρα στους νανοσωλήνες). Οι νανοσωλήνες άνθρακα έχουν κινήσει το ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια εξαιτίας των ασυνήθιστων ηλεκτρικών και μηχανικών ιδιοτήτων τους<sup>21</sup>. Για κάποιες από τις εφαρμογές τους απαιτείται το υλικό να είναι υψηλής καθαρότητας, και που η χημική αδράνεια του γραφίτικού δικτύου αποτελεί εμπόδιο στην παρασκευή σύνθετου υλικού.

Η οξείδωση των CNTs μπορεί να γίνει είτε με υγρές χημικές μεθόδους<sup>22</sup>, φωτοοξείδωση<sup>23</sup>, πλάσμα οξυγόνου<sup>24</sup> ή επεξεργασία αέριας φάσης<sup>25</sup> για να αυξήσουν την καθαρότητα του υλικού και να προάγουν την χημική ενεργότητα του γραφίτικού δικτύου. Τυπικά, μέσω των παραπάνω διεργασιών, οι αμιγείς CNTs μπορούν να καθαριστούν και έχει βρεθεί ότι η γραφίτική επιφάνεια μπορεί διακοσμηθεί κυρίως με οξυγονούχες ομάδες, όπως το καρβοξύλιο και το υδροξύλιο. Η παρουσία αυτών των οξυγονούχων ομάδων διευκολύνει τον διαχωρισμό των δεματιών CNTs

---

<sup>21</sup> Dresselhaus MS, Dresselhaus G, Avouris P. Carbon nanotubes: synthesis, properties and applications. Springer-Verlag: Berlin, 2001.

<sup>22</sup> Chen J, Hamon MA, Hu H, Chen Y, Rao AM, Eklund PC, Haddon RC. Solution properties of single-walled carbon nanotubes. Science 1998;282:95-98.

<sup>23</sup> Grujicic M, Gao G, Rao AM, Tritt TM, Nayak S. UV-light enhanced oxidation of carbon nanotubes. Appl Surf Sci 2003;214:289-303.

<sup>24</sup> Felten A, Bittencourt C, Pireaux JJ. Gold clusters on oxygen plasma functionalized carbon nanotubes: XPS and TEM studies. Nanotechnology 2006;17:1954-1959.

<sup>25</sup> Tsang SC, Harris PJF, Green MLH. Thinning and opening of carbon nanotubes by oxidation using carbon dioxide. Nature 1993;362:520-522.

αυξάνει την διασπορά τους σε πολικούς διαλύτες.<sup>26</sup> Αυτό ωστόσο επηρεάζει την επεξεργασία των CNTs και αυξάνει την πιθανότητα της ειπλέον επεξεργασίας ανάλογα την εφαρμογή<sup>27</sup>. Όσον αφορά την χρήση των CNTs σαν ενισχυτικό μέσο σε σύνθετα υλικά, η ενσωμάτωση των οξυγονούχων ομάδων στην γραφιτική επιφάνεια είναι ένα κρίσιμο βήμα για την βελτίωση της διεπιφανειακής πρόσφυσης. Σαν αποτέλεσμα, οι μηχανικές και ηλεκτρικές ιδιότητες των CNTs μπορούν μεταφερθούν στις ιδιότητες των συνθέτων βασισμένων σε CNTs.

## 1.6. ΝΑΝΟΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ

---

Τα νανοσύνθετα υλικά είναι υλικά ευρείας κλίμακας, τα οποία αποτελούνται από δύο ή περισσότερες συνιστώσες εκ των οποίων τουλάχιστο μία πρέπει να βρίσκεται σε νάνο-κλίμακα. Για παράδειγμα, ένα πολυμερές που παίζει το ρόλο του μητρικού υλικού, όταν αναμιχθεί με ένα έγκλεισμα, που βρίσκεται σε νάνο-διάσταση, όπως νανοσωλήνες άνθρακα ή φουλλερένια, δημιουργεί ένα σύνθετο υλικό το οποίο χαρακτηρίζεται ως νανοσύνθετο. Τα νάνο-εγκλείσματα μπορεί να είναι:

- Νάνο-σωματίδια σε μορφή κόκκου, τα οποία είναι μηδενικής διάστασης
- Νάνο-ίνες και νανοσωλήνες, τα οποία είναι μίας διάστασης (1D)
- Λεπτά επικαλυπτικά στρώματα (thin film coating), quantum wells (2D)
- Ενσωματωμένα δίκτυα (embedded networks) και συμπολυμερή τα οποία μπορεί να είναι δύο ή τριών διαστάσεων (3D)

---

<sup>26</sup> Liu J, Rinzler AG, Dai H, Hafner JH, Bradley RK, Boul PJ, et al. Fullerene pipes. *Science* 1998;280:1253-1256.

<sup>27</sup> Balasubramanian K, Burghard M. Chemically functionalized carbon nanotubes. *Small* 2005;1:180-192.

## 1.7. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΝΑΝΟΣΥΝΘΕΤΩΝ ΚΑΙ ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ.

---

Τα νανοσύνθετα υλικά ξεχωρίζουν από όλα τα υπόλοιπα σύνθετα γιατί εμφανίζουν εξαιρετικές ιδιότητες που τα κοινά σύνθετα δεν μπορούν να προσεγγίσουν. Αυτό που τα κάνει τόσο ξεχωριστά είναι τα εγκλείσματα τα οποία βρίσκονται σε νάνο κλίμακα και εμφανίζουν αξιοσημείωτες ιδιότητες ως αυτόνομα συστατικά. Αρκεί το μητρικό υλικό να ενισχυθεί με 5 έως 6% κατά βάρος σε νάνο εγκλείσματα για την επίτευξη βέλτιστων ιδιοτήτων. Οι ιδιότητες, όμως, των νανοσυνθέτων δεν εξαρτώνται μόνο από τις ιδιότητες των νάνο εγκλεισμάτων αλλά και από τη μορφολογία και τα χαρακτηριστικά των διεπιφανειών εγκλείσματος-μήτρας<sup>28</sup>. Η διεπιφάνεια στην περίπτωση των νανοσυνθέτων υλικών είναι ουσιαστικά άπειρη, καθώς η επιφάνεια επαφής των εγκλεισμάτων με το μητρικό υλικό είναι τεράστια. Αυτό μπορεί να γίνει αντιληπτό αν σκεφτεί κανείς πόσες νάνο ίνες θα μπορούσαν να προκύψουν από μία μικρο ίνα. Στην περίπτωση αυτή το βάρος της ενίσχυσης θα παρέμενε ίδιο αλλά η διεπιφάνεια του νάνο-συνθέτου θα ήταν τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη από αυτή του μικρο-συνθέτου.

Τέλος, εξίσου σημαντικό είναι το γεγονός ότι στη νάνο κλίμακα εμφανίζονται μοριακά, ατομικά και πυρηνικά φαινόμενα. Μερικά από τα βασικότερα πλεονεκτήματα των νανοσυνθέτων υλικών παρουσιάζονται εν συντομία παρακάτω<sup>29</sup>:

### **Βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες.**

- Υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα η οποία μπορεί να προσεγγίζει ή ακόμη και να ξεπερνάει αυτή των μετάλλων.

---

<sup>28</sup> Theodosiou, T.C., Saravanos, D.A, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 20 (2009), p.p. 1649-1661.

<sup>29</sup> Hernandez, E., Goze, C., Bernier, P., Rubio, A., Physical Review Letters, 80 (1998), pp. 4502–4505.

- Περιορισμένη διάχυση μορίων αέρα, διαφόρων αέριων υδρογονανθράκων και μορίων νερού. Η ιδιότητα αυτή είναι πολύ σημαντική καθώς υπάρχουν πολλές περιπτώσεις όπου η διάχυση τέτοιων μορίων είναι απαγορευτική, όπως σε συσκευασίες τροφίμων.
- Υψηλή αντοχή σε έντονα τοξικό (χημικό) περιβάλλον, μία ιδιότητα που καθιστά τα νανοσύνθετα ιδανικά υλικά για τη χρησιμοποίησή τους σε ανθρώπινο οργανισμό. Είναι, δηλαδή, υλικά κατάλληλα για εφαρμογές στη βιοτεχνολογία και τη βιοϊατρική. Στην περίπτωση αυτή τα νανοσύνθετα ανήκουν στην κατηγορία των βιοϋλικών.
- Τα νανοσύνθετα υλικά δύνανται να είναι άφλεκτα ενώ παράλληλα, ακόμη και στην περίπτωση που επέλθει καύση, διαχέονται λιγότερο τοξικά αέρια και καπνοί προς το περιβάλλον, γεγονός που τα καθιστά φιλικότερα προς το περιβάλλον.
- Εμφανίζουν θερμική σταθερότητα.

Τα νανοσύνθετα μπορεί να έχουν λείες και στιλπνές επιφάνειες. Επομένως, μπορεί να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή αντικειμένων με καλαίσθητες επιφάνειες, κάτι που είναι απαραίτητο προκειμένου ένα προϊόν να είναι ελκυστικό στον αγοραστή.

Ένα εξίσου σημαντικό πλεονέκτημα είναι ότι μπορεί να προκύψει εύκολα ένα υβριδικό νανοσύνθετο. Για παράδειγμα, για την κατασκευή μίας πολύστρωτης πλάκας με ίνες άνθρακα μπορεί να γίνει χρήση εποξικής ρητίνης ενισχυμένης με νανοσωλήνες άνθρακα αντί καθαρής ρητίνης, μέσω της μεθόδου RTM, γεγονός που μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την πρόσφυση μεταξύ των ινών άνθρακα και του πολυμερούς και άρα να βελτιώσει τις μηχανικές ή ακόμη και τις ηλεκτρικές ιδιότητες.

Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι τα νανοσύνθετα υπερτερούν των κοινών συνθέτων λόγω του ότι τα πρώτα χαρακτηρίζονται από χαμηλή πυκνότητα

και επομένως προκύπτουν νανοσύνθετα με ειδικές ιδιότητες που είναι πολύ υψηλότερες από εκείνες των κοινών συνθέτων.

Τα νανοσύνθετα υλικά αν και παρουσιάζουν πολλά και σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι των κοινών συνθέτων υλικών, παράλληλα παρουσιάζουν και κάποια μειονεκτήματα, τα οποία όμως δεν μπορούν να γενικευτούν. Το βασικότερο μειονέκτημα που παρουσιάζουν τα νανοσύνθετα υλικά πολυμερικής μήτρας είναι οι δυσκολίες που παρουσιάζονται στην κατασκευή τους. Ο λόγος

έγκειται στο ότι τα νάνο-εγκλείσματα έχουν την τάση να έλκονται μεταξύ τους, έλξη η οποία οφείλεται κυρίως σε δυνάμεις Van der Waals, δημιουργώντας συσσωματώματα. Τα συσσωματώματα πρέπει να «σπάσουν» κατά τη διαδικασία κατασκευής του συνθέτου, γεγονός που αποτελεί πονοκέφαλο για τους ερευνητές. Η ύπαρξη συσσωματωμάτων επιδρά αρνητικά στην μηχανική συμπεριφορά των νανোসυνθέτων για τους ακόλουθους λόγους<sup>30</sup>:

1. Ο βασικότερος λόγος είναι ότι τα νάνο-εγκλείσματα δεν συνεισφέρουν το μέγιστο δυνατό στις τελικές ιδιότητες του νανοσυνθέτου, καθότι οι διεπιφάνειες είναι υποβαθμισμένες σε σχέση με την κατά βάρος περιεκτικότητα.

2. Εξίσου σημαντικό είναι πως τα συσσωματώματα δεν έχουν πάντα συμπαγή δομή, έχουν χαμηλή πυκνότητα και ακανόνιστη μορφολογία και άρα λειτουργούν μέσα στο μητρικό υλικό ως ατέλειες ή κενά. Το αποτέλεσμα σε αυτή την περίπτωση είναι να μειώνεται σημαντικά η αντοχή του νανοσυνθέτου σε θραύση καθότι οι ατέλειες και τα κενά στην μικροδομή του υλικού αποτελούν περιοχές συγκέντρωσης τάσεων από όπου θα ξεκινήσουν οι μικρορωγμές οι οποίες θα οδηγήσουν, τελικά, το υλικό σε αστοχία. Μικρή υποβάθμιση μπορεί να υποστεί και η δυσκαμψία του νανοσύνθετου.

---

<sup>30</sup> Παπανικολάου, Γ., Μουζάκης, Δ., “Σύνθετα Υλικά”, 1η Έκδοση, Κλειδάριθμος, Πάτρα (2007), p.p. 407.

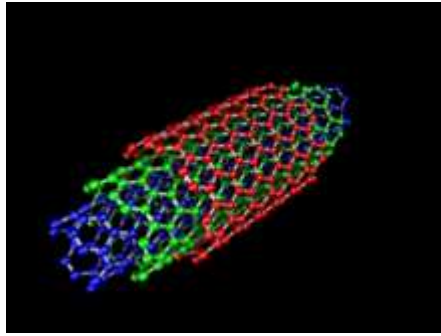


3. Όταν τα συσσωματώματα έχουν πιο συμπαγή δομή μπορεί να δράσουν σαν κόκκοι μικρο κλίμακας. Στην περίπτωση αυτή το νανοσύνθετο εκφυλλίζεται σε μικρο-σύνθετο, γεγονός απολύτως ανεπιθύμητο εφόσον η κατά βάρος περιεκτικότητα σε νάνο-εγκλείσματα δεν μπορεί να ξεπερνάει κατά πολύ το 5% ενώ παράλληλα το κόστος των νάνο-εγκλεισμάτων και γενικότερα το κόστος κατασκευής του νανοσύνθετου, συνήθως, είναι πολύ μεγαλύτερο.

Επομένως, για να προκύψουν οι επιθυμητές ιδιότητες των νανουσυνθέτων πρέπει κατ' αρχήν να υπάρξει ομογενής διασπορά των νάνο-εγκλεισμάτων μέσα στο μητρικό υλικό χωρίς τη παρουσία συσσωματωμάτων. Για να συμβεί αυτό χρειάζονται συνήθως χρονοβόρες διεργασίες που κοστίζουν καθώς απαιτούν και ακριβό εξοπλισμό. Φυσικά, τα νανοσύνθετα είναι σχετικά νέα υλικά και συνεχώς αναπτύσσονται μέθοδοι που διευκολύνουν την κατασκευή τους και μειώνουν το κόστος.

Τα νανοϋλικά αποτελούν στο σύνολό τους αντιμαχόμενο ζήτημα στην επιστημονική κοινότητα.

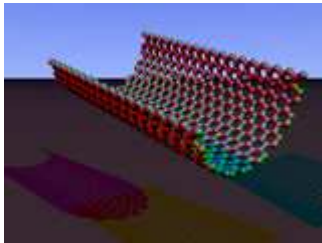
Αυτό προκύπτει από το ότι η ατομικής ή μοριακής κλίμακας διαστάσεις τους μπορεί να είναι επικίνδυνες για τον άνθρωπο και τη φύση. Τα νανοϋλικά μπορούν να εισχωρήσουν στον ανθρώπινο οργανισμό με μεγάλη ευκολία με αποτέλεσμα να υπάρχει κίνδυνος καρκινογένεσεων, οπότε και πρέπει να τηρούνται οι συνθήκες ασφαλείας. Όπως καθετί νέο, έτσι και τα νανοϋλικά και κατ' επέκταση τα νανοσύνθετα έχουν προσελκύσει τόσο το επιστημονικό όσο και το βιομηχανικό ενδιαφέρον. Η χρήση τους, όμως, πρέπει να είναι ορθολογική, να γίνεται με μέτρο και να στοχεύει στη βελτίωση της ποιότητας ζωής του ανθρώπου και όχι στο υπερκέρδος. Το γεγονός αυτό τονίζεται από επιστήμονες καθώς υπάρχει εμπειρία από το παρελθόν. Για παράδειγμα, τα πλαστικά μπήκαν στη ζωή του ανθρώπου και κατέκλυσαν τον κόσμο χωρίς να υπάρχει ενδιαφέρον για το περιβάλλον και μόνο ύστερα από πολύ μεγάλες πιέσεις χρησιμοποιούνται, πλέον, πλαστικά που είναι ανακυκλώσιμα και φιλικότερα προς το περιβάλλον.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΔΟΜΗ ΝΑΝΟΣΩΛΗΝΩΝ ΑΝΘΡΑΚΑ

### 2.1. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

---



Η βιβλιογραφία αναφέρει ότι η πρώτη ίνα άνθρακα παρασκευάστηκε από τον Τ.Α. Edison για την χρησιμοποίησή της σε ηλεκτρικό λαμπτήρα τον 19ο αιώνα<sup>31</sup>. Η πρώτη νύξη για την κυλινδρική φύση των νανοϊνών του άνθρακα γίνεται από τους Radushkevich και Lukyanovich το 1952<sup>32</sup>, δεκατρία χρόνια μετά την εμπορική παραγωγή ηλεκτρονικών μικροσκοπίων διέλευσης (Transmission Electron Microscopes, TEM), τα οποία επέτρεπαν την παρατήρηση της δομής και της μορφολογίας των νανοϊνών. Από τις TEM εικόνες της εργασίας τους, πιστοποιείται η παραγωγή πολυφλοιικών νανοσωλήνων άνθρακα διαμέτρου περίπου 50 nm. Το 1953 η ομάδα του Davis δημοσίευσε στο Nature μια εργασία της που ανέφερε την παραγωγή δομών άνθρακα που έμοιαζαν με νανοσωλήνες άνθρακα και προήλθαν από την διάσπαση του μονοξειδίου του άνθρακα σε καταλύτη οξειδίου του σιδήρου<sup>33</sup>. Ακολουθεί η δημοσίευση των Hillert και του Lange, το 1958, που αναφέρουν

<sup>31</sup> M.S. Dresselhaus and M. Endo, Top.Appl.Phys. 80 (2001) p.p.11-28

<sup>32</sup> L.V. Radushkevich and V.M. Lukyanovich, Zurn.Fisic.Chim. 26 (1952) p.88

<sup>33</sup> W.R.bDavis, R.J. Slawason and G.R. Rigby, Nature 171 (1953) p.756

την παραγωγή ομόκεντρων κυλίνδρων άνθρακα με διάφορες μορφολογίες, όπως οι σπειροειδείς και οι διακλαδώσεις<sup>34</sup>.

Τη δεκαετία του 1970 με την βελτίωση της ανάλυσης των μικροσκοπίων, η ομάδα του Baker δημοσιεύει δύο εργασίες στις οποίες κάνουν λόγο για ανάπτυξη νανοσωλήνων άνθρακα με διάσπαση του ακετυλενίου σε μεταλλικούς καταλύτες, όπως ο σίδηρος, το κοβάλτιο, το νικέλιο, το χρώμιο, αλλά και προτείνουν πιθανούς μηχανισμούς ανάπτυξης που είναι έως σήμερα οι δυο επικρατέστεροι<sup>35</sup>. Η επανάσταση στο χώρο όμως προήλθε από τη δημοσίευση του Ιάπωνα Iijima το 1991 στο περιοδικό Nature<sup>36</sup>. Παρατήρησε ότι ο νηματοειδής άνθρακας που παράγεται κατά την εξάχνωση των ηλεκτροδίων άνθρακα με την μέθοδο εκκένωσης ηλεκτρικού τόξου έχει σωληνοειδή μορφή διαμέτρου της τάξης του νανομέτρου και αποτελείται από δύο ή περισσότερα κυλινδρικά τοιχώματα (πολυφλοιικοί νανοσωλήνες άνθρακα). Η διάμετρος αυτής της νανοδομής κυμαινόταν από 4 ως 30 nm και το μήκος της προσέγγιζε το 1 μm. Την περίοδο αυτή η επιστημονική κοινότητα είχε στραφεί προς την νανοτεχνολογία, αφού είχε προηγηθεί και η πολύ σημαντική ανακάλυψη των φουλερινών το 1985<sup>37</sup>. Η δημοσίευση αυτής της εργασίας σε ένα τόσο διάσημο περιοδικό που είχαν πρόσβαση ακόμα και οι θεωρητικοί φυσικοί, προκάλεσε τη στροφή του ενδιαφέροντος προς τις νέες δομές του άνθρακα.

Η ιστορία των νανοσωλήνων άνθρακα (ΝΣΑ), σε αντίθεση με ότι πιστεύει η πλειοψηφία της ακαδημαϊκής κοινότητας και η ευρεία επιστημονική βιβλιογραφία που αποδίδει την ανακάλυψή τους στον S.Iijima (της εταιρείας NEC) το 1991<sup>38</sup>, ξεκινά από τους L.V. Radushkevich και M. Lukyanovich, που το 1992 δημοσίευσαν στο Soviet Journal of Physical Chemistry καθαρές φωτογραφίες νανοσωλήνων άνθρακα διαμέτρου 50nm.

---

<sup>34</sup> M. Hillert and N.Lange, Z. Kristallogr. 111 (1958) p.p 24-34

<sup>35</sup> R.T. Baker, M.A.Barber, P.S. Harris, I.S. Feates and R.J.Waite, J.Catal. 30 (1973) p.86

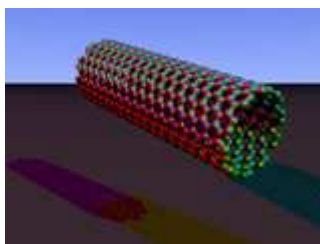
<sup>36</sup> S. Iijima, Nature 354 (1991) p.56

<sup>37</sup> H.W. Kroto, J.R. Heath, S.C. O'Brien, R.F. Curl and R.E. Smalley, Nature 318 (1985) p.162

<sup>38</sup> Παπαγεωργόπουλος, 1999.

Επίσης, πριν το 1991, αρκετοί επιστήμονες είχαν παρουσιάσει νανοσωλήνες άνθρακα που έχουν παραχθεί με διάφορες μεθοδολογίες και σε διαφορετικές συνθήκες (1976 Oberlin, Endo and Koyama, 1979, Abrahamson, 1981 σοβιετικοί επιστήμονες με δημοσίευσή τους στο *Investiya Akademii Nank*, 1987 G.H.Tennent). Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί πως ο S.Iijima βασίστηκε στην αρχική παρατήρηση των φουλερενίων το 1985 από τον H.Kroto<sup>39</sup>, στον οποίο απονεμήθηκε και το βραβείο Νόμπελ Χημείας το 1996 για την εργασία του πάνω στα φουλερένια.

Το 1993, ο Iijima και ο Ichihashi<sup>40</sup> παράλληλα με την ομάδα του Bethune<sup>41</sup>, δημοσιεύουν στο *Nature* σχεδόν ταυτόχρονα την ανάπτυξη μονοφλοιικών νανοσωλήνων άνθρακα. Από τότε έχουν δημοσιευτεί πολλές μελέτες που στοχεύουν κυρίως στην μαζική ανάπτυξη νανοσωλήνων με επιθυμητές φυσικές ιδιότητες.



---

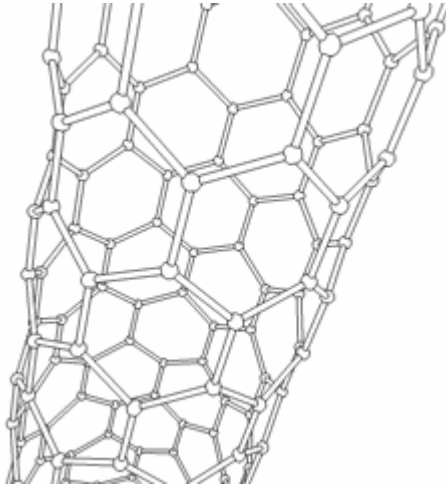
<sup>39</sup> Kroto HW, Heath JR, O'Brien SC, Curl RF, Smalley RE, (1985) C<sub>60</sub>:Buckminsterfullerene. *Nature*; 318:162–163.

<sup>40</sup> X.E.E. Reynhout and J.C. Reijenga, 'The Wondrous World of Carbon Nanotubes' Eindhoven University of Technology, (2003)

<sup>41</sup> D.S. Bethune, C.H. Klang, M.S. de Vries, G. Gorman, R. Savoy, J. Vazquez et al, *Nature* 363 (1993) 605

## 2.2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΝΑΝΟΣΩΛΗΝΩΝ ΑΝΘΡΑΚΑ

---



Οι ΝΣΑ είναι μακριά, λεπτά σωληνωτά δίκτυα των οποίων τα τοιχώματα απαρτίζονται από άτομα άνθρακα που έχουν εξαγωνική δομή και συχνά είναι καλυμμένα σε κάθε άκρη. Όλες οι παραπάνω ιδιότητες – χαρακτηριστικά μπορούν να μετρηθούν πάνω σε ένα μόνο νανοσωληνίσκο<sup>42</sup>. Η καθαρότητα της δομής των ΝΣΑ οδηγεί στις εκπληκτικές τιμές του μέτρου ελαστικότητας (1 Tera Pa) και εκπληκτική αντοχή (δεκάδες GPa), ενώ ταυτόχρονα εμφανίζουν παραμόρφωση θραύσης της τάξης του 20%<sup>43</sup>.

Υπάρχουν τρεις βασικοί τύποι νανοσωληνίσκων άνθρακα: οι Μονοτοιχωματικοί (ΜΤΝΣΑ- Single-Wall Carbon Nanotubes- SWCNTs), οι Δυχωματικοί (ΔΤΝΣΑ- Double-Wall Carbon Nanotubes-DWCNTs) και οι Πολυτοιχωματικοί (ΠΤΝΣΑ- Multi-Wall Carbon Nanotubes- MWCNTs). Το επιστημονικό και ερευνητικό ενδιαφέρον επικεντρώνεται στην εξερεύνηση της δομής τους και στους νόμους που τη διέπουν αλλά και στις μελλοντικές εφαρμογές τους. Οι πιο ενδιαφέρουσες ιδιότητες αυτών των δομών είναι τα ηλεκτρικά – ηλεκτρονικά, μηχανικά και χημικά χαρακτηριστικά τους τα οποία ανοίγουν το δρόμο για τη μελλοντική χρήση τους.

---

<sup>42</sup> Dresselhaus MS, Dresselhaus G, Avouris P (Eds.),(2001) Carbon Nanotubes, Springer, Berlin, Germany.

<sup>43</sup> Wunderlich, B., „Thermal Analysis“, Academic Press, London, 1990

Οι νανοσωλήνες άνθρακα περιγράφονται ως η κυρίαρχη διασημότητα του προηγμένου κόσμου των υλικών. Πρόσφατα ερευνητές στο Rice University and Rensselaer Polytechnic Institute τους χρησιμοποίησαν για να φτιάξουν «το κατάμαυρο μαύρο» -το σκοτεινότερο γνωστό υλικό, πού αντανακλά μόλις το 0,045% του φωτός που προσπίπτει σ' αυτό.

Το Sandia National Laboratories ασχολείται επίσης με τους νανοσωλήνες άνθρακα την έρευνα της οποίας ηγείται ο φυσικός Francois Léonard. Ο Λέοναρντ έχει σημαντική εμπειρία στο θέμα. Είναι ο συγγραφέας μιας επερχόμενης δουλειάς, της «Φυσικής Των Διατάξεων Νανοσωλήνων Άνθρακα», η οποία μπορεί και να αποτελέσει το απόλυτο εγχειρίδιο στο συγκεκριμένο θέμα. Οι νανοσωλήνες άνθρακα είναι μακρόστενοι κύλινδροι αποτελούμενοι εξολοκλήρου από άτομα άνθρακα. Παρόλο που οι διάμετροί τους είναι της τάξης των λίγων νανομέτρων (1-10 nm), μπορούν να είναι πολύ μεγάλοι σε μήκος της τάξης των λίγων εκατοστών. Ο δεσμός ανάμεσα στα άτομα του άνθρακα είναι πολύ ισχυρός κάνοντας έτσι τους νανοσωλήνες άνθρακα πολύ γερούς και ανθεκτικούς σε οποιαδήποτε παραμόρφωση. Οι ιδιότητες των άλλων μονοατομικών υλικών είναι προφανείς – π.χ. ο χρυσός είναι μέταλλο και το πυρίτιο ημιαγωγός. Οι νανοσωλήνες άνθρακα από την άλλη μεριά έχουν ένα είδος δισυπόστατης προσωπικότητας που δεν συναντάται σε άλλα υλικά κατασκευασμένα από ένα στοιχείο. Είναι ιδιαίτεροι διότι μπορούν να συμπεριφέρονται είτε ως μέταλλα είτε ως ημιαγωγοί. Ο Léonard εξηγεί πως αυτό είναι αποτέλεσμα της δομής των νανοσωλήνων άνθρακα καθώς ο τρόπος με τον οποίο τοποθετούνται στο νανοσωλήνα τα άτομα καθορίζει τις ηλεκτρονικές ιδιότητες. Για να το εξηγήσει αυτό σε μια ομάδα προπτυχιακών φοιτητών στο University of California, Berkeley, χρησιμοποίησε τρία ρολά σύρματος σε διαφορετικές γωνίες. Η κάθε διαφορετική γωνία προκαλεί διαφορετική γεωμετρία στους δεσμούς του σωλήνα και κατά συνέπεια και στις ηλεκτρονικές ιδιότητες<sup>44</sup>.

<sup>44</sup>

<http://www.infogenesis.gr/modules.php?name=News&file=article&sid=110>

Η εμπειρία του Léonard ξεκίνησε ακριβώς όταν το θέμα αυτό ερχόταν στην επιφάνεια. Ενώ η ανακάλυψη των νανοσωλήνων άνθρακα πιστώνεται στον Ιάπωνα φυσικό Sumio Iijima το 1991, η δουλειά πάνω στους νανοσωλήνες δεν είχε ξεκινήσει μέχρι τα τέλη του `90. Ο Léonard ήταν μεταδιδακτορικός στην IBM όταν οι ερευνητές εκεί έφτιαξαν το πρώτο τρανζίστορ από νανοσωλήνες άνθρακα<sup>45</sup>.

Σα θεωρητικός φυσικός ο Léonard εργαζόταν σε ανεξερεύνητη περιοχή. Από την αρχή δούλεψε πάνω σε μοντέλα προσπαθώντας να καταλάβει πως οι νανοσωλήνες άνθρακα συμπεριφέρονται σε διαφορετικές εφαρμογές. Συνεργάστηκε με την Sandia το 2000 όπου συνέχισε την έρευνά του.

Η ημιαγωγική πλευρά των σωλήνων είναι πολλά υποσχόμενη ως προς την ανάπτυξη των νανοηλεκτρονικών συσκευών. «Ένας νανοσωλήνας άνθρακα δημιουργεί ένα τρανζίστορ που έχει πλάτος 1 nm » , λέει ο Léonard. «Αυτό καθιστά εφικτή, από άποψη αρχών , την επίτευξη συσκευών πολύ υψηλών πυκνοτήτων συγκρινόμενες με τις ήδη υπάρχουσες. Οι ιδιότητες εκπομπής του πεδίου των νανοσωλήνων άνθρακα είναι επίσης συναρπαστικές. Οι Flat panel εφαρμογές γίνονται με υψηλής πυκνότητας αιχμηρές άκρες, στις οποίες παρέχεται υψηλή τάση ώστε να αποσπασούν ηλεκτρόνια. Αυτά τα ηλεκτρόνια χτυπούν και ενεργοποιούν τα pixels στην οθόνη. Οι νανοσωλήνες άνθρακα μπορούν να υπηρετήσουν το σκοπό επειδή είναι πολύ αιχμηροί και μακρόστενοι και μπορούν να συντηρήσουν υψηλά πεδία και υψηλές θερμοκρασίες.

Οι ερευνητές έχουν αποδείξει την ικανότητα κατασκευής τέτοιων διατάξεων με νανοσωλήνα άνθρακα. Σε πρόσφατο συνέδριο ένας επιστήμονας έπαιξε το "Layla" του Eric Clapton χρησιμοποιώντας ως ραδιοδέκτη μια συσκευή νανοσωλήνα άνθρακα.

Μια άλλη δυνατή χρήση μπορεί να είναι σε χημικούς και βιολογικούς ανιχνευτές. Οι νανοσωλήνες μπορούν λόγω της μικρής διαμέτρου τους να

---

<sup>45</sup> <http://www.infogenesis.gr/modules.php?name=News&file=article&sid=110>

χρησιμοποιηθούν ως πολύ ευαίσθητοι ανιχνευτές ακόμα και για να ανιχνεύσουν ένα μόριο κάποιας συγκεκριμένης ουσίας. Η ανίχνευση του DNA επίσης έχει αποδειχτεί. Προς το παρόν ο Léonard και οι συνεργάτες του, μεταξύ αυτών και ο Lockheed Martin, προσπαθούν να αναπτύξουν οπτικούς ανιχνευτές χρησιμοποιώντας τους νανοσωλήνες άνθρακα.

Τέλος έχουν μοναδικές ιδιότητες ως προς την απορρόφηση του φωτός. Το μήκος κύματος στο οποίο το φως απορροφάται μπορεί να ελεγχθεί από νανοσωλήνες διαφορετικών διαμέτρων. Το πιο σημαντικό είναι ότι η διαδικασία κατασκευής συσκευών μπορεί να είναι απόλυτα συμβατή με τις κατασκευαστικές διαδικασίες της ημιαγωγικής βιομηχανίας. Ο Léonard ενδιαφέρεται επιπλέον για την ηλεκτρονική μεταφορά και σε άλλες νανοδομές, από τους νανοσωλήνες μέχρι και τα απλά μόρια. Η ερώτηση που προκύπτει λέει είναι το πως μεταφέρεται το ρεύμα στις νανοδομές και ακόμα πώς μεταφέρονται τα ηλεκτρόνια σε υλικά που διαφέρουν από τα συμβατικά<sup>46</sup>!

### **2.2.1. ΜΟΝΟΦΛΟΙΚΟΙ ΝΑΝΟΣΩΛΗΝΕΣ ΑΝΘΡΑΚΑ (SWCNTs)**

---

Οι μονοφλοιικοί νανοσωλήνες άνθρακα αποτελούνται από ένα γραφитικό φύλλο τυλιγμένο σε καθορισμένη διεύθυνση σε κυλινδρικό σχήμα. Οι SWCNTs μπορεί να είναι κλειστοί στα άκρα τους από 'καπάκια' με ημισφαιρική δομή, όπως αυτή των φουλερινών.

Συνεπώς, περιέχουν και πεντάγωνα στα άκρα τους εκτός από εξάγωνα. Η διάμετρός τους δεν ξεπερνάει τα 2 nm, ενώ το μήκος τους πολλές φορές φτάνει και τα 5 μm. Ο τρόπος ή η διεύθυνση κατά την οποία τυλίγεται το εξαγωνικό γραφитικό φύλλο καθορίζεται από το διάνυσμα chiral.

### **2.2.2. ΠΟΛΥΦΛΟΙΚΟΙ ΝΑΝΟΣΩΛΗΝΕΣ ΑΝΘΡΑΚΑ (MWCNTs)**

---

Οι πολυφλοιικοί νανοσωλήνες άνθρακα αποτελούνται από μια σειρά από γραφитικά φύλλα, τα οποία είναι τυλιγμένα ομοκεντρικά το ένα μέσα στο άλλο. Η διάμετρός τους συνήθως κυμαίνεται μεταξύ των 3 και των 250

<sup>46</sup> Πηγή: Sciencedaily May 28, 2008



νανομέτρων. Η απόσταση μεταξύ των τοιχωμάτων τους προσεγγίζει την απόσταση μεταξύ δύο γραφικών φύλλων (0.335 nm)<sup>47</sup>. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχουν προσελκύσει τα τελευταία χρόνια οι πολυφλοιικοί νανοσωλήνες άνθρακα που περιλαμβάνουν δυο γραφικά φύλλα (Double-Walled Carbon Nano-Tubes, DWCNTs). Οι ιδιότητες τους είναι παρόμοιες με αυτές των μονοφλοιικών<sup>48</sup>.

Παρουσιάζουν το πλεονέκτημα ότι τροποποιούνται χημικά πιο εύκολα από τους φλοιικούς, στους οποίους για να προστεθεί χημικά μια ομάδα χρειάζεται να σπάσουν ορισμένοι διπλοί δεσμοί. Με αυτόν τον τρόπο προκαλούνται κενά στη δομή των SWCNTs και συνεπώς μεταβάλλονται οι ηλεκτρικές και οι μηχανικές τους ιδιότητες. Σε αντίθεση, στους DWCNTs τροποποιείται μόνο το εξωτερικό τοίχωμα.

## **2.3. ΝΑΝΟΔΟΜΕΣ ΑΝΘΡΑΚΑ**

---

### **2.3.1. Φουλλερίτια και Φουλλερένια**

Τα φουλλερίτια είναι η διακριτή στερεή κατάσταση των φουλλερενίων. Όντας ισχυρά ασυμπίεστη μορφή νανοσωλήνα, οι πολυμερισμένοι νανοσωλήνες άνθρακα μονού τοιχώματος (P-SWNTs) είναι μια κατηγορία fullerenes που μπορούν να συγκριθούν με το διαμάντι όσον αφορά τη σκληρότητα. Παρ' όλα αυτά εξαιτίας του τρόπου με τον οποίο οι νανοσωλήνες διαβρέχονται, τα P-SWNTs δεν παρουσιάζουν την αντίστοιχη κρυσταλλική δομή με αποτέλεσμα να μην μπορούν να κόψουν «καθαρά» το διαμάντι. Αυτή η δομή έχει σαν αποτέλεσμα ένα λιγότερο ψαθυρό υλικό, καθώς οποιαδήποτε κρούση την οποία θα δεχόταν το υλικό αυτό θα επιδρούσε σε όλη τη δομή του υλικού.

---

<sup>47</sup> K.S. Triantafyllidis, S.A. Karakoulia, D. Gournis, A.Delimitis, L. Nalbandian, E.Maccallini, P. Rudolf, Micropor. Mesopor. Mat. 110 (2008) 128-140

<sup>48</sup> K.B.Kouravelou, S.V.Sotirchos, X.E. Verykios, Surf. Coat. Tech. 201 (2007) 9226 – 9231

Στα μέσα της δεκαετίας του 1980, ο Kroto, ο Smalley και οι συνεργάτες<sup>49</sup> ανέπτυξαν τη Χημεία των φουλλερενίων στο Rice University για το οποίο απονεμήθηκε και βραβείο Nobel Χημείας το 1996. Τα φουλλερένια είναι δομές άνθρακα που προκύπτουν, όπως και οι νανοσωλήνες, από πλέγμα γραφίτη το οποίο δημιουργεί κούφια κλειστή σφαιρική δομή και όχι κούφια κυλινδρική δομή. Η πρώτη δομή φουλλερενίων ήταν αυτή που δομείται από εξήντα άτομα άνθρακα (C<sub>60</sub>), δομή ιδιαίτερα σταθερή η οποία καλείται μπάλα του Μπάκυ ή «φουλλερίνη μπάκμινστερ» προς τιμήν του R.Buckminster Fuller, κατασκευαστή των σύγχρονων γεωδαιτικών θόλων. Τα φουλλερένια αξιοποιούνται ως ενισχυτικά μέσα για την βελτίωση των ηλεκτρικών ιδιοτήτων ενός νανοσυνθέτου.

### **2.3.2. TORUS**

Ένα nanotorus είναι ένας νανοσωλήνας άνθρακα ο οποίος τυλίγεται και ενώνεται στα δύο του άκρα σχηματίζοντας ένα «donut». Έχουν πολύ ξεχωριστές ιδιότητες όπως μαγνητική ροπή 1000 φορές μεγαλύτερη από ότι αναμενόταν για συγκεκριμένες τιμές ακτίνας. Ιδιότητες όπως μαγνητική ορμή, και η θερμική σταθερότητα ποικίλουν έντονα εξαρτώμενα από την ακτίνα τόσο του torus όσο και του νανοσωλήνα.

### **2.3.3. NANOKNOTS**

Οι νανοσωλήνες άνθρακα χρησιμοποιούνται για την κατασκευή νανοσχοινίων (nanoropes). Με τα σχοινιά αυτά φτιάχνονται κόμπι, τα nanoknots. Ουσιαστικά κλωστές που κατασκευάζονται από μονοτοιχωματικούς νανοσωλήνες άνθρακα οι οποίες είναι ανθεκτικές αρκετά ώστε να μη σπάσουν όσο σφικτά και αν δεθούν, με αποτέλεσμα να κατασκευάζονται σε μέγεθος μερικών μικρών. Με τα nanoknots προσδοκάται ουσιαστικά να εμφανισθούν χαρακτηριστικά του υλικού που δεν εμφανίζονται στα νανοσχοινιά χωρίς αυτούς τους κόμπους, όπως για παράδειγμα καλύτερη πρόσφυση.

---

<sup>49</sup> Kroto, H.W., Heath, J.R., O'Brien, S.C., Curl, R.F., Smalley, R.E., Nature, 318 (1985), p.p. 162-163.

#### **2.3.4. NANOΪΝΕΣ**

Οι νανοΐνες άνθρακα μπορούν να συγκριθούν με τους πολυτοιχωματικούς νανοσωλήνες άνθρακα μεγάλης διαμέτρου. Οι νανοΐνες έχουν μέτριες ηλεκτροχημικές ιδιότητες και η εισαγωγή τους σε πολυμερή είναι ευκολότερη λόγω της μεγάλης διαμέτρου, που κυμαίνεται στα 50-200nm. Κατά το μήκος τους παρουσιάζουν ασυνεχή δομή, ασυνέχεια η οποία εμφανίζεται στα σημεία περάτωσης κάθε τοιχίου. Οι νανοΐνες παρασκευάζονται με χημική απόθεση ατμών, μέθοδο με την οποία μπορεί να καθοριστεί και η πυκνότητά τους, να προκύψουν δηλαδή νανοΐνες χαμηλής ή υψηλής πυκνότητας.

Τέλος, πρέπει να σημειωθεί πως υπάρχουν και άλλοι τύποι νανοσωλήνων πέρα από τους νανοσωλήνες άνθρακα. Οι πιο γνωστοί νανοσωλήνες που προετοιμάζονται για ολοένα και περισσότερες εφαρμογές είναι οι νανοσωλήνες:

- Φωσφόρου
- Τιτανίου
- Μονοξειδίου τιτανίου

## 2.4. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΝΑΝΟΣΩΛΗΝΩΝ ΑΝΘΡΑΚΑ.

---

Οι νανοσωλήνες άνθρακα παρουσιάζουν πολύ ενδιαφέρουσες ιδιότητες λόγω όχι μόνο της συσσωμάτωσης που μπορεί να επιτευχθεί μεταξύ τους, γεγονός που οδηγεί στο σχηματισμό δεσμίδων (bundles) από νανοσωλήνες διαφορετικών διαμέτρων αλλά και των ατελειών που μπορούν να σχηματιστούν στα άκρα (end caps) καθώς και στη επιφάνεια τους (sidewall) κατά τη διάρκεια της παρασκευής τους<sup>50</sup>.

Όσον αφορά για τις ηλεκτρικές τους ιδιότητες, οι νανοσωλήνες άνθρακα λόγω τις δομής τους μπορεί να επιδεικνύουν συμπεριφορά είτε μετάλλου είτε ημιαγωγού ανάλογα με τον τρόπο αναδίπλωσης του γραφίτικού φύλλου. Με βάση έναν απλό εμπειρικό κανόνα, όταν η ποσότητα  $(n + m) / 3$  είναι ακέραιος τότε ο νανοσωλήνας έχει συμπεριφορά μετάλλου, ειδάλλως ημιαγωγού. Τέλος, το εύρος του ενεργειακού χάσματος είναι αντιστρόφως ανάλογο της διαμέτρου του νανοσωλήνα<sup>51</sup>.

Οι μηχανικές ιδιότητες των νανοσωλήνων είναι πολύ σημαντικές επειδή τα νανοεγκλείσματα αποτελούν δομικά στοιχεία ενίσχυσης των νανοσύνθετων υλικών. Η μικρή διάμετρος νανοσωλήνων άνθρακα έχει πολύ σημαντική επίδραση στις μηχανικές ιδιότητες σε σύγκριση με τις παραδοσιακές ίνες γραφίτη. Πιθανότατα το πιο εκπληκτικό γεγονός είναι η δυνατότητα να συνδυάσουμε την υψηλή ελαστικότητα και την υψηλή αντοχή με την υψηλή ακαμψία, ένα χαρακτηριστικό που λείπει από τις ίνες γραφίτη.

Οι γενικές ιδιότητες των CNTs έχουν συζητηθεί σε μεγάλο αριθμό δημοσιεύσεων<sup>52</sup>.

---

<sup>50</sup> A.Hirsch: Angew Chem.Int.Ed 41, p11 (2002)

<sup>51</sup> W.J.Kim,H.L.Usrey, M.S.Strano: Chem.Mater 19, pp1571-1576 (2002)

<sup>52</sup> R. H. Baughman, A. A. Zakhidov, W. A. de Heer, Science 2002, 297, 787.

### 2.4.1. ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

---

Ο κυριότερος παράγοντας ο οποίος καθορίζει τις ηλεκτρονικές ιδιότητες ενός νανοσωλήνα είναι ότι τα ηλεκτρόνια του είναι χωρικά περιορισμένα. Μπορούν να κινηθούν μόνο στο χώρο του γραφίτη κι όχι κατά την κάθετη στον άξονα του διεύθυνση. Επιπλέον, καθώς το μήκος του είναι πολύ μεγαλύτερο από τη διάμετρο του οι επιτρεπόμενες ηλεκτρονικές καταστάσεις κατά την αξονική διεύθυνση θα είναι πολύ περισσότερες από αυτές κατά την περιφερειακή. Ως εκ τούτου, η πεπερασμένη περιφέρεια και μήκος του νανοσωλήνα εισάγουν οριακές συνθήκες οι οποίες έχουν ως αποτέλεσμα διακριτές ενεργειακές στάθμες και οι νανοσωλήνες παρουσιάζουν τόσο μεταλλική όσο και ημιαγώγιμη συμπεριφορά. Η σχέση μεταξύ των  $n$  και  $m$ , είναι ένα μέτρο για το αν ο νανοσωλήνας θα παρουσιάζει μεταλλική ή ημιαγώγιμη συμπεριφορά. Για έναν  $(n, m)$  νανοσωλήνα, αν ισχύει:  $n-m=3q$ , όπου  $q$  ακέραιος, τότε ο νανοσωλήνας ανήκει στα μέταλλα. Αν όχι, ο νανοσωλήνας ανήκει στους ημιαγωγούς. Σύμφωνα επομένως με την παραπάνω σχέση, όλοι οι armchair νανοσωλήνες και το ένα τρίτο των zigzag είναι μέταλλα<sup>53</sup>.

### 2.4.2. ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

---

Από τη στιγμή που οι νανοσωλήνες άνθρακα ανακαλύφθηκαν αναμενόταν ότι θα παρουσίαζαν εκπληκτικές μηχανικές ιδιότητες, κατ' αναλογία με το γραφίτη.

Ήταν για αρκετό καιρό γνωστό ότι ο γραφίτης είχε μέτρο ελαστικότητας στη διεύθυνση των επιπέδων του περίπου  $1.06 \text{ TPa}$ <sup>54</sup> και οι νανοσωλήνες αναμενόταν να εμφανίζουν παρόμοια τιμή. Παρόλο που η αντοχή σε εφελκυσμό του γραφίτη δεν ήταν επακριβώς γνωστή, ο Perepelkin την εκτίμησε να φτάνει τα  $130 \text{ GPa}$ , με βάση τις ιδιότητες των δεσμών C-C<sup>55</sup>.

---

<sup>53</sup> .M. Rodriguez, J. Mater. Res. 8, 3233 (1993).

<sup>54</sup> B. Kelly, "Physics of graphite", London, Applied Science, 1981

<sup>55</sup> A. Kelly, N. Macmillan, "Strong solids". Oxford University Press, 1986

Εξάλλου ο Bacon είχε παρασκευάσει γραφίτικα ινίδια το 1960 με τάση διαρροής 20 GPa<sup>56</sup>. Επομένως, οι προσδοκίες για τους νανοσωλήνες άνθρακα ήταν να επιδείξουν ανάλογα υψηλή τάση και ελαστικότητα.

Οι νανοσωλήνες άνθρακα χαρακτηρίζονται από υψηλή αντοχή χάρη στους sp<sup>2</sup> δεσμούς C-C που σχηματίζονται μεταξύ των ατόμων. Πειραματικά και θεωρητικά αποτελέσματα<sup>57</sup> έχουν δείξει ότι ένα μέτρο ελαστικότητας μεγαλύτερο από 1 TPa και έχουν αναφέρει αντοχή 10-100 φορές υψηλότερη από εκείνη του χάλυβα, με μόλις ένα κλάσμα του βάρους τους<sup>58</sup>. Επιπρόσθετα έχει βρεθεί ότι οι νανοσωλήνες άνθρακα είναι πολύ εύκαμπτοι, μπορούν να επιμηκυνθούν, να διπλώσουν, να γίνουν επίπεδοι ή και ακόμα να δημιουργήσουν κύκλους πριν σπάσουν.

Πολύ πριν σημαντικές ποσότητες νανοσωλήνων υπάρξουν διαθέσιμες για μηχανικές μετρήσεις, ένας αριθμός εργασιών είχαν χρησιμοποιήσει προσομοιώσεις υπολογιστών για να μελετήσουν τις ιδιότητές τους. Ήδη από το 1993, ο Verney και οι συνεργάτες του<sup>59</sup> υπολόγισαν το μέτρο ελαστικότητας κοντών SWNT στα 1500 GPa, παρόμοιο με αυτό του γραφίτη. Ακολούθησε πλήθος εργασιών που το προέβλεπαν κοντά στο 1 TPa και ανεξάρτητο από τον τύπο του νανοσωλήνα και τη διάμετρο<sup>60</sup>.

Η πρώτη ακριβής μηχανική μέτρηση έγινε σε MWNT που είχαν παραχθεί με τη μέθοδο τόξου-εκκένωσης. Καθώς ήταν διαθέσιμες μόνο μικρές ποσότητες, οι πρώτες μετρήσεις εκτελέστηκαν σε TEM. Ο Treacy και η ομάδα

---

<sup>56</sup> R. Bacon, "Growth, structure, and properties of graphite whiskers", *J. Appl. Phys.* 31, 283–290 (1960)

<sup>57</sup> P. Serp, M. Corrias and P. Kalck, *Appl. Catal. A: Gen.* 253, 337 (2003).

<sup>58</sup> A. Thess, R. Lee, P. Nikolaev, H. Dai, P. Petit, J. Robet, C. Xu, Y.H. Lee, S.G. Kim, A. Rinzler, D.T. Colbert, G. Scuseria, D. Tomanek, J.E. Fischer and R. Smalley, *Science* 273, 483 (1996).

<sup>59</sup> G. Overney, W. Zhong, D. Tomanek, "Structural rigidity and lowfrequency vibrational-modes of long carbon tubules", *Z. Phys. D—At. Mol. Clusters* 27, 93–96 (1993)

<sup>60</sup> J. Lu, "Elastic properties of single and multilayered nanotubes", *J. Phys. Chem. Solids* 58, 1649–1652 (1997)

του<sup>61</sup> μέτρησαν το εύρος των εγγενών θερμικών δονήσεων που παρατηρήθηκαν στο TEM. Το χρησιμοποίησαν για να υπολογίσουν το μέτρο ελαστικότητας για έναν αριθμό νανοσωλήνων και βρέθηκε 0.41-4.15 TPa. Τρία χρόνια αργότερα ο Poncharal επιφέροντας ηλεκτρομηχανικές δονήσεις συντονισμού έδωσε τιμές 0.7-1.3 TPa<sup>62</sup>.

Εξάλλου ο Falvo et al παρατήρησαν αναστρέψιμη κάμψη των MWNT με ακτίνα καμπυλότητας περίπου 25 nm, υποδεικνύοντας πρωτοφανή ευκαμψία<sup>63</sup>.

Η πρώτη απευθείας μέτρηση έγινε από τον Wong et al το 1997<sup>64</sup>. Χρησιμοποίησαν ένα μικροσκόπιο ατομικής δύναμης (AFM) για να μετρήσουν το μέτρο ελαστικότητας MWNT πακτωμένου στη μία άκρη. Η τιμή που μέτρησε ήταν κατά μέσο όρο 1.28 TPa. Το σημαντικότερο όμως είναι ότι έκανε τις πρώτες μετρήσεις αντοχής, βρίσκοντας την αντοχή κάμψης 14 GPa. Ο Salvétat και η ομάδα του με παρόμοια μέθοδο βρήκαν το συντελεστή ελαστικότητας περίπου 810 GPa.<sup>65</sup>

Οι τελευταίες μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν έγιναν από τον Yu και τους συνεργάτες του το 2000 όταν κατάφεραν να κάνουν μετρήσεις τάσης-παραμόρφωσης σε MWNT μέσα σε ένα ηλεκτρονικό μικροσκόπιο (SEM)<sup>66</sup>. Για ένα πλήθος νανοσωλήνων μέτρησαν τιμές μέτρου ελαστικότητας 0.27-0.95 TPa. Πιο ενδιαφέροντα ήταν τα αποτελέσματα που αφορούσαν την

---

<sup>61</sup> M. Treacy, T. Ebbesen, J. Gibson, "Exceptionally high Young's modulus observed for individual carbon nanotubes", *Nature* 381, 678–680 (1996)

<sup>62</sup> P. Poncharal, Z. Wang, D. Ugarte, W. de Heer, "Electrostatic deflections and electromechanical resonances of carbon nanotubes", *Science* 283, 1513–1516 (1999)

<sup>63</sup> M. Falvo, G. Clary, R. Taylor, V. Chi, F. Brooks, S. Washburn et al, "Bending and buckling of carbon nanotubes under large strain", *Nature* 389, 582–584 (1997)

<sup>64</sup> E. Wong, P. Sheehan, C. Lieber, "Nanobeam mechanics: elasticity, strength, and toughness of nanorods and nanotubes", *Science* 277, 1971–1975 (1997)

<sup>65</sup> J. Salvétat, A. Kulik, J. Bonard, G. Briggs, T. Stockli, K. Metenier et al, "Elastic modulus of ordered and disordered multiwalled carbon nanotubes", *Adv. Mater.* 11 161–165 (1999)

<sup>66</sup> M. Yu, O. Lourie, M. Dyer, T. Kelly, R. Ruoff, "Strength and breaking mechanism of multiwalled carbon nanotubes under tensile load", *Science* 287, 637–640 (2000)

παραμόρφωση, η οποία έφτασε μέχρι και 12 %, και την αντοχή, που κυμάνθηκε στο εύρος 11-63 GPa. Αυτό επιτρέπει μια εκτίμηση της σκληρότητας του νανοσωλήνα περίπου στα 1240 J/g. Άλλωστε, θραύση παρατηρήθηκε μόνο στο εξωτερικό τοίχωμα του MWNT, με τα εσωτερικά τοιχώματα να αυξομειώνουν το μήκος τους σαν ένα μηχανισμό «ξίφους-θήκης».

Οι μετρήσεις πάνω σε SWNT άργησαν να επιτευχθούν λόγω της δυσκολίας χειρισμού τους. Οι πρώτες μετρήσεις έγιναν από τον Salvétat et al χρησιμοποιώντας με μια μέθοδο με AFM<sup>67</sup>. Παρατήρησαν μέτρο ελαστικότητας περίπου 1 TPa για δέσμες SWNT μικρής διαμέτρου με μεθόδους κάμψης. Οι μετρήσεις σε δέσμες μεγαλύτερης διαμέτρου απέτυχαν λόγω διολίσθησης των νανοσωλήνων μεταξύ τους. Επίσης ο Yu et al μέτρησαν μηχανικές ιδιότητες δεσμών νανοσωλήνων με την ίδια μέθοδο που χρησιμοποίησαν για τις μετρήσεις τους σε MWNT. Τα αποτελέσματα ήταν 0.32-1.47 TPa για το μέτρο ελαστικότητας, 10-52 GPa για την αντοχή και 5.3 % για την παραμόρφωση. Η σκληρότητα υπολογίστηκε στα 770 J/g. Η θραύση παρατηρήθηκε σε νανοσωλήνες που βρίσκονταν περιμετρικά τη δέσμης, ενώ οι υπόλοιποι νανοσωλήνες διολίσθησαν μεταξύ τους<sup>68</sup>.

Η διολίσθηση στο εσωτερικό των δεσμών θέτει ένα σοβαρό περιορισμό στις μηχανικές τους ιδιότητες. Το χαμηλό μέτρο διάτμησης σημαίνει ότι το μέτρο ελαστικότητας και η αντοχή για δέσμες νανοσωλήνων SWNT απέχουν πολύ από τις τιμές που αναμένονται για μεμονωμένους νανοσωλήνες. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο διαχωρισμός των δεσμών είναι εξαιρετικά δύσκολος. Ο Forgo και οι συνεργάτες του έδειξαν ότι SWNT μπορούν να συνενωθούν σε δέσμες εάν υποβληθούν σε ακτινοβόληση ηλεκτρονίων<sup>69</sup>. Με λεπτούς

---

<sup>67</sup> J. Salvétat, G. Briggs, J. Bonard, R. Bacsa, A. Kulik, T. Stockli T et al, “Elastic and shear moduli of single-walled carbon nanotubes ropes”, Phys. Rev. Lett. 82, 944–947 (1999)

<sup>68</sup> M. Yu, B. Files, S. Arepalli, R. Ruoff, “Tensile loading of ropes of single wall carbon nanotubes and their mechanical properties”, Phys. Rev. Lett. 84, 5552–5555 (2000)

<sup>69</sup> C. Miko, M. Milas, J. Seo, E. Coureau, N. Barisic, R. Gaal et al, “Effect of electron irradiation on the electrical properties of fibers of aligned single-walled carbon nanotubes”, Appl. Phys. Lett. 83, 4622–4624 (2003)



χειρισμούς της ποσότητας και της ενέργειας της ακτινοβολίας βρήκαν ότι μπορούν να αυξήσουν το μέτρο κάμψης των δεσμών στα 750 GPa, πλησιάζοντας αυτό των μεμονωμένων νανοσωλήνων.

Οι σχετικά υψηλές τιμές ελαστικότητας και τάσης των περίπου 1 TPa και δεκάδων GPa αντίστοιχα μετρήθηκαν σε SWNT υψηλής ποιότητας και MWNT που παρήχθησαν με τη μέθοδο τόξου εκκένωσης. Ωστόσο όπως αναφέραμε και προηγουμένως, οι MWNT που παράγονται με τη μέθοδο CVD αναμένεται να έχουν σημαντικά χαμηλότερες τιμές. Οι πρώτες μετρήσεις έγιναν πάλι από τον Salvetat και τους συνεργάτες του χρησιμοποιώντας την τεχνική με το AFM. Το μέτρο ελαστικότητας που μετρήθηκε ήταν μεταξύ 12 και 50 GPa<sup>70</sup>. Σχεδόν αμέσως ο Xie και η ομάδα του έκαναν μετρήσεις τάσης-παραμόρφωσης σε δέσμες MWNT προερχόμενες από CVD<sup>71</sup>. Οι τιμές που πήραν ήταν 0.45 TPa για το μέτρο του Young και περίπου 4 GPa για την αντοχή. Η πολύ μεγάλη μείωση στο μέτρο ελαστικότητας για τους MWNT από CVD σε σχέση με αυτούς από τόξο εκκένωσης δείχνει σαφώς ότι η τιμή αυτή είναι πολύ ευαίσθητη στη συγκέντρωση ατελειών.

Όπως είδαμε, οι μηχανικές ιδιότητες των νανοσωλήνων είναι εξαιρετικές. Ήταν αναμενόμενο λοιπόν να προκαλέσουν αμέσως το ενδιαφέρον των ερευνητών για την εκμετάλλευσή τους σε εφαρμογές που απαιτούν υλικά υψηλής μηχανικής απόδοσης. Και αυτό μπορεί να γίνει με τον προσεκτικό σχεδιασμό και κατασκευή σύνθετων υλικών που περιλαμβάνουν νανοσωλήνες άνθρακα.

---

<sup>70</sup> J. Salvetat, A. Kulik, J. Bonard, G. Briggs, T. Stockli, K. Metenier et al, “Elastic modulus of ordered and disordered multiwalled carbon nanotubes”, *Adv. Mater.* 11 161–165 (1999)

<sup>71</sup> S. Xie, W. Li, Z. Pan, B. Chang, L. Sun, “Mechanical and physical properties on carbon nanotubes”, *J. Phys. Chem. Solids* 61, 1153–1158 (2000)

### 2.4.3. ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

---

Έχουν πραγματοποιηθεί μελέτες για τη θερμική αγωγιμότητα των νανοσωλήνων άνθρακα. Και σε αυτή τη περίπτωση θεωρούμε τον μονοφλοιϊκό νανοσωλήνα άνθρακα ως ένα διπλωμένο γραφιτικό φύλλο, στο οποίο όλα τα φαινόμενα μεταφοράς λαμβάνουν χώρα κατά μήκος του άξονα και συνεπώς η θερμική αγωγιμότητα που μετρείται σε αυτήν την κατεύθυνση είναι πολύ υψηλότερη από την αντίστοιχη σε κάθετη διεύθυνση. Η θερμική αγωγιμότητα για μονοφλοιϊκούς νανοσωλήνες άνθρακα έχει υπολογιστεί τόσο από πειραματικές<sup>72</sup> όσο και από θεωρητικές<sup>73</sup> μελέτες ότι κυμαίνεται από 3000 ως 6500 W/m-K.

### 2.4.4. ΟΠΤΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

---

Ένα ακόμα από τα χαρακτηριστικά των νανοσωλήνων άνθρακα είναι ότι μπορούν να απορροφούν ή να σκεδάζουν το φως, αλλά και να φθορίζουν, ανάλογα με τη διάμετρο και τη χειρομορφία τους. Δηλαδή οπτικές μετρήσεις μπορούν να οδηγήσουν στον καθορισμό των χαρακτηριστικών διανυσμάτων του σωλήνα αλλά και της διαμέτρου<sup>74</sup>. Επιπρόσθετα έχει αναφερθεί πως και το μήκος του νανοσωλήνα επηρεάζει τις οπτικές του ιδιότητες και μάλιστα η αύξησή του εμπλουτίζει την ικανότητα του να απορροφά το φως, αλλά και να φθορίζει στο κοντινό υπέρυθρο φάσμα<sup>75</sup>.

---

<sup>72</sup> M.M. Waje, X. Wang, W. Li, Y. Yan, *Nanotechnology* 16 (2005) 395-400.

<sup>73</sup> C.C. Chen, C.F. Chen, C.H. Hsu, I.H. Li, *Diamond & Related Materials* 14 (2005) 770-773.

<sup>74</sup> Y. Liang, H. Zhang, B. Yi, Z. Zhang, Z. Tan, *Carbon* 43 (2005) 3144-3152.

<sup>75</sup> T. Yoshitake, Y. Shimakawa, S. Kuroshima, H. Kimura, T. Ichihashi, Y. Kubo, D. Kasuya, K. Takahashi, F. Kokai, M. Yudasaka, S. Iijima, *Physica B* 323 (2002) 124-126.

## 2.5. ΤΡΟΠΟΙ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ ΝΑΝΟΣΩΛΗΝΩΝ ΑΝΘΡΑΚΑ.

---

Τέσσερις μέθοδοι κυριαρχούν στην παραγωγή νανοσωλήνων άνθρακα. Οι μέθοδοι αυτές λαμβάνουν χώρα στην αέριο φάση. Πρόκειται για την ηλεκτρική εκκένωση παρουσία γραφίτη (Carbon Arc ή Arc-Discharge), την εξαέρωση γραφίτη μέσω παλμικού laser (Laser Ablation ή Pulsed Laser Vaporization-PLV), την εναπόθεση αερίων υδρογονανθράκων (Chemical Vapor Deposition-CVD) και την μετατροπή μονοξειδίου του άνθρακα υπό υψηλή πίεση (High-Pressure CO Conversion-HiPCO).

### **1. Ηλεκτρική Εκκένωση Παρουσία Γραφίτη (Carbon Arc ή Arc-Discharge)**

Η μέθοδος αυτή οδηγεί στην παραγωγή πολύ καλής ποιότητας νανοσωλήνων πολλαπλού και απλού τοιχώματος. Για την παραγωγή των νανοσωλήνων χρησιμοποιούνται δύο ηλεκτρόδια γραφίτη για την ηλεκτρική εκκένωση παρουσία συνεχούς ρεύματος υψηλής εντάσεως. Για την παραγωγή νανοσωλήνων απλού τοιχώματος, η άνοδος “ενισχύεται” συνήθως με Νικέλιο ή Κοβάλτιο. Κατόπιν, και κατά την διάρκεια της αποφόρτισης, μία ράβδος άνθρακα δημιουργείται στην κάθοδο οδηγώντας στον σχηματισμό τόσο νανοσωλήνων όσο και άμορφου άνθρακα. Η πίεση του αερίου ηλίου, που χρησιμοποιείται για να επιταχυνθεί η εναπόθεση του άνθρακα, αποτελεί μία από κρίσιμες παραμέτρους της μεθόδου, μαζί με την ένταση του συνεχούς ρεύματος και τη θερμοκρασία .

### **2. Εξάχνωση Γραφίτη Μέσω Παλμικού Laser (Laser Ablation ή Pulsed Laser Vaporization).**

Η μέθοδος της εξάχνωσης γραφίτη μέσω παλμικού Laser παρουσία καταλύτη και κάποιου αδρανούς αερίου οδηγεί στο σχηματισμό απλού τοιχώματος νανοσωλήνων . Η παρουσία του καταλύτη κρίνεται απαραίτητη δεδομένου ότι χωρίς αυτήν η μέθοδος θα οδηγούσε στο σχηματισμό φουλερενίων. Η μέθοδος αυτή οδηγεί σε καθαρότερο προϊόν, ενώ παράγοντες που επηρεάζουν την ποσότητα των νανοσωλήνων που

παράγεται είναι: η ποσότητα και το είδος του καταλύτη, η ισχύς και το μήκος κύματος εκπομπής του Laser, η θερμοκρασία, η πίεση και το είδος του αδρανούς αερίου, καθώς και η δυναμική ρευστών κοντά στον γραφικό στόχο.

Πρόκειται για μία μέθοδο χαμηλού κόστους σε σχέση με την arc-discharge, μιας και δεν απαιτεί τη χρήση ισχυρού ηλεκτρικού πεδίου που οδηγεί σε προϊόντα απαλλαγμένα από άμορφο άνθρακα .

### ***3. Χημική Εναπόθεση Αερίων (Chemical Vapor Deposition).***

Η μέθοδος CVD χρησιμοποιεί ως πηγή άνθρακα υδρογονάνθρακες, κυρίως μεθάνιο και ακετυλένιο αλλά και μονοξείδιο του άνθρακα. Τα αέρια οδεύουν προς τον καταλύτη μέσα σε ένα quartz σωλήνα, οδηγούμενα από ροή αζώτου, ενώ θερμαίνονται σε υψηλές θερμοκρασίες. Στην επιφάνεια του καταλύτη αποικοδομούνται με διάσπαση του δεσμού άνθρακα-υδρογόνου προς καθαρό άνθρακα, ο οποίος σε υψηλές θερμοκρασίες οδηγεί στο σχηματισμό νανοσωλήνων. Για την παραγωγή νανοσωλήνων απλού τοιχώματος απαιτούνται υψηλότερες θερμοκρασίες. Πλεονεκτήματα της μεθόδου αποτελούν οι χαμηλές απαιτήσεις σε ενέργεια και θερμοκρασίες, καθώς επίσης και η υψηλή καθαρότητα των προϊόντων.

### ***4. Μετατροπή Μονοξειδίου του Άνθρακα υπό Υψηλή Πίεση (High-Pressure CO Conversion).***

Η μέθοδος HiPCO δίνει τη δυνατότητα παραγωγής μεγάλων ποσοτήτων νανοσωλήνων κάτι που την καθιστά εν δυνάμει ικανή για τη μαζική παραγωγή απλού τοιχώματος σωλήνων. Οι καταλύτες που χρησιμοποιούνται κατά την εφαρμογή της μεθόδου για την παραγωγή απλού τοιχώματος νανοσωλήνων σχηματίζονται in-situ από τη θερμική αποικοδόμηση του πεντακαρβονυλικού ιόντος υπό θερμή ροή μονοξειδίου του άνθρακα, σε πίεση 10 - 1 ατμόσφαιρες και θερμοκρασία C° 1200 - 800 . Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούν υδρογονάνθρακες ως πηγή άνθρακα οδηγούν αναπόφευκτα στον ανεπιθύμητο σχηματισμό άμορφου άνθρακα και γραφίτη, λόγω της θερμικής διάσπασης των παραπάνω σε υψηλές

θερμοκρασίες. Έτσι απαιτείται ένα στάδιο καθαρισμού για την απομάκρυνση του άμορφου άνθρακα. Η μέθοδος HiPCO χρησιμοποιεί CO ως πηγή άνθρακα και  $5 \text{ Fe(CO)}$  ως πρόδρομο καταλύτη. Η ποσότητα των νανοσωλήνων απλού τοιχώματος που παράγεται καθώς και η διάμετρός τους διαφέρει ανάλογα με τις συνθήκες και την γεωμετρία της συσκευής.

Η διαδικασία για την παραγωγή των νανοσωλήνων περιλαμβάνει τη θερμική αποικοδόμηση του  $5 \text{ Fe(CO)}$  που οδηγεί σε συσσωματώματα σιδήρου στην αέριο φάση. Τα συσσωματώματα που δημιουργούνται δρουν ως πυρήνες όπου αναπτύσσονται οι νανοσωλήνες. Ο στερεός άνθρακας προέρχεται από την αντίδραση δύο μορίων μονοξειδίου προς διοξείδιο και άνθρακα (αντίδραση Boudouard):  $\text{CO}_2 + \text{CO} \rightarrow \text{C} + \text{CO}_2$

Η αντίδραση λαμβάνει χώρα καταλυτικά στην επιφάνεια των σωματιδίων σιδήρου τα οποία προάγουν το σχηματισμό των νανοσωλήνων. Ο σωλήνας quartz όπου ρέουν τα αντιδρώντα αέρια έχει παχύ τοίχωμα και βρίσκεται μέσα σε φούρνο.

Ο βαθμός στον οποίο τα αντιδρώντα αέρια θερμαίνονται καθορίζει το ποσό και την ποιότητα των νανοσωλήνων που παράγονται. Αρχικά, τα αέρια CO και  $5 \text{ Fe(CO)}$  διατηρούνται σε χαμηλές θερμοκρασίες με χρήση νερού ως ψυκτικό. Έτσι συντελείται ταχεία θέρμανση μέσα στο φούρνο, που οδηγεί στην παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων απλού τοιχώματος νανοσωλήνων<sup>76</sup>.

<sup>76</sup> Περιοδικό Science, Τόμος 292, τεύχος 5517 (2001)

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΝΑΝΟΣΩΛΗΝΩΝ ΑΝΘΡΑΚΑ

### 3.1. ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΝΑΝΟΣΩΛΗΝΩΝ ΑΝΘΡΑΚΑ.

---



Οι πολύ σημαντικές και διαφορετικές ιδιότητες των νανοσωλήνων άνθρακα καθιστούν τα υλικά αυτά δυνητικά εφαρμόσιμα σε πάρα πολλούς τομείς της τεχνολογίας.

Το 41% των διπλωμάτων ευρεσιτεχνίας που έχουν δοθεί σε εφευρέσεις πάνω στη νανοτεχνολογία αφορούν στη σύνθεση και στην επεξεργασία των νανοσωλήνων άνθρακα, ενώ παρατηρείται πως ως προς τις εφαρμογές τους χρησιμοποιούνται κυρίως σε ηλεκτρονικά μικροσκοπία και οθόνες (25%), ως σύνθετα υλικών (9%), σε μπαταρίες και συσκευές αποθήκευσης ενέργειας (7%), σε αισθητήρες (3%), για αποθήκευση υδρογόνου (6%) και ένα ακόμα ποσοστό 3% σε πρόσθετες εφαρμογές στις οποίες πιθανότατα ανήκουν τα νανοϋλικά πληρώσεως, οι επιβραδυντές καύσης των πλαστικών κ.ά..

Λόγω των εξαιρετικών τους ιδιοτήτων, οι νανοσωλήνες μελετώνται με σκοπό την χρήση τους σε ποικίλες εφαρμογές όπως σε οθόνες εκπομπής πεδίου (Field Emission Displays-FEDs). Οι ιδιαίτερες ιδιότητες των νανοσωλήνων άνθρακα τους καθιστούν πιθανούς υποψήφιους για την επόμενη γενιά συσκευών εκπομπής. Οι οθόνες εκπομπής πεδίου βασίζονται στη δημιουργία ισχυρού ηλεκτρικού πεδίου για την παραγωγή ηλεκτρονίων. Η αποδοτικότητα της συσκευής εξαρτάται ευθέως από την ισχύ του πεδίου και αντιστρόφως από τη διάμετρο του «καλωδίου», με αποτέλεσμα οι νανοσωλήνες να αποτελούν ελκυστική επιλογή<sup>77</sup>.

---

<sup>77</sup> N. Taniguchi, "On the Basic Concept of 'Nano-Technology - Part II'", British Society of Precision Engineering (1974)

Επίσης, οι νανοσωλήνες άνθρακα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή μοριακών transistors επίδρασης πεδίου (field-effect transistors -FETs) και αλλά και μονοηλεκτρονικών transistors (single electron transistors, αντίστοιχα<sup>78</sup>. Μια άλλη ενδιαφέρουσα εφαρμογή είναι η χρήση νανοσωλήνων άνθρακα για αποθήκευση υδρογόνου. Οι νανοσωλήνες έχουν τη δυνατότητα γρήγορης απορρόφησης ποσοτήτων υδρογόνου υψηλής πυκνότητας σε θερμοκρασία δωματίου και ατμοσφαιρική πίεση. Έχει αναφερθεί<sup>79</sup> πως οι μονού τοιχώματος νανοσωλήνες έχουν την δυνατότητα αποθήκευσης υδρογόνου σε πυκνότητα μεγαλύτερη από 363kg/m<sup>80</sup>. Επίσης, οι νανοσωλήνες άνθρακα μπορούν να χρησιμεύσουν και ως αισθητήρες αερίων<sup>81</sup>. Η ηλεκτρική αντίσταση των ημιαγωγίμων νανοσωλήνων απλού τοιχώματος μεταβάλλεται δραματικά όταν εκτίθενται σε αέρια. Πρόσφατα οι νανοσωλήνες άνθρακα έχουν χρησιμοποιηθεί ως ακίδα στη μικροσκοπία σάρωσης<sup>82</sup>. Τέλος, οι νανοσωλήνες άνθρακα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ενισχυτικά υλικά σε πολυμερικές μήτρες<sup>83</sup>.

Συνοπτικά οι εφαρμογές των νανοσωλήνων άνθρακα είναι οι ακόλουθες:

- Μικροηλεκτρονική/ημιαγωγοί
- Ελεγχόμενη απελευθέρωση φαρμάκων
- Τεχνητοί μύες
- Υπερ-πυκνωτές
- Μπαταρίες

---

<sup>78</sup> Περιοδικό Science, Τόμος 292, τεύχος 5517 (2001)

<sup>79</sup> W.J.Kim, H.L.Usrey, M.S.Strano: Chem.Mater 19, pp1571-1576 (2002)

<sup>80</sup> X. Zheng, M. J. O'Connell, S. K. Doorn, X. Z. Liao, Y. H. Zhao, E. A.

<sup>81</sup> N. Taniguchi, "On the Basic Concept of 'Nano-Technology - Part II", British Society of Precision Engineering (1974)

<sup>82</sup> X. Zheng, M. J. O'Connell, S. K. Doorn, X. Z. Liao, Y. H. Zhao, E. A. Akhadov, M. A. Hoffbauer, B. J. Roop, Q. X. Jia, R. C. Dye, D. E. Peterson, S. M. Huang, J. Liu & Y. T. Zhu. X. : Nature Materials 3, pp673–676 (2004)

<sup>83</sup> C.Galotis, Compos. Sci. Technol. 42, p125

- Νανο-ηλεκτρονική
- Νανο-λαβίδες
- Αποθήκευση δεδομένων
- Νανο-τροχοί
- Ενεργοποιητής νανοσωλήνας
- Αποθήκευση υδρογόνου
- Αποθήκευση ηλιακής ενέργειας
- Μοριακά κβαντικά καλώδια
- Φίλτρα διάλυσης
- Ηλεκτρομαγνητική θωράκιση
- Υλικά προστασίας από σύγκρουση
- Αεροναυτική ηλεκτρονική
- Θερμική προστασία
- Ενιαίες κρυσταλλολυχνίες ηλεκτρονίων
- Ενισχυμένα σύνθετα με νανοσωλήνες
- Ενίσχυση τεθωρακισμένων
- Ενίσχυση πολυμερών

Παρακάτω θα αναλύσουμε τις βασικότερες από τις εφαρμογές των νανοσωλήνων άνθρακα.

### **3.1.1. ΩΣ ΣΥΝΘΕΤΟ ΥΛΙΚΩΝ**

---

Χάρη στις σημαντικές μηχανικές τους ιδιότητες οι νανοσωλήνες άνθρακα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως πρόσθετα άλλων υλικών βελτιώνοντας αξιοσημείωτα την αντοχή τους, μειώνοντας ταυτόχρονα το βάρος τους. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι ήδη χρησιμοποιούνται για την παρασκευή αδιάβροχων υφασμάτων ινών, αλλά και για την κατασκευή αλεξίσφαιρων γιλέκων, ενώ χάρη στις ηλεκτρικές τους ιδιότητες επιτρέπουν τον ηλεκτρονικό έλεγχο της κατάστασης του προσώπου που τα



φορά, π.χ. την θερμοκρασία του σώματος του και τους παλμούς του<sup>84</sup>. Επιπλέον, ήδη χρησιμοποιούνται ως σύνθετο υλικό του τσιμέντου, στο οποίο προσδίδουν αύξηση στην αντοχή σε εφελκυσμό, ενώ παρεμποδίζουν και τη διεύρυνση των σπασιμάτων στη δομή. Επίσης, ως πρόσθετα στο πολυαιθυλένιο οδήγησαν στην αύξηση του μέτρου ελαστικότητας του πολυμερούς κατά 30%. Επίσης, το γεγονός ότι η προσθήκη νανοσωλήνων σε ένα υλικό το κάνει αγωγίμο βρίσκει εφαρμογή στη βιομηχανία αυτοκινήτων, όπου η παρουσία τους στα ελαστικά του μέρη, επιτρέπει ακόμα και την ηλεκτροστατική βαφή του. Η πιο πρωτοποριακή όμως χρήση των μηχανικών ιδιοτήτων των νανοσωλήνων άνθρακα είναι στις διαστημικές εφαρμογές.

Ήδη οι νανοσωλήνες άνθρακα χρησιμοποιούνται από τη NASA σε διαστημικά οχήματα προκειμένου και πάλι να βελτιωθεί η αντοχή τους με ταυτόχρονη ελάττωση του βάρους τους, ενώ προγραμματίζεται η χρησιμοποίησή τους για την κατασκευή του ανεγκυστήρα του διαστήματος<sup>85</sup>.

### **3.1.2. ΣΤΗΝ ΙΑΤΡΙΚΗ**

---

Αν και ακόμα δεν έχει αποσαφηνιστεί πλήρως η τοξικότητα ή μη των

νανοσωλήνων άνθρακα, εντούτοις ήδη χρησιμοποιούνται σε ορισμένους τομείς της ιατρικής, όπως στη θεραπεία του καρκίνου. Μικροσκοπικοί νανοσωλήνες από άνθρακα εμφυτεύτηκαν σε καρκινικά κύτταρα και όταν αυτοί εκτεθούν σε ακτινοβολία στο εγγύς υπέρυθρο - από ένα λέιζερ - τότε θερμαίνονται, φονεύουν το καρκινικό κύτταρο, ενώ τα υγιή κύτταρα χωρίς νανοσωλήνες παραμένουν αβλαβή<sup>86</sup>. Ένα από τα μακροχρόνια υφιστάμενα προβλήματα στην ιατρική είναι η θεραπεία του καρκίνου χωρίς να καταστραφεί ο υγιής ιστός του σώματος. Η

<sup>84</sup> V.N. Popov, *Materials Science and Engineering R* 43, 61, (2004).

<sup>85</sup> [www.jimkava.com](http://www.jimkava.com)

<sup>86</sup> [www.jimkava.com](http://www.jimkava.com)

καθιερωμένη χημειοθεραπεία καταστρέφει τα καρκινικά κύτταρα αλλά και τα υγιή κύτταρα.

Επίσης εξαιτίας της ευμετάβλητης δομής τους οι νανοσωλήνες άνθρακα μπορούν να χρησιμοποιηθούν και ως μέσα για τη μεταφορά φαρμάκων στο σώμα. Οι νανοσωλήνες επιτρέπουν την ελεγχόμενη αποδέσμευση του φαρμάκου στο συγκεκριμένο σημείο, ελαττώνοντας έτσι και τη δόση που πρέπει να λαμβάνει ο ασθενής και το επιτυγχάνουν αυτό με δύο τρόπους, είτε με το να είναι το φάρμακο προσκολλημένο πλευρικά ή πίσω από το σωλήνα, είτε να είναι τοποθετημένο στο εσωτερικό του [40]. Τέλος η ιδιότητα των νανοσωλήνων άνθρακα να φθορίζουν σε ένα μόνο μήκος κύματος ανάλογα με τη διάμετρο τους, επιτρέπει με τη χρήση ενός εύρους διαμέτρων νανοσωλήνων άνθρακα, τον κάθε ένα για διαφορετικό στόχο, να πραγματοποιείται διάγνωση πολλαπλών παθήσεων με μία μόνο εξέταση.

### **3.1.3. ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΜΕ ΝΑΝΟΣΩΛΗΝΕΣ ΑΝΘΡΑΚΑ**

---

Ημιαγώγιμοι CNTs έχουν χρησιμοποιηθεί για να κατασκευάσουν τρανζίστορες επίδρασης πεδίου CNTFETs που είναι πολλά υποσχόμενα εξαιτίας των ηλεκτρονικών χαρακτηριστικών των MOSFET που κατασκευάζονται κυρίως από πυρίτιο. Οι CNT συσκευές είναι υψηλής ταχύτητας και λειτουργούν σε συχνότητες της τάξης των GHz. Πρόσφατη έρευνα που αναφέρει με λεπτομέρειες τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των διαφόρων μορφών CNTFETs έχει δείξει ότι οι συσκευές που βασίζονται στο φαινόμενο της σήραγγας προσφέρουν καλύτερα χαρακτηριστικά σε σχέση με άλλες CNTFETs δομές. Αυτές οι συσκευές είναι μια πολλή καλή ιδέα για εφαρμογές χαμηλής ισχύος.

### **3.1.4. ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΝΑΝΟΣΩΛΗΝΩΝ ΑΝΘΡΑΚΑ**

---

Οι νανοσωλήνες άνθρακα (NA) μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως τρανζίστορ, ως ανιχνευτές αερίων, ως διατάξεις εκπομπής πεδίου ή ως ένθετες δομές σε άλλες ηλεκτρονικές διατάξεις.

Οι NA αποτελούν ελκυστική λύση για την κατασκευή επίπεδων οθονών και διατάξεων εκπομπής ορατού φωτός ή ακτινοβολίας X. Η μεγάλη αγωγιμότητα και η εστίαση του ηλεκτρικού πεδίου σε μια πολύ μικρή περιοχή τους καθιστά ιδανικές πηγές εκπομπής ηλεκτρονίων. Λόγω του ισχυρού ηλεκτρικού πεδίου που αναπτύσσεται ενισχύονται τα ρεύματα σήραγγας που διαπερνούν το φράγμα δυναμικού του κενού.

Οι NA είναι φυσικές διατάξεις ανίχνευσης αερίων. Διαπιστώθηκε ότι η αντίσταση ενός ημιαγωγίου NA επηρεάζεται σημαντικά από την παρουσία μορίων στην περιοχή του. Η μεταβολή, που υφίστανται μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ταυτοποίηση του χημικού περιβάλλοντος του νανοσωλήνα.

Οι NA που συμπεριφέρονται ως ημιαγωγοί μπορεί να χρησιμοποιηθούν ως κανάλια σε κυκλώματα τρανζίστορ. Για όλες τις παραπάνω κατηγορίες εφαρμογών έχουν κατασκευαστεί πρότυπες διατάξεις. Ωστόσο αναμένεται η ανάπτυξη φθηνής και υψηλής απόδοσης τεχνικών διαδικασιών παραγωγής.

### **3.1.5. ΝΑΝΟΣΩΛΗΝΕΣ ΓΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΜΝΗΜΗΣ**

---

Οι συσκευές μνήμης για αποθήκευση δεδομένων παίζουν ένα σημαντικό ρόλο στις εφαρμογές μικροηλεκτρονικών. Το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό μιας καλής ιδέας είναι η υψηλή πυκνότητα αποθήκευσης, η γρήγορη και τυχαία προσπέλαση δεδομένων, η χαμηλή κατανάλωση ισχύος και η μη πτητικότητα των δεδομένων μετά το κλείσιμο του διακόπτη. Για την τεχνολογία Si αυτό έχει επιτευχθεί διαμέσου συσκευών όπως DRAM, SRAM, EPROM.

### **3.1.6. ΣΕ ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ.**

---

Τρεις ερευνητές με επικεφαλής έναν Έλληνα, τον Φαίδωνα Αβούρη<sup>87</sup> της IBM, στην Καλιφόρνια, ανέπτυξαν μια νέα επαναστατική τεχνολογία τρανζίστορς από νανοσωλήνες άνθρακα, που μπορεί να κάνει δυνατή την παραγωγή μιας νέας τάξης, μικρότερων (500 φορές), ταχύτερων και μικρότερης ενεργειακής κατανάλωσης μικροσίπς από τα ήδη υπάρχοντα μικροσίπς πυριτίου. Πρέπει να σημειωθεί ότι τα τρανζίστορς είναι οι θεμέλιοι λίθοι όλων των ηλεκτρονικών συστημάτων – δρουν σαν γέφυρες που μεταφέρουν δεδομένα από το ένα μέρος του κυκλώματος στο άλλο.

Συνοπτικά η μέθοδός τους έχει ως εξής: Το πλέγμα όλων των νανοσωλήνων μεταλλικών και ημιαγωγών αποτίθεται πάνω σε υπόστρωμα οξειδίου του πυριτίου. Μια μεταλλική μάσκα τοποθετείται πάνω από τους νανοσωλήνες και παίζει ρόλο ηλεκτροδίου. Χρησιμοποιώντας ως δεύτερο ηλεκτρόδιο το υπόστρωμα πυριτίου οι επιστήμονες θέτουν σε μη αγώγιμη κατάσταση τους ημιαγωγούς νανοσωλήνες. Μετά με μια κατάλληλη τάση που εφαρμόζεται στο υπόστρωμα επιτυγχάνεται η καταστροφή μόνο των μεταλλικών αφού μόνον αυτοί είναι αγώγιμοι και διαρρέονται από ρεύμα. Το αποτέλεσμα είναι ένα πυκνό δίκτυο ημιαγωγών νανοσωλήνων που χρησιμοποιούνται για να χτιστούν τα λογικά κυκλώματα.

### **3.1.7. ΣΤΟ ΣΤΡΑΤΟ**

---

Το πρωτότυπο της νανοπανοπλίας που ετοιμάζεται για τον αμερικανικό στρατό βασίζεται σε ελαφρύ ύφασμα το οποίο εμπεριέχει νανοσωλήνες διαμέτρου 100 μικρών (όχι παχύτερους από την ανθρώπινη τρίχα). Μέσα σε κάθε νανοσωλήνα θα βρίσκονται μικροσκοπικοί μαγνήτες που θα επιπλέουν σε υγρό. Κατά τη μετακίνηση των στρατιωτών, το ύφασμα αυτό θα παραμένει εύκαμπτο και μαλακό ώστε να μην παρεμβάλλεται στις κινήσεις τους. Όταν όμως δεχθούν σφαίρα, αυτομάτως οι μαγνήτες της προσβαλλόμενης

---

<sup>87</sup> P.G. Collins, M..S. Arnold, Ph. Avouris, Science 292, 706 (2001).

περιοχής θα εκτινάσσονται στην επιφάνεια των νανοσωλήνων σχηματίζοντας μια μεταλλική αρματωσιά που θα απορροφά το χτύπημα<sup>88</sup>.

Ταυτόχρονα εξετάζεται η δυνατότητα προσαρμογής των νέων αυτών στολών ώστε να αντιδρούν ανάλογα σε επιθέσεις βιοχημικών όπλων, ή για την αυτόματη προσαρμογή και προστασία των στρατιωτών από αλλαγή των κλιματικών συνθηκών.

Προσομοιώνοντας τη λειτουργία των μορίων του φύλλου του λωτού, τα πρώτα πατρόν της στολής «διώχνουν» ήδη από πάνω τους νερό και μικρόβια. Τα «αξεσουάρ» που σχεδιάζονται για αυτές τις «δυναμικού τύπου στολές» είναι αισθητήρες που θα ενημερώνουν τον κάθε στρατιώτη αν υπάρχει εχθρός πίσω του. Για την περίπτωση που ούτε αυτοί προλάβουν το κακό, σχεδιάζονται και νανοσυσκευές παροχής φαρμάκων για την αυτόματη θεραπευτική αγωγή μικροτραυματισμών.

### **3.1.8. ΣΤΑ ΥΦΑΣΜΑΤΑ**

---

Βιομηχανίες ενδυμάτων χρησιμοποίησαν νανο-ινίδια τα οποία ενσωματώνονται στο ύφασμα του ρούχου όταν τα κομμάτια του πατρόν του εμβαπτισθούν σε ένα ειδικό χημικό διάλυμα που τα κάνει αλέκισατα. Όντας απείρως μικρά και έχοντας σχήμα ελατηρίου, τα νανο-ινίδια γαντζώνονται μέσα στην ύφανση και συνδέονται εσαεί με τα νήματα, χωρίς να αλλάζουν το σχήμα τους. Όταν πέσει επάνω τους βρωμιά την απωθούν ώσπου να την ξεφορτωθούν.

Σε άλλες περιπτώσεις, η νανοτεχνολογία χρησιμοποιείται χαμαιλεοντικά, π.χ. προκειμένου να κάνει τα συνθετικά υφάσματα να αποκτούν υφή βαμβακερών<sup>89</sup>.

---

<sup>88</sup> ΠΕΡΙΟΔΙΚΟ ΥΨΙΠΕΤΗΣ Νοέμβριος-Δεκέμβριος 2009.

<sup>89</sup> ΠΕΡΙΟΔΙΚΟ ΥΨΙΠΕΤΗΣ Νοέμβριος-Δεκέμβριος 2009.

### **3.1.9. ΣΤΑ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΑ**

---

Αυτοκινητοβιομηχανίες χρησιμοποιούν νανοσυνθετικά υλικά στους προφυλακτήρες των αυτοκινήτων τους, κάνοντας τους 60% ελαφρύτερους και με διπλάσια αντοχή στις γρατσουνιές, όπως επίσης και στους ιμάντες χρονισμού (timing belts) επεκτείνοντας το όριο ζωής τους.

### **3.1.10. ΣΤΑ ΚΑΛΛΥΝΤΙΚΑ**

---

Η βιομηχανία καλλυντικών ανακάλυψε τις θαυματουργές για το δέρμα ιδιότητες των νανο-υλικών. Γνωστές εταιρείες καλλυντικών κατασκευάζουν μικροκάψουλες ενσωμάτωσης ενυδατικών και άλλων συστατικών που μπορούν να διεισδύσουν βαθιά στο δέρμα. Άλλες φαρμακευτικές εταιρείες χρησιμοποιούν τα υλικά για να επικαλύψουν τα καταπραϋντικά πόνου που παράγουν ώστε να παραμένουν ενεργά πολλές ώρες.

### **3.2. ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΝΑΝΟΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΣΕ ΥΓΕΙΑ, ΟΙΚΟΝΟΜΙΑ ΚΑΙ ΚΑΘΗΜΕΡΙΝΗ ΖΩΗ.**

---

Οι επιδράσεις της νανοτεχνολογίας δεν θα περιοριστούν στον τομέα της μικροηλεκτρονικής, αλλά θα επεκταθούν σε πολλές πτυχές της ανθρώπινης ζωής.

**Στον τομέα της υγείας**<sup>90</sup>, η νανοτεχνολογία υπόσχεται να θεραπεύσει τις ανίατες ασθένειες και να κάνει το ιατρικό έργο ευκολότερο. Αόρατα στο ανθρώπινο μάτι νανορομπότ θα εισέρχονται στον ανθρώπινο οργανισμό (μέσω ενός χαπιού λ.χ.) και θα δίνουν αναλυτική διάγνωση για την κατάσταση του οργανισμού. Κατόπιν, άλλα νανορομπότ θα αναλαμβάνουν τη θεραπεία. Μία λεπτή ανάλυση στο ακροδάχτυλο θα αρκεί για να έχουμε αναλύσεις αίματος για πάντα (από το ίδιο άτομο). Η θεραπεία θα είναι στοχευμένη στα ασθενή κύτταρα και δεν θα προκαλεί παρενέργειες. Ασθένειες όπως η τύφλωση θα μπορούν να θεραπευθούν, και ο κατάλογος δεν τελειώνει εδώ.

**Στον τομέα της οικονομίας**, η νανοτεχνολογία θα παράσχει τα μέσα για τη δημιουργία υλικών με τη χρήση ελάχιστων πόρων και την προοδευτική αντικατάσταση των συμβατικών τεχνολογιών, με καινούργιες, που θα εξοικονομούν πόρους. Για παράδειγμα, μία τηλεόραση καθοδικού σωλήνα καταναλώνει πολύ περισσότερη ενέργεια από μία τηλεόραση υγρών κρυστάλλων ή plasma. Κάτι αντίστοιχο θα συμβεί και με τις συσκευές που θα ενσωματώνουν τη νανοτεχνολογία, καθώς θα μπορούν να λειτουργήσουν με ελάχιστους ενεργειακούς πόρους. Στο ίδιο πλαίσιο, η ηλιακή ενέργεια από περιθωριακή/πειραματική μορφή ενέργειας που είναι σήμερα, θα γίνει και βιώσιμη και επικερδής και θα χρησιμοποιείται ακόμα και για την κίνηση αεροσκαφών και πλοίων<sup>91</sup>.

**Στον τομέα της ανάπτυξης και της ανακάλυψης νέων τεχνικών**, οι νανοσωλήνες του άνθρακα αποτελούν ένα πρώτης τάξεως υλικό για τη

---

<sup>90</sup> [www.nanorevolution.com](http://www.nanorevolution.com)

<sup>91</sup> [www.nanozine.com](http://www.nanozine.com)

δημιουργία συμπαγών κατασκευών. Προοδευτικά, η πλειονότητα των δομικών υλικών θα βασίζεται στους νανοσωλήνες του άνθρακα και αυτό θα δώσει την ευκαιρία για τη δημιουργία πανύψηλων κτιρίων, γεφυρών κ.λπ. Την περίοδο αυτή, η NASA μελετά τον τρόπο για να ανεβάσει στο διάστημα δορυφόρους και πυραύλους, μέσω ειδικών σκοινιών που θα συγκροτούν ένα είδος ανελκυστήρα<sup>92</sup>.

**Στον τομέα της αυτοκίνησης**, μολονότι η σχεδίαση των οχημάτων θα διατηρήσει τις σημερινές της γραμμές, εντούτοις πολλά θα αλλάξουν. Τα αυτοκίνητα θα γίνουν πιο λεπτά, πιο φιλικά προς το περιβάλλον, πιο "έξυπνα" και, κατά συνέπεια, ασφαλέστερα. Χάρη στη νανοτεχνολογία, νέα καύσιμα θα αντικαταστήσουν το πετρέλαιο και τη βενζίνη, και τα αυτοκίνητα θα μπορούν να αποφεύγουν τους κινδύνους, χωρίς την παρέμβαση του οδηγού.

**Στον τομέα της ένδυσης**, τα καθημερινά ρούχα θα είναι κατασκευασμένα έτσι ώστε ούτε να τσαλακώνονται ούτε να ξεθωριάζουν. Πέραν αυτών, ρούχα που προορίζονται για ειδικές χρήσεις (λ.χ. στολές) θα είναι -κατά μία έννοια- άφθαρτα και δεν θα σχίζονται ούτε θα καταστρέφονται.

**Στον τομέα της καθημερινής υγιεινής**, απλά σπρέι θα διαποτίζουν το χώρο με καθαρό οξυγόνο ή με άρωμα λουλουδιών, εξαφανίζοντας ταυτόχρονα τα βακτήρια. Αυτό θα γίνεται αυτόματα, μέσω των συστημάτων κλιματισμού, για έναν κόσμο χωρίς δυσάρεστες μυρωδιές. Με παρόμοιο τρόπο θα λειτουργούν και οι τουαλέτες, που θα πάψουν να ταυτίζονται με εστίες μόλυνσης και ακαθαρσίας. Η οδοντόκρεμα θα περιέχει νανοσωματίδια που θα φροντίζουν την υγιεινή των δοντιών. Η κρέμα νυκτός, αντίστοιχα, θα επαναφέρει τα κύτταρα στην αρχική τους κατάσταση.

<sup>92</sup>

[www.cordis.lu/nanotechnology](http://www.cordis.lu/nanotechnology)



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ – ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ.

---



Η έρευνα για νέες τεχνολογίες υλικών προσελκύει την προσοχή των μελετών από όλο τον κόσμο. Οι εξελίξεις γίνονται για τη βελτίωση των ιδιοτήτων των υλικών, αλλά και για την εξεύρεση εναλλακτικών πρόδρομων ουσιών που μπορούν να προσδώσουν τις επιθυμητές ιδιότητες στα υλικά. Μεγάλο ενδιαφέρον έχει πρόσφατα αναπτυχθεί στην περιοχή των νανοδομημένων υλικών άνθρακα. Οι νανοδομές άνθρακα έχουν μεγάλη εμπορική σημασία με το ενδιαφέρον να αυξάνεται όλο και ταχύτερα κατά την τελευταία δεκαετία.

Από την ανακάλυψη τους το 1991, οι CNTs έχουν δημιουργήσει μεγάλη δραστηριότητα στους περισσότερους τομείς της επιστήμης και της τεχνολογίας λόγω των ασυνήθιστων ιδιοτήτων τους. Κανένα προηγούμενο υλικό δεν έχει εμφανίσει τον συνδυασμό μηχανικών, θερμικών και ηλεκτρικών ιδιοτήτων που χαρακτηρίζει τους CNTs. Αυτές οι ιδιότητες κάνουν τους CNTs ιδανικό υλικό όχι μόνο για ένα ευρύ πεδίο εφαρμογών<sup>93</sup> αλλά και για πεδίο έρευνας για βασική έρευνα<sup>94</sup>.

Ειδικά, αυτός ο συνδυασμός των ιδιοτήτων τα κάνει ιδανικούς υποψήφιους ως προηγμένο ενισχυτικό μέσο για νανοσύνθετα. Οι ερευνητές έχουν οραματιστεί το να εκμεταλλευτούν την αγωγιμότητά τους και τον υψηλό λόγο διαστάσεων (aspect ratio) για να δημιουργήσουν αγωγίμα πλαστικά με εξαιρετικά χαμηλά όρια κατωφλίου (percolation thresholds)<sup>95</sup>. Σε άλλο τομέα, θεωρείται ότι η μεγάλη θερμική αγωγιμότητα

<sup>93</sup> R. H. Baughman, A. A. Zakhidov, W. A. de Heer, Science 2002, 297, 787.

<sup>94</sup> J. Cao, Q. Wang, M. Rolandi, H. Dai, Phys. Rev. Lett. 2004, 93, 216 803.

<sup>95</sup> A.M. Bueche, J. Polym. Sci., 25, 139 (1957).

τους μπορεί να προωθήσει την παρασκευή θερμικά αγωγίμων συνθέτων<sup>96</sup>. Όμως, πιθανά η πιο υποσχόμενη περιοχή της έρευνας των νανοσυνθέτων περιλαμβάνει την ενίσχυση πλαστικών με την χρήση των CNTs ως ενισχυτικό μέσο.

Μικροσκοπικοί νανοσωλήνες άνθρακα, εκατοντάδες χιλιάδες φορές πιο λεπτοί από μία ανθρώπινη τρίχα μπορεί να είναι ταχύτεροι αγωγοί του ηλεκτρισμού και για μεγαλύτερες αποστάσεις, με ελάχιστη απώλεια ενέργειας, σύμφωνα με νέα έρευνα που δημοσιεύτηκε στο περιοδικό Science. Την έρευνα πραγματοποίησε το Αμερικανικό Ινστιτούτο Ερευνών της Honda (Honda Research Institute USA, Inc.) σε συνεργασία με ερευνητές των Πανεπιστημίων του Purdue και της Louisville.

Τα αποτελέσματα ανοίγουν νέες δυνατότητες στη μινιατουροποίηση και την απόδοση ενέργειας, συμπεριλαμβανομένων πολύ ισχυρότερων και συμπαγών υπολογιστών, ηλεκτροδίων για υπερ-πυκνωτές, ηλεκτρικών καλωδίων, μπαταριών, ηλιακών κυψελών, κυψελών καυσίμου, τεχνητών μυών, συνθετικού υλικού για αυτοκίνητα και αεροπλάνα, υλικών αποθήκευσης ενέργειας και ηλεκτρονικών συστημάτων για υβριδικά οχήματα.

Από τις ανωτέρω έρευνες εξήχθησαν συμπεράσματα για τους μικροσκοπικούς νανοσωλήνες άνθρακα που αναπτύσσονται στην επιφάνεια μεταλλικών νανοσωματιδίων παίρνοντας την κυλινδρική μορφή τυλιγμένων κυψελοειδών φύλλων με άτομα άνθρακα στα άκρα τους. Σύμφωνα με τις σχετικές μελέτες όταν αυτοί οι μικροσκοπικοί νανοσωλήνες άνθρακα εμφανίσουν μεταλλική αγωγιμότητα, έχουν εξαιρετική αντοχή συγκριτικά με το ατσάλι, καλύτερες ηλεκτρικές ιδιότητες από το χαλκό, ενώ είναι αποδοτικές στη μετάδοση θερμότητας όσο το διαμάντι και ελαφρείς σαν βαμβάκι. «Στόχος μας δεν είναι μόνον η δημιουργία νέων και καλύτερων τεχνολογιών και προϊόντων, αλλά και η εκπλήρωση της δέσμευσης της Honda στην

---

<sup>96</sup> M. J. Biercuk, M. C. Llaguno, M. Radosavljevic, J. K. Hyun, A. T. Johnson, Appl. Phys. Lett. 2002, 80, 2767.

περιβαλλοντική βιωσιμότητα» δήλωσε ο Dr. Hideaki Tsuru, επικεφαλής προγράμματος του Honda Research Institute USA.

Προηγούμενες ερευνητικές προσπάθειες για τον έλεγχο της δομικής μορφοποίησης των νανοσωλήνων άνθρακα με μεταλλική αγωγιμότητα μέσω συμβατικής μεθοδολογίας είχαν ποσοστό επιτυχίας περίπου 25 - 50%. Η Honda, η οποία εργάζεται στον τομέα της σύνθεσης των νανοσωλήνων άνθρακα για μία δεκαετία περίπου, σημείωσε ποσοστό επιτυχίας 91% στη μεταλλική αγωγιμότητα.

«Αυτή είναι η πρώτη έκθεση που δείχνει ότι μπορούμε να ελέγξουμε αρκετά συστηματικά κατά πόσον οι νανοσωλήνες άνθρακα αναπτύσσουν μεταλλικές ιδιότητες. Περαιτέρω έρευνα είναι σε εξέλιξη με τελικό στόχο τον πλήρη έλεγχο των δομών νανοσωλήνων ώστε να τύχουν εφαρμογής σε πραγματικές συνθήκες», δήλωσε ο Dr. Avetik Harutyunyan, κορυφαίος επιστήματος στο Honda Research Institute USA, και επικεφαλής του project.

«Τα ευρήματά μας δείχνουν ότι η διαμόρφωση νανοσωλήνα που προσδιορίζει την αγωγιμότητά του εξαρτάται όχι μόνον από το μέγεθος του μεταλλικού νανοκαταλύτη που χρησιμοποιείται για το σχηματισμό του πυρήνα του σωλήνα όπως πιστευόταν παλιά, αλλά και από το σχήμα και την κρυσταλλογραφική δομή του, τα οποία μάθαμε να ελέγχουμε» δήλωσε ο Dr. Harutyunyan, στην ομάδα επιστημόνων του οποίου συμμετείχαν οι Dr. Gugang Chen και Dr. Elena Pigos.

«Είμαστε ενθουσιασμένοι με την ομαδική εργασία και τις συνεργασίες μας με ερευνητές από το Purdue και τη Louisville, που συνετέλεσαν στην επιτυχία της έρευνας», είπε. Οι ερευνητές του Purdue, υπό τον Καθηγητή Eric Stach, χρησιμοποίησαν ένα ηλεκτρονικό μικροσκόπιο για να παρατηρήσουν την ανάπτυξη του νανοσωλήνα, αποκαλύπτοντας ότι αλλαγές στο αεριώδες περιβάλλον μπορεί να μεταβάλλουν το σχήμα των νανοσωματιδίων του μεταλλικού καταλύτη από αιχμηρό, πολυεδρικό σε τελείως στρογγυλό. Οι ερευνητές της Louisville, υπό την καθοδήγηση του Καθηγητή Gamini Sumanasekera, παρήγαγαν τους νανοσωλήνες σε μεγαλύτερες ποσότητες και

έκαναν προσεκτικές μετρήσεις για να προσδιορίσουν κατά πόσον μπορούν να αποκτήσουν μεταλλικές ιδιότητες.

Οι πρωτοποριακές προσπάθειες έρευνας & ανάπτυξης της Honda την τελευταία δεκαετία έχουν αποφέρει ποικίλες καινοτομίες, όπως ανθρωποειδή ρομπότ, συσκευές υποστήριξης βαδίσματος, το HondaJet, τεχνολογίες κυψελών καυσίμου, αυξημένες σοδειές ρυζιού, ηλιακές κυψέλες λεπτού φιλμ. Επίσης συνέβαλλαν στη σχεδίαση και εξέλιξη προϊόντων όπως αυτοκίνητα, μοτοσικλέτες και γεννήτριες.

Η Honda διεξάγει σχετική R&D για καταναλωτικά προϊόντα στις ΗΠΑ από το 1975 στο τμήμα Honda R&D Americas, Inc. Με στόχο την έρευνα μελλοντικών τεχνολογιών, τον Ιανουάριο του 2003, ιδρύθηκε το Honda Research Institute USA, Inc. (HRI-US) μαζί με το HRI-EU (Ευρώπη) και το HRI-JP (Ιαπωνία). Τα Αμερικανικά γραφεία βρίσκονται στην Καλιφόρνια, το Οχάιο και τη Μασαχουσέτη και περιλαμβάνουν ένα τμήμα έρευνας πληροφορικής, το οποίο ασχολείται με τεχνολογίες ανθρώπινης νοημοσύνης και ένα τμήμα επιστημονικής έρευνας υλικών που εστιάζεται σε λειτουργικά νανο-υλικά<sup>97</sup>.

Περαιτέρω, ο Allaoui και οι συνεργάτες του συνέθεσαν πολυμερή νανοσύνθετα εποξικής ρητίνης με ενίσχυση ΠΤΝΣΑ. Για την παρασκευή της μήτρας του νανοσύνθετου απαιτήθηκε η χρήση ελαστομερούς εποξικής μήτρας και εξέτασαν διάφορες περιεκτικότητες ΝΣΑ κατά βάρος. Όπως παρατηρήθηκε το μέτρο ελαστικότητας και η τάση θράυσης διπλασιάστηκαν και τετραπλασιάστηκαν για νανοσύνθετα με περιεκτικότητες 1 και 4% κ.β. αντίστοιχα<sup>98</sup>.

Ο Bai και η ομάδα του διερεύνησαν την επίδραση του μήκους των ΠΤΝΣΑ και του μεγέθους των συσσωματωμάτων τους στις ηλεκτρικές και στις μηχανικές ιδιότητες νανοπολυμερών, που προκύπτουν από την ανάμιξη

---

<sup>97</sup> Πηγή: Honda

<sup>98</sup> Charlsley, L.E., and Warrington, B.S., "Thermal Analysis-Techniques and Applications", The Royal Society of Chemistry, London, 1992.

εποξικής ρητίνης βισφαινόλης Α-επιχλωριδίνης με ΠΤΝΣΑ. Στην περίπτωση των μηχανικών ιδιοτήτων η προσθήκη ΠΤΝΣΑ παρατήρησαν πως αυξάνει το μέτρο ελαστικότητας E και μειώνει την παραμόρφωση θραύσης του νανοπολυμερούς. Επίσης για την Παρασκευή ενός νανοπολυμερούς με υψηλό αποτέλεσμα βελτίωσης της μηχανικής συμπεριφοράς του ένας συμβιβασμός του μεγέθους των συσσωμάτων και του λόγου μήκους/διαμέτρου των νανοσωληνίσκων άνθρακα δίνει πολύ καλύτερα αποτελέσματα<sup>99</sup>.

Ο Paiva και οι συνεργάτες του εξέτασαν τις μηχανικές ιδιότητες νανοπολυμερών με τροποποιημένους και μη νανοσωληνίτες άνθρακα σε πολυβύνιλο-αλκολική μήτρα (PVA). Οι νανοσωληνίσκοι πριν την προσθήκη τους στην πολυμερή μήτρα τροποποιήθηκαν μέσω χημικής διαδικασίας με PVA μικρού μοριακού βάρους. Στη συνέχεια οι υδατοδιαλυτοί τροποποιημένοι νανοσωληνίσκοι άνθρακα, που προέκυψαν, διασκορπίστηκαν στη μήτρα της PVA με μια μέθοδο υγρής χύτευσης, με αποτέλεσμα τη δημιουργία νανোসύνθετων φιλμ PVA/ νανοσωληνίσκων, που χαρακτηρίζονται από ομοιογενή διασπορά της φάσης ενίσχυσης στην έκταση της μήτρας. Για λόγους σύγκρισης των αποτελεσμάτων κατασκευάστηκαν επίσης φιλμ PVA/ μη τροποποιημένων νανοσωληνίσκων και καθαρής PVA<sup>100</sup>.

Τα φιλμ και των τριών τύπων υποβλήθηκαν σε πειράματα εφελκυσμού. Όπως παρατηρήθηκε από την πειραματική διαδικασία τα νανোসύνθετα ανεξαρτήτως του είδους της φάσης ενίσχυσης παρουσίασαν σημαντική βελτίωση του μέτρου ελαστικότητας σε σύγκριση με την καθαρή PVA. Στην περίπτωση των νανোসύνθετων φιλμ των τροποποιημένων νανοσωληνίσκων άνθρακα παρατηρήθηκε πως η χημική τροποποίηση επιτρέπει καλή κατανομή των νανοσωληνίσκων στην έκταση της μήτρας, έχοντας ως αποτέλεσμα τη σημαντική αύξηση της αντοχής νανোসύνθετου ως προς την αντοχή των φιλμ της καθαρής πολυμερούς μήτρας.

---

<sup>99</sup> Hatekeyama, T., and Quinn, X.F., „Thermal Analysis-Fundamentals and Applications to Polymer Science“, 2nd ed., J.Wiley & Sons, New York, 2000.

<sup>100</sup> Manhado, L.M.A., Valentini, L., Biagiotti, J., and Kenny, M.J., Carbon, 2005, 43, 1499.

Αντίθετα, τα νανοσύνθετα με φάση ενίσχυσης τους μη τροποποιημένους νανοσωληνίσκους άνθρακα παρουσιάζουν μείωση της αντοχής τους ως προς την καθαρή PVA.

Ο M.Frogley<sup>101</sup> διερεύνησε τις μηχανικές ιδιότητες νανοσύνθετων βασισμένων σε ελαστομερή πολυμερή μήτρα σιλικόνης (RTV) που φέρουν ως ενίσχυση είτε MTNΣΑ είτε Νανο-ίνες (NIA) άνθρακα υψηλού ποσοστού γραφίτη, με μήκη μεγαλύτερα κάποιων εκατοντάδων μικρόμετρων και διαμέτρους περίπου 200nm.

Από τα πειράματα μονοατονικού εφελκυσμού παρατηρήθηκε δραματική αύξηση του μέτρου ελαστικότητας των νανοσύνθετων συναρτήσει της περιεκτικότητας της φάσης ενίσχυσης ανεξαρτήτως του είδους του νανοεγκλείσματος. Το φαινόμενο αυτό και για τους δύο τύπους δοκιμίων συνοδεύεται από μια μείωση των ιδιοτήτων θραύσης (τάση και παραμόρφωση θραύσης). Όσον αφορά στη βελτίωση του μέτρου ελαστικότητας των δοκιμίων οποιασδήποτε περιεκτικότητα βρέθηκε πως η παρατηρούμενη αύξησή του είναι συνάρτηση της παραμόρφωσης του δοκιμίου για ποσοστά έως και 10 με 20%, παραμόρφωση περαιτέρω του ποσοστού αυτού δεν οδηγεί πλέον σε ενίσχυση του μέτρου ελαστικότητας του νανοσύνθετου.

Η συμπεριφορά αυτή σύμφωνα με τους ερευνητές οφείλεται στο φαινόμενο «ψευδο-διαρροής», που λαμβάνει χώρα στα νανοσύνθετα πολυμερούς ελαστομερούς μήτρας και κατά το οποίο συμβαίνει απελευθέρωση ελαστομερούς μήτρας που είναι εγκλωβισμένη στα συσώματα των νανοσωματιδίων των οποίων σε αυτό το σημείο επέρχεται η αποδόμηση.

Ο Li και οι συνεργάτες του<sup>102</sup> εξέτασαν την επίδραση των ΝΣΑ σε τυπικό τσιμέντο. Χρησιμοποίησαν έτσι τσιμέντο τύπου Πόρτλαντ και MTNΣΑ τους οποίους είτε δεντροποίησαν ή τροποποίησαν χημικά με τη χρήση θειικού και

<sup>101</sup> Saito, Y., Nishikubo, K., Kawabata, K., and Matsumoto, T., J. Appl. Phys., 1996, 80, 3062.

<sup>102</sup> Li GY, Wang PM, Zhao X, (2005) Mechanical behaviour and microstructure of cement composites incorporating surface treated multi walled carbon nanotubes. Carbon: 43: 1239-1245.

νιτρικού οξέος. Τα δοκίμια έγιναν με τυπική ανάδευση και οι ΝΣΑ ήταν σε ποσοστό 2%κ.β. Τα υλικά που προέκυψαν εξετάστηκαν σε κάμψη τριών σημείων και σε θλίψη. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα, οι ΝΣΑ ενίσχυσαν σημαντικά τις παραπάνω ιδιότητες με τους τροποποιημένους ΝΣΑ να έχουν καλύτερη συμπεριφορά από τους μη τροποποιημένους. Η ανωτέρω ερευνητική ομάδα επίσης διαπίστωσε ότι η χρήση ΝΣΑ μείωσε το μέγεθος και το πλήθος των πόρων των δειγμάτων. Τέλος υπογραμμίζεται πως η ύπαρξη στοιχείων όπως θείο, υδρογόνο και οξειδία του ασβεστίου ενισχύουν την πρόσφυση των ΝΣΑ με το τσιμέντο οδηγώντας με αυτόν τον τρόπο στις βελτιωμένες ιδιότητες.

Επίσης, ερευνητές της IBM έχουν κατασκευάσει τρανζίστορ από νανοσωλήνες άνθρακα, οι επιδόσεις των οποίων ξεπερνούν εκείνες των τρανζίστορ από πυρίτιο. Η απόδειξη του επιτεύγματος αυτού που δημοσιεύτηκε στο περιοδικό της αμερικανικής Ένωσης Φυσικών, Applied Physics Letters, ενδέχεται να οδηγήσει στην κατασκευή μικρότερων και ταχύτερων επεξεργαστών υπολογιστών, αντικαθιστώντας το πυρίτιο.

Στο άρθρο τους, οι επιστήμονες της IBM εξηγούν πώς τα τρανζίστορ από νανοσωλήνες άνθρακα -μεγάλου μήκους λεπτά νήματα ατόμων άνθρακα- μετέφεραν πολύ περισσότερο ηλεκτρικό ρεύμα και με ταχύτερο ρυθμό από τα πλέον προηγμένα τρανζίστορ του σήμερα που είναι κατασκευασμένα από πυρίτιο και μέταλλο. Περισσότερο ρεύμα είναι πιθανό να οδηγήσει σε ταχύτερα τρανζίστορ και συνακόλουθα, ταχύτερα ολοκληρωμένα κυκλώματα και υπολογιστές υψηλότερων επιδόσεων.

Οι ερευνητές θεωρούν ότι η νανοτεχνολογία θα μπορούσε να οδηγήσει σε μεγάλα επιτεύγματα σε διάφορους τομείς της βιομηχανίας. Η μελέτη όμως και η χρήση της βρίσκονται ακόμα σε νηπιακό στάδιο και έτσι προβλέπεται ότι θα χρειαστούν ακόμα αρκετές δεκαετίες για να γίνουν ορατά τα πλεονεκτήματά της.

Γιατί όμως τόσο θόρυβος για τις νανοσωλήνες άνθρακα; Οι επιστήμονες εξηγούν ότι, οι επεξεργαστές υπολογιστών έχουν γίνει τόσο

πυκνοκατοικημένοι από τα κυκλώματα που εμπεριέχουν ώστε, καθώς θα εντείνεται το φαινόμενο, σε 15-20 χρόνια θα είναι πλέον ασύμφορη η σχεδίαση και η κατασκευή τους.

Στους νανοσωλήνες όμως, τα άτομα παρατάσσονται μόνα τους σχηματίζοντας μία διάταξη που μοιάζει με νιφάδες χιονιού, εξηγούν στο CNet. Αυτή η ιδιότητά τους τρέφει την ελπίδα ότι εάν χρησιμοποιηθούν κατάλληλα για την κατασκευή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, τα τσιπ του μέλλοντος δεν θα χρειάζονται σχεδίαση(!). Η προοπτική αυτή, μεταξύ άλλων, κρίνεται εξαιρετικά συμφέρουσα για τη βιομηχανία ημιαγωγών και έτσι εξηγείται, εν μέρει, το ενδιαφέρον και η έρευνα για τους νανοσωλήνες άνθρακα και τη νανοτεχνολογία γενικότερα

Ο κόσμος της ηλεκτρονικής έγινε ακόμη μικρότερος, μετά από την πρώτη επίδειξη των ψηφιακών λογικών κυκλωμάτων που έγιναν από νανοσωλήνες από άνθρακα. Ο Cees Dekker και η ομάδα του, στο Πανεπιστήμιο του Ντελφτ στην Ολλανδία, χρησιμοποίησαν διαφορετικούς συνδυασμούς "τρανζίστορ νανοσωλήνων" για να δημιουργήσουν με αυτόν τον τρόπο διάφορες συσκευές, συμπεριλαμβανομένου ενός αναστροφέα τάσης και μιας πύλης NOR. Καθώς η συμβατική μικροηλεκτρονική του πυριτίου, πλησιάζει το όριο του κρίσιμου μεγέθους της, ο Dekker και οι συνάδελφοι του θεωρούν ότι οι συσκευές τους - που λειτουργούν στη θερμοκρασία δωματίου-είναι ένα σημαντικό βήμα προς την νάνο-ηλεκτρονική.

Οι νανοσωλήνες από άνθρακα είναι τυλιγμένα φύλλα από γραφίτη, με διάμετρο περίπου ένα νανόμετρο. Έχουν χρησιμοποιηθεί προηγουμένως για να κάνουν ποικίλα ηλεκτρονικά συστατικά, συμπεριλαμβανομένων των διόδων και τρανζίστορ επιδράσεως πεδίου (FETs). Ένα FET μπορεί να γίνει από ένα νανοσωλήνα με την ένωση των ηλεκτροδίων πυλών, πηγής και αγωγών. Η ομάδα του Dekker έχει τοποθετήσει τώρα αρκετά από αυτά τα FETs σε ένα ενιαίο τσιπ πυριτίου για να διαμορφώσει διαφορετικά κυκλώματα.



Η απλή αναστροφική (inverter) συσκευή τους, αποτελείται από ένα νανοσωλήνα FET και μια μεγάλη πολωμένη αντίσταση: αυτή μετατρέπει μια υψηλή τάση εισόδου σε μια χαμηλή - δηλαδή μετατρέπει το "ένα" "σε "μηδέν" - και αντίστροφα. Με το να προσθέσουν ένα πρόσθετο FET παράλληλα, οι ερευνητές έκαναν μια πύλη NOR. Αυτή η συσκευή χρειάζεται δύο εισόδους "0" για να δώσει μια έξοδο "1", ή δύο "1" για να δώσει ένα "0".

Οποιοσδήποτε από τις πρότυπες πύλες λογικής - AND, OR, NAND και λοιπά - μπορούν να δημιουργηθούν χρησιμοποιώντας διαφορετικές ρυθμίσεις αυτών των FETs. Η ομάδα αυτή δημιούργησε επίσης μια "στατική τυχαία μνήμη πρόσβασης" (RAM) και έναν ταλαντωτή που παράγει ένα σήμα εναλλασσόμενου ρεύματος. Οι συσκευές αυτές ενισχύουν με ένα παράγοντα δέκα.

Η ομάδα του Πανεπιστημίου Ντελφτ που χρησιμοποίησε τη μέθοδο λιθογραφίας με δέσμες ηλεκτρονίων, για να αποθέσει ηλεκτρόδια πυλών αλουμινίου επάνω σε ένα στρώμα πυριτίου, τοποθέτησε τους νανοσωλήνες στην κορυφή, και πρόσθεσε τα χρυσά ηλεκτρόδια μέσω μιας τεχνικής εξάτμισης.

Παρά το επίτευγμά τους, ο Dekker και οι συνάδελφοι του αναγνωρίζουν ότι υπάρχουν ακόμα προκλήσεις που πρέπει να υπερνικηθούν, όπως η δυσκολία να τοποθετήσουν τους νανοσωλήνες ακριβώς πάνω στο στρώμα. Αλλά η ομάδα ελπίζει ότι οι αναδυόμενες τεχνικές - συμπεριλαμβανομένου κι ενός τρόπου να τεθούν οι νανοσωλήνες κατευθείαν επάνω στο τσιπ - μπορούν να λύσουν αυτό το πρόβλημα

Μία ακόμη έρευνα στον τομέα των νανοσωλήνων ανήκει στον Νίκο Ταγματάρχη, έναν 35-χρονο χημικό με διεθνή αναγνώριση για την επιστημονική του δραστηριότητα, που του απονεμήθηκε ένα από τα 25 Ευρωπαϊκά Βραβεία Νέων Ερευνητών (EURYI) του 2004, για εκτέλεση έρευνας αιχμής στο Ινστιτούτο Θεωρητικής Φυσικής και Χημείας του Εθνικού Ιδρύματος Ερευνών. Η βραβευμένη πρόταση του Έλληνα ερευνητή αφορά την ανάπτυξη καινοτόμων υλικών με προηγμένη

λειτουργικότητα μέσω χημικής τροποποίησης νανοσωλήνων άνθρακα και θα υλοποιηθεί στο πλαίσιο των δραστηριοτήτων του Ινστιτούτου στην περιοχή των νανοδομημένων υβριδικών υλικών.

Η ελληνική ερευνητική πρόταση αφορά τη χημική τροποποίηση νανοσωλήνων άνθρακα, δηλαδή των κενών και απίστευτα λεπτών κυλίνδρων γραφίτη (η διάμετρός τους είναι της τάξης του δισεκατομμυριοστού του μέτρου) που έχουν ενθουσιάσει τους επιστήμονες με τις μοναδικές ιδιότητές τους. Στόχος του προτεινόμενου ερευνητικού έργου είναι η σύνθεση νέων μονοδιάστατων υλικών που θα αναπτύσσονται με αυτοοργάνωση στο εσωτερικό των νανοσωλήνων και θα επιτρέψουν μελλοντικά νέες εφαρμογές στην περιοχή της νανοτεχνολογίας, από τη νανοηλεκτρονική μέχρι τη νανοβιοτεχνολογία.

Τα αποτελέσματα του έργου, το οποίο βρίσκεται στην αιχμή του πεδίου των νανοσωλήνων άνθρακα, αναμένεται να οδηγήσουν στη βελτίωση της ανταγωνιστικότητας της έρευνας σε εθνικό και ευρωπαϊκό επίπεδο. Η υποβολή του έργου έγινε σε συνεργασία με το Ινστιτούτο Θεωρητικής Φυσικής και Χημείας του Εθνικού Ιδρύματος Ερευνών και η υλοποίησή του θα γίνει στις εγκαταστάσεις του Ινστιτούτου. Ειδικότερα, το νέο αυτό ερευνητικό έργο θα αναπτυχθεί και θα ενσωματωθεί στις δραστηριότητες του Ινστιτούτου ως Κέντρου Αριστείας σε νανοδομημένα υβριδικά υλικά με προηγμένες λειτουργικότητες<sup>103</sup>.

Ερευνητές από το πανεπιστήμιο του Rice δημιούργησαν ένα συνθετικό υλικό το οποίο γίνεται δυνατότερο ύστερα από επαναλαμβανόμενη τάση, όπως και οι ανθρώπινοι μύς, οι οποίοι δυναμώνουν ύστερα από επαναλαμβανόμενες ασκήσεις.

Ο καθηγητής Pulickel Ajayan με τη νέα αυτή έρευνα δείχνει τις δυνατότητες της σκλήρυνσης νανοσυστατικών βασισμένα στα πολυμερή με πληρωτικά ανθρακούχων νανοσωλήνων. Το μυστικό βρίσκεται μεταξύ της

<sup>103</sup>

<http://www.eie.gr/nhrf/institutes/tpci/news/tpci-euryi2004-press-gr.pdf>

σύνθετης, δυναμικής διεπαφής μεταξύ των νανοδομών και των πολυμερών σε προσεκτικά σχεδιασμένα υλικά νανοσυνθετικών.

Οι επιστήμονες γνωρίζουν, ότι τα μέταλλα μπορούν να σκληρυνθούν με τάση κατά τη διάρκεια επαναλαμβανόμενων παραμορφώσεων, ένα αποτέλεσμα της δημιουργίας και της συσσώρευσης ελαττωμάτων, γνωστής ως μετατόπισης στο κρυσταλλικό τους πλέγμα. Τα πολυμερή τα οποία γίνονται από μακριές και επαναλαμβανόμενες αλυσίδες ατόμων δεν συμπεριφέρονται κατά τον ίδιο τρόπο.

Η ερευνητική ομάδα δεν είναι σίγουρη, γιατί το συνθετικό υλικό συμπεριφέρεται κατά αυτό τον τρόπο. Η χρήση των νανοϋλικών ως πληρωτικού αυξάνει τρομερά την διεπαφική επιφάνεια για την ίδια ποσότητα πληρωτικού υλικού. Έτσι λοιπόν τα προκύπτοντα διεπαφικά αποτελέσματα ενισχύονται καθώς συγκρίνονται με συμβατικά συστατικά.

Ανακάλυψαν επίσης άλλη μία αλήθεια σχετικά με τις ιδιότητες του αντικειμένου. Απλή συμπίεση του υλικού δεν άλλαζε τις ιδιότητες του, μόνο η δυναμική τάση-παραμορφώνοντάς το επανειλημμένα το έκανε άκαμπτο.

Σύμφωνα με την ερευνητική ομάδα αυτού του είδους η έρευνα δημιουργεί περισσότερες ερωτήσεις παρά απαντήσεις. Όμως είναι συναρπαστικό, γιατί είναι εφικτό να μηχανικεύει κανείς διεπαφές, οι οποίες καθιστούν τα υλικά ικανά να κάνουν μη συμβατικά πράγματα<sup>104</sup>.

## **ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΣ ΜΕΣΩ ΝΑΝΟΣΩΛΗΝΩΝ ΑΝΘΡΑΚΑ**

Επιστήμονες του πανεπιστημίου MIT των ΗΠΑ ανακάλυψαν ένα άγνωστο μέχρι τώρα φαινόμενο, το οποίο μπορεί να προκαλέσει ισχυρά ενεργειακά κύματα να ταξιδέψουν μέσω μικροσκοπικών «συρμάτων» (νανοσωλήνων άνθρακα). Η ανακάλυψη, κατά τους ερευνητές, μπορεί να οδηγήσει σε ένα νέο τρόπο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Το πολλά υποσχόμενο φαινόμενο, που ανοίγει ένα νέο πεδίο ενεργειακής έρευνας, ανακαλύφθηκε από ομάδα ερευνητών υπό τον καθηγητή Μάικλ Στράνο του τμήματος χημικών-μηχανικών του αμερικανικού πανεπιστημίου και παρουσιάστηκε στο περιοδικό “Nature Materials”. Σύμφωνα με τους ερευνητές, ένα θερμικό κύμα (ένας κινούμενος παλμός θερμότητας) που «ταξιδεύει» μέσα στο νανο-σύρμα, συμπαρασύρει ηλεκτρόνια καθ’ οδόν, δημιουργώντας έτσι ηλεκτρικό ρεύμα. Ο κρίσιμος παράγων είναι η χρήση ηλεκτρικά και θερμικά αγωγίμων νανοσωλήνων άνθρακα (με διάμετρο ελάχιστα νανόμετρα, δηλαδή δισεκατομμυριοστά του μέτρου), που είναι επικαλυμμένοι με ένα στρώμα άκρως ευαίσθητου καυσίμου, το οποίο παράγει θερμότητα μέσω αποσύνθεσης.

Το καύσιμο «ανάβει» στην μια άκρη του σωλήνα με την χρήση μιας ακτίνας λέιζερ ή ενός σπινθήρα υψηλής τάσης. Με τον τρόπο αυτό, παράγεται ένα θερμικό κύμα που κινείται με ταχύτητα στο εσωτερικό του νανοσωλήνα άνθρακα, όπως η φλόγα που καίει ένα φιτίλι. Η θερμότητα του καυσίμου μέσα στο νανοσωλήνα ταξιδεύει χιλιάδες φορές ταχύτερα από το ίδιο το καύσιμο, αναπτύσσοντας θερμοκρασία γύρω στους 2.700 βαθμούς Κελσίου. Το αστραπιαία κινούμενο αυτό θερμικό κύμα, όπως αποδείχτηκε, ωθεί ηλεκτρόνια κατά μήκος του σύρματος (νανοσωλήνα), παράγοντας ηλεκτρισμό.

Τα θερμικά κύματα έχουν μελετηθεί μαθηματικά εδώ και πάνω από 100 χρόνια, όμως οι ερευνητές του MIT έδειξαν για πρώτη φορά ότι ένα τέτοιο κύμα, κατά μήκος ενός νανο-σύρματος, μπορεί να παράγει ηλεκτρικό ρεύμα. Μετά από μια σειρά πειραμάτων, το σύστημα που δημιουργήθηκε μέχρι στιγμής (αλλά μπορεί να βελτιωθεί κι άλλο στο μέλλον) παράγει, σε σχέση με το βάρος του, 100 φορές μεγαλύτερη ηλεκτρική ενέργεια σε σχέση με το ισοδύναμο βάρος μιας μπαταρίας λιθίου-ιόντων.

Προς το παρόν, σύμφωνα με τους ερευνητές, είναι δύσκολο να προβλεφθούν οι πρακτικές εφαρμογές της νέας τεχνολογίας. Είναι όμως πιθανό ότι θα καταστήσει εφικτή τη λειτουργία υπερβολικά μικρών ηλεκτρονικών συσκευών, όπως ενός αισθητήρα (π.χ. για παρακολούθηση του περιβάλλοντος) ή μιας ιατρικής νανοσυσκευής (που θα μπαίνει στο ανθρώπινο σώμα), με μέγεθος όχι μεγαλύτερο από ένα κόκκο ρυζιού!

Θεωρητικά τουλάχιστον, σύμφωνα με τους αμερικανούς επιστήμονες, τέτοιες συσκευές δεν θα χρειάζονται επαναφόρτιση. Επίσης, θα ήταν δυνατό να συνδυαστούν πολλά μαζί «σύρματα» νανοσωλήνων άνθρακα, ώστε να τροφοδοτηθούν με ηλεκτρική ενέργεια και μεγαλύτερες συσκευές.

Εξάλλου, οι ερευνητές του MIT προσδοκούν, με χρήση διαφορετικών υλικών επικάλυψης του νανοςύρματος, να πετύχουν τη δημιουργία εναλλασσόμενου ρεύματος, πράγμα που ανοίγει νέες δυνατότητες, καθώς το εναλλασσόμενο ρεύμα αποτελεί τη βάση των ραδιοκυμάτων, π.χ. στις μεταδόσεις της κινητής τηλεφωνίας<sup>105</sup>.

#### **ΗΛΕΚΤΡΟΧΗΜΙΚΗ ΟΞΕΙΔΩΣΗ ΦΙΛΜ ΝΑΝΟΣΩΛΗΝΩΝ ΑΝΘΡΑΚΑ**

Η ηλεκτροχημική τροποποίηση των νανοσωλήνων άνθρακα είναι μια ανερχόμενη μέθοδος χημικής τροποποίησης και επιτυγχάνεται με την εφαρμογή ρεύματος και τάσης. Παρακάτω παρατίθενται κάποιες ερευνητικές προσπάθειες τροποποίησης νανοσωλήνων άνθρακα που ήδη έχουν γίνει.

Το 1998 οι Rinzler, A.Liu, P.Huffman et al με απλή οξείδωση και χρησιμοποιώντας οξειδωτικά μέσα όπως το νιτρικό οξύ και το υπεροξείδιο του υδρογόνου κατάφεραν να αποδείξουν ότι η τροποποίηση των νανοσωλήνων άνθρακα επιτυγχάνεται<sup>106</sup>. Το 1999 ο Sumanasekera και οι συνεργάτες του κατάφεραν και εισήγαγαν δισουλφονικά ιόντα σε νανοσωλήνες μονού τοιχίου χρησιμοποιώντας ως ηλεκτρολυτικό μέσο το

<sup>105</sup> <http://www.enet.gr/?i=news.el.article&id=139199>

<sup>106</sup> Rinzler, A.Liu, P.Huffman: Appl.Phys.A 67, p.29 (1998)

θεικό οξύ με χρήση ηλεκτροχημικής οξειδωσης<sup>107</sup>. Το 2001 οι E.Unger,A.Graham,F.Kreypl et al, χρησιμοποίησαν φιλμ νανοσωλήνων άνθρακα μικρών διαστάσεων ως άνοδο σε ηλεκτροχημικό κελί τριών ηλεκτροδίων. Χρησιμοποίησαν ηλεκτρολύτες 2M NaCl και KBr σε ρεύμα 100mA για 16 με 24 ώρες. Σκοπός ήταν να επιτευχθεί η είσοδος στην επιφάνεια του φιλμ νανοσωλήνα άνθρακα ατόμων Cl και του Br αλλά και καρβοξυλικών ομάδων, διότι αποδείχτηκε ότι η παρουσία αυτών των ομάδων αύξησε τη διαλυτότητα των νανοσωλήνων σε νερό αλλά και σε αλκοόλη σε σχέση με το αρχικό μη τροποποιημένο δείγμα, συμμετέχοντας έτσι σε ειδικές εφαρμογές (όπως σε υδατικές επιφάνειες για ηλεκτρικά κυκλώματα). Επίσης το χλώριο (C-Cl) μπορούσε να συμμετάσχει σε αντιδράσεις υποκαταστάσεις παράγοντας νανοσωλήνες άνθρακα ενωμένους με άζωτο [49]. Μια χρονιά αργότερα (2002) οι S.E .Kooi,U Schlechtm,M.Burghard et al χρησιμοποιώντας τους νανοσωλήνες άνθρακα είτε στην άνοδο είτε στην κάθοδο μπορούσαν να προκαλέσουν την αναγωγή ή την οξειδωση μικρών μορίων δημιουργώντας ρίζες που μπορούσαν να επιτεθούν στην επιφάνεια του νανοσωλήνα και να δημιουργήσουν δεσμούς C-C<sup>108</sup>. Το 2003 οι Into et al μελέτησαν την επίδραση του διαλύματος KCl σε νανοσωλήνες άνθρακα πολλαπλού τοιχίου εφαρμόζοντας ένα θετικό δυναμικό και διαπίστωσαν το γρήγορο καθαρισμό των νανοσωλήνων. Αργότερα (το 2004) οι Hai-Tao Fang,Chang Liu et al με δεδομένο ότι ήθελαν να πετύχουν καθαρισμό νανοσωλήνων άνθρακα μονού τοιχίου αλλά και υψηλά ποσοστά οξειδωσης πρότειναν ως τεχνική καθαρισμού την ηλεκτροχημική οξειδωση, χρησιμοποιώντας διαλύματα καυστικής ποτάσας 6M σε ηλεκτροχημικό κελί όπου οι νανοσωλήνες ήταν σε μορφή σκόνης. Μεταβάλλοντας το δυναμικό κατάφεραν να πετύχουν καθαρισμό του δείγματος αλλά και της οξειδωσης αν η διαδικασία

---

<sup>107</sup> G. U. Sumanasekera, J. L. Allen, S. L. Fang, A. L. Loper, A. M. Rao, and P. C. Eklund :J. Phys. Chem. B 103, pp 4292–4297 (1999)

<sup>108</sup> Gambardella, A. Dallmeyer, K. Maiti, M.C. Malagoli, W. Eberhard, K. Kern, and C. Carbone: Angew Chem.In.Ed 41, p 1353 (2002)

συνεχιζόταν<sup>109</sup>. Η ηλεκτροχημική λοιπόν οξειδωση οδηγούσε σε ελεγχόμενη διαδικασία τροποποίησης των νανοσωλήνων άνθρακα.

Το 2005 οι Chen-Ming Liu, Hong-Bin Cao Yu-Ping Li, et al δοκίμασαν ηλεκτροχημική οξειδωση σε σκόνη νανοσωλήνων άνθρακα (πολλαπλού τοιχώματος) αλλά με σταθερό δυναμικό 2.0V χρησιμοποιώντας ηλεκτρολύτη το NaCl (συγκέντρωσης 2M). Δοκιμάστηκε για διάφορους χρόνους. Διαπιστώθηκε ότι σε χρονική διάρκεια 10-30min η επιφάνεια των νανοσωλήνων άνθρακα είχε αρκετή ποσότητα υδροξυλίων (OH) ικανή για να μπορέσει να χρησιμοποιηθεί το παραγόμενο δείγμα ως αισθητήρας για την ποσοτική μέτρηση νιτροβενζονίου στο νερό<sup>110</sup>.

Σε όλες τις παραπάνω ερευνητικές προσπάθειες η διαδικασία της οξειδωσης γινόταν σε σύστημα ηλεκτρόλυσης τριών ηλεκτροδίων. Στο ένα ηλεκτρόδιο (κυρίως πλάκα πλατίνας) γινόταν η επαφή με τη γραφιτική σκόνη, το άλλο ηλεκτρόδιο πλατίνας αποτελούσε το δεύτερο ηλεκτρόδιο και το τρίτο συνδεόταν με έναν μετρητή κυκλικής βολτομετρίας όπου έδινε χαρακτηριστικούς βρόγχους (διαγράμματα τάσης και έντασης) που αποδείκνυε την επίτευξη της οξειδωσης ή όχι με το κλείσιμο ή το άνοιγμα αυτών αντίστοιχα. Το βασικό μειονέκτημα αυτής της μεθόδου εκτός από την πολυπλοκότητα της συσκευής ήταν και η δυσκολία ενσωμάτωσης φιλμ νανοσωλήνων άνθρακα μεγαλύτερης κλίμακας σε ένα από τα ηλεκτρόδια, γι' αυτό κατασκευάστηκε νέο απλουστευμένο ηλεκτροχημικό κελί (από τους Δρ.Zdenko Spitalsky και φοιτητή Γ. Μωραϊτή) με δύο ηλεκτρόδια όπου στο ένα από τα δύο θα γίνεται η ενσωμάτωση του φιλμ νανοσωλήνα άνθρακα. Η διαφοροποίηση επίσης σχετίζεται και με τη μεταβολή του ρεύματος αντί της τάσης. Επίσης γενικά η ηλεκτροχημική οξειδωση είναι μια τεχνική που δε χρειάζεται θέρμανση κάτι που είναι απαραίτητη στην απλή χημική οξειδωση.

---

<sup>109</sup> Rinzler, A. Liu, P. Huffman: Appl. Phys. A 67, p.29 (1998)

<sup>110</sup> Chen-Ming Liu Hong-Bin Cao Yu-Ping Li Hong-Bin Xuand Yi Zhang: Chin. J. of Analytical Chemistry 44, pp 2919-2924 (2006)

Τρεις ερευνητές με επικεφαλής έναν Έλληνα, τον Φαίδωνα Αβούρη [38] της IBM, στην Καλιφόρνια, ανέπτυξαν μια νέα επαναστατική τεχνολογία τρανζίστορς από νανοσωλήνες άνθρακα, που μπορεί να κάνει δυνατή την παραγωγή μιας νέας τάξης, μικρότερων (500 φορές), ταχύτερων και μικρότερης ενεργειακής κατανάλωσης μικροσίπς από τα ήδη υπάρχοντα μικροσίπς πυριτίου. Πρέπει να σημειωθεί ότι τα τρανζίστορς είναι οι θεμέλιοι λίθοι όλων των ηλεκτρονικών συστημάτων – δρουν σαν γέφυρες που μεταφέρουν δεδομένα από το ένα μέρος του κυκλώματος στο άλλο. Συνοπτικά η μέθοδός τους έχει ως εξής: Το πλέγμα όλων των νανοσωλήνων μεταλλικών και ημιαγωγών αποτίθεται πάνω σε υπόστρωμα οξειδίου του πυριτίου. Μια μεταλλική μάσκα τοποθετείται πάνω από τους νανοσωλήνες και παίζει ρόλο ηλεκτροδίου. Χρησιμοποιώντας ως δεύτερο ηλεκτρόδιο το υπόστρωμα πυριτίου οι επιστήμονες θέτουν σε μη αγώγιμη κατάσταση τους ημιαγωγούς νανοσωλήνες. Μετά με μια κατάλληλη τάση που εφαρμόζεται στο υπόστρωμα επιτυγχάνεται η καταστροφή μόνο των μεταλλικών αφού μόνον αυτοί είναι αγώγιμοι και διαρρέονται από ρεύμα. Το αποτέλεσμα είναι ένα πυκνό δίκτυο ημιαγωγών νανοσωλήνων που χρησιμοποιούνται για να χτιστούν τα λογικά κυκλώματα.

### **Νανοσωλήνες σε ρόλο σούπερ μπαταριών.**

Ερευνητές του Πανεπιστημίου MIT βρήκαν έναν νέο επαναστατικό τρόπο να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια. Οι ερευνητές χρησιμοποίησαν ηλεκτρικά και θερμικά αγώγιμους νανοσωλήνες άνθρακα, που είναι επικαλυμμένοι με ένα στρώμα άκρως ευαίσθητου καυσίμου, το οποίο παράγει θερμότητα μέσω αποσύνθεσης. Το καύσιμο «ανάβει» στη μια άκρη του σωλήνα με τη χρήση μιας ακτίνας λέιζερ ή ενός σπινθήρα υψηλής τάσης. Με τον τρόπο αυτόν παράγεται ένα θερμικό κύμα που κινείται με πολύ μεγάλη ταχύτητα στο εσωτερικό του νανοσωλήνα άνθρακα.

Η θερμότητα του καυσίμου μέσα στον νανοσωλήνα ταξιδεύει χιλιάδες φορές ταχύτερα από το ίδιο το καύσιμο, αναπτύσσοντας θερμοκρασία γύρω στους 2.700 βαθμούς Κελσίου, προκαλώντας ένα άγνωστο ως σήμερα



φαινόμενο. Το θερμικό κύμα που κινείται μέσα στο νανο-σύρμα συμπαρασύρει στο πέρασμά του ηλεκτρόνια παράγοντας έτσι ηλεκτρικό ρεύμα. Στα πειράματα που έχουν γίνει μέχρι στιγμής το σύστημα παραγωγής ενέργειας που δημιουργήθηκε παράγει 100 φορές μεγαλύτερη ηλεκτρική ενέργεια απ' ό,τι μια μπαταρία λιθίου-ιόντων<sup>111</sup>.

Μια «αιώνια» μπαταρία με τη βοήθεια της νανοτεχνολογίας δημιούργησαν οι ειδικοί του Πανεπιστημίου του Ιλινόι, στις ΗΠΑ.

Συγκεκριμένα, οι επιστήμονες αντικατέστησαν τα μεταλλικά καλώδια μπαταρίας κινητού τηλεφώνου με νανοσωλήνες, παρατείνοντας έτσι τη διάρκεια ζωής της κατά 100 φορές.

*«Πιστεύω ότι όλοι όσοι ταλαιπωρούνται με τη συχνή φόρτιση ηλεκτρονικών συσκευών, θα ήθελαν μια μπαταρία για το κινητό τους τηλέφωνο ή το λάπτοπ τους που να διαρκεί εβδομάδες ή ακόμη και μήνες»* αναφέρει ο ερευνητής **Έρικ Ποπ** από το Ινστιτούτο Προηγμένων Επιστημών και Τεχνολογίας Μπέκμαν.

Όπως υποστηρίζει ο Ποπ, η ανακάλυψη της ομάδας του θα μπορούσε να οδηγήσει σε μια νέα γενιά έξυπνων κινητών εξοπλισμένων με «αιώνιες» μπαταρίες. Ή ακόμη, σε συσκευές οι οποίες θα λειτουργούν συσσωρεύοντας θερμική ή ηλιακή ενέργεια και δεν θα εξαρτώνται πλέον από μπαταρίες.

Σύμφωνα με την επιθεώρηση «Science», οι νανομπαταρίες θα μπορούσαν να φορτίσουν πολύ μεγαλύτερες συσκευές, ή ακόμη και ολόκληρα συστήματα. *«Η ανακάλυψη αυτή θα μπορούσε να είναι σημαντική για οποιαδήποτε συσκευή λειτουργεί με μπαταρία, όπως π. χ. δορυφόροι, εξοπλισμός τηλεπικοινωνιών σε απομακρυσμένες περιοχές ή άλλα συστήματα με επιστημονικές ή στρατιωτικές εφαρμογές»* αναφέρει ο Ποπ<sup>112</sup>.

<sup>111</sup> <http://www.chemist.gr/2010/04/3169/#ixzz1lAc7Ohpj>

<sup>112</sup> <http://www.chemist.gr/2011/03/4913/#ixzz1lAcKnti7>

Ερευνητές του Πανεπιστημίου Στάνφορντ στην Καλιφόρνια προσπαθούν να εμπλουτίσουν την γκαρνταρόμπα μας με ρούχα που μπαίνουν στην πρίζα και λειτουργούν ως φορτιστές για κινητά τηλέφωνα ή φορητούς υπολογιστές.

Απλά υφάσματα από βαμβάκι ή πολυεστέρα μπορούν να μετατραπούν σε μπαταρίες ή σε ηλεκτρονικά κυκλώματα χάρη σε μια νέα αμερικανική τεχνολογία που χρησιμοποιεί κυλινδρικά μόρια άνθρακα.

Η μέθοδος που παρουσιάζεται στην επιθεώρηση Nano Letters φαίνεται αρκετά απλή: το ύφασμα βυθίζεται σε ένα «μελάνι» που αποτελείται από νανοσωλήνες άνθρακα, με μήκος μερικών δισεκατομμυριοστών του μέτρου, οι οποίοι μετατρέπουν το πανί σε ένα υπερμεγέθες κύκλωμα, ικανό να αποθηκεύει μικρά ποσά ενέργειας.

Μέχρι σήμερα, η ερευνητική ομάδα είχε δοκιμάσει την επίστρωση νανοσωλήνων μόνο σε χαρτί.

«Τα φορητά ηλεκτρονικά αποτελούν μια αναπτυσσόμενη κατηγορία υλικών [...] τα οποία επιτρέπουν την υλοποίηση πολλών εφαρμογών και σχεδιασμών που παρέμεναν ανέφικτοι για τις παραδοσιακές τεχνολογίες ηλεκτρονικής» γράφει η ομάδα του Δρ Γι Κούι.

Τμήματα υφάσματος που έχουν επιστρωθεί με το μελάνι νανοσωλήνων μπορούν να συνδυαστούν με συμβατικά, μονωτικά υφάσματα ώστε να σχηματίσουν πυκνωτές που αποθηκεύουν ενέργεια. Τα υφασμάτινα ηλεκτρονικά διατηρούν τις ιδιότητές τους αν παραμορφωθούν ή τεντωθούν, ακόμα κι αν βραχούν με νερό, επισημαίνουν οι ερευνητές. Εξηγούν επίσης ότι η χωρητικότητα των υφασμάτινων μπαταριών εξαρτάται από την επιφάνειά τους, οπότε ένα ηλεκτρονικό παντελόνι θα προσέφερε περισσότερη ενέργεια από ένα αντίστοιχο εσώρουχο<sup>113</sup>.

Η νανοτεχνολογία αν και έχει εκθειαστεί τόσο από τα μέσα μαζικής ενημέρωσης, δεν είναι ούτε πανάκεια αλλά ούτε και χωρίς προβλήματα. Τα

<sup>113</sup>

www.in.gr

κάθε λογής νανοσωματίδια που έχουν κατασκευαστεί αλλά και κατασκευάζονται από τους επιστήμονες δημιουργούν ανησυχίες όσον αφορά την αλληλεπίδρασή τους με ζωντανούς οργανισμούς αλλά και τον ίδιο τον άνθρωπο. Η νανοτεχνολογία μπορεί να φαντάζει εντυπωσιακή και να μπορεί να δίνει λύση σε πολλά προβλήματα του παρελθόντος, αλλά κάτι τέτοιο δεν συνεπάγεται ότι δεν μπορεί να δημιουργήσει νέα και μεγαλύτερα.

Για παράδειγμα όχι πολύ καιρό πριν, το 2004 παρατηρήθηκε σε μία έρευνα ότι 48 ώρες έκθεσης σε νανοσωματίδια όπως τα φουλερένια (νανοσωληνες άνθρακα σε σφαιρική μορφή) ενός ψαριού προκάλεσε εγκεφαλικές βλάβες και γονιδιακές αλλαγές. Τα κάθε λογής νανοσωματίδια κανείς δεν γνωρίζει με βεβαιότητα τι θα προκαλέσουν στον άνθρωπο αν μπουν στην τροφική αλυσίδα και είναι κάτι το οποίο θα πρέπει να μας κάνει να είμαστε προσεκτικοί με την νέα αυτή τεχνολογία. Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό, η τοξική επίδραση σε κάποιον ζωντανό οργανισμό του οικοσυστήματος, μπορεί πολύ εύκολα (πχ. μέσω μόλυνσης του υδροφόρου ορίζοντα) να δημιουργήσει ανεπανόρθωτες βλάβες στο περιβάλλον. Τα νανοσωματίδια μπορεί κατά βάση να αποτελούνται από στοιχεία που υπάρχουν και στην κανονική κλίμακα του κόσμου μας, αλλά λόγω του εξαιρετικά μικρού μεγέθους τους είναι σε θέση να αλληλεπιδράσουν με τα κύτταρα ή το γενετικό υλικό ενός οργανισμού με τρόπο απρόβλεπτο μέχρι στιγμής.

Για αυτό το λόγο πολλοί επιστήμονες πασχίζουν να βρουν λύσεις ούτως ώστε να συνδυάσουν τις εκπληκτικές δυνατότητες των νανοσωματιδίων και νανοϋλικών με την μέγιστη δυνατή ασφάλεια στη χρήση τους. Τα νανοσωματίδια ήδη έχουν μπει στη ζωή μας σε πολλά υλικά που κυκλοφορούν στο εμπόριο, αλλά και πολλές θεραπείες του άμεσου μέλλοντος βασίζονται σε αυτά. Η πιο γνωστή τους εφαρμογή την οποία έχουμε αναφέρει και σε παλιότερα άρθρα στο Medgreece, είναι στην καταπολέμηση του καρκίνου.

Σε μια παρόμοια προσπάθεια επιστήμονες από το University of California, San Diego, προσπάθησαν αν βρουν έναν τρόπο να

κατασκευάσουν νανοσωματίδια τα οποία θα μπορούν να καταστρέφουν καρκινικούς όγκους αλλά στη συνέχεια θα καταστρέφονται ώστε να περιορίζονται οι τοξικές συνέπειες.

Ο καθηγητής χημείας Michael Sailor, από το παραπάνω πανεπιστήμιο κατασκεύασε με την ομάδα του νανοσωματίδια από πυρίτιο τα οποία έχουν κάποιες μοναδικές ιδιότητες.

Η διαδικασία κατασκευής τους σε γενικές γραμμές είναι η εξής: Στην αρχή παίρνουν φύλλα πυριτίου, στα οποία διοχετεύουν ηλεκτρικό ρεύμα ούτως ώστε να μετατραπούν σε πορώδη. Στη συνέχεια τα φύλλα θρυμματίζονται με την βοήθεια υπερήχων και υποβάλλονται σε διάφορες διαδικασίες που σκοπό έχουν την αλλαγή της δομής τους, ώστε τελικά να μετατραπούν σε σωματίδια τα οποία (χωρίς τη χρήση άλλων υλικών), έχουν την ικανότητα να εκπέμπουν μια κόκκινη λάμψη κάτω από υπεριώδες φως. Το τελευταίο είναι ιδιαίτερα σημαντικό μιας και τα υπόλοιπα νανοσωματίδια που έχουν την ιδιότητα να λάμπουν, το οφείλουν σε βαρέα μέταλλα και άλλες τεχνικές οι οποίες συνήθως είναι τοξικές για τον οργανισμό.

Τα νανοσωματίδια αφού εισαχθούν στον οργανισμό, μέσω της κυκλοφορίας του αίματος προσκολλώνται στα καρκινικά κύτταρα. Λόγω του ότι μπορούν και λάμπουν, είναι δυνατόν κατά τη διάρκεια μιας επέμβασης με τη χρήση μόνο υπεριώδους φωτός, ο χειρουργός να είναι σε θέση να διακρίνει και το παραμικρό τμήμα του όγκου με ευκολία, καθιστώντας την αφαίρεσή του ευκολότερη, ασφαλέστερη (ώστε να αφαιρεθεί όσο γίνεται λιγότερος υγιής ιστός) και σε μεγαλύτερη έκταση.

Μια άλλη ιδιότητα των εν λόγω σωματιδίων είναι ότι είναι σχετικά μεγάλα σε μέγεθος, πράγμα που βοηθά την συγκράτηση μεγαλύτερης ποσότητας φαρμάκου από τα συνήθη νανοσωματίδια.

Τα νανοσωματίδια συχνά σε διάφορες έρευνες χρησιμοποιούνται ως μεταφορείς χημικών ουσιών σε διάφορα τμήματα του σώματος. Αυτό συμβαίνει λόγω του ότι μπορούν και μεταφέρουν μικροσκοπικές δόσεις από

το φάρμακο, σε πολύ συγκεκριμένες τοποθεσίες με ακρίβεια, μειώνοντας δραματικά την έκθεση των υγιών κυττάρων στην εκάστοτε θεραπεία (πχ. χημειοθεραπεία), και κατά συνέπεια τις ανεπιθύμητες παρενέργειες.

Το μεγαλύτερο όμως πλεονέκτημά τους είναι ότι μετά από ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, είναι τα μοναδικά νανοσωματίδια που έχουν την ιδιότητα να αρχίζουν να αποσυντίθεται σε απλούστερα και αβλαβή υλικά, τα οποία αποβάλλονται από το σώμα μέσω των νεφρών.

Σε όλες τις δοκιμές που έγιναν σε ποντίκια, δεν αποδείχθηκε καμία μόνιμη βλάβη στα όργανα που πλήττονται συνήθως σε τέτοιες περιπτώσεις, κάτι το οποίο δημιουργεί ευνοϊκές προϋποθέσεις για την γρήγορη εφαρμογή έστω και πειραματικά σε ανθρώπους<sup>114</sup>.

### **Επίδραση του ποσοστού προσθήκης νανο-σωλήνων άνθρακα στις μηχανικές και ηλεκτρικές ιδιότητες πολυμερικής μήτρας συνθέτου υλικού.**

Από το 2020 και πλέον, η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει θέσει σαφείς στόχους για την αεροναυπηγική: τα αεροσκάφη θα πρέπει να είναι φιλικά προς το περιβάλλον, δηλαδή πρέπει να καταναλώνουν λιγότερα καύσιμα και να ρυπαίνουν ελάχιστα. Επιπρόσθετα, από τους κύριους στόχους είναι και η κατασκευή του "έξυπνου" αεροπλάνου, το οποίο θα καταλαβαίνει κατά την διάρκεια της πτήσης εάν έχει πραγματοποιηθεί κάποια βλάβη στα δομικά κατασκευαστικά στοιχεία του και θα ειδοποιεί τους τεχνικούς για επιδιόρθωση μόλις προσγειωθεί. Τα σύνθετα υλικά καταλαμβάνουν ποσοστό περί το 40% επί των υλικών που χρησιμοποιούνται στα πολιτικά αεροσκάφη ενώ στα μαχητικά αεροσκάφη το ποσοστό τους ξεπερνά το 90%.

Σε ερευνητικές εργασίες στην τελευταία δεκαετία, αποδείχτηκε ότι η προσθήκη νανο-σωλήνων άνθρακα σε ρητίνες τις καθιστά ηλεκτρικά

---

<sup>114</sup> <http://medgreece.gr/2009>

αγώγιμες. Η χρήση αυτών των προ-εμποτισμένων ρητινών με νανο-σωλήνες άνθρακα ως υλικό για την μήτρα των συνθέτων υλικών, επιτρέπει την μέτρηση της αγωγιμότητά τους και την καταγραφή της μεταβολής της με την ταυτόχρονη μεταβολή του μηχανικού φορτίου. Χρησιμοποιώντας την απ' ευθείας συσχέτιση μεταξύ του μηχανικού φορτίου με την αγωγιμότητα του υλικού, είναι δυνατή η εκτίμηση του μηχανικού φορτίου στα δομικά κατασκευαστικά του αεροσκάφους κατά την διάρκεια της πτήσης.

Επιστήμονες στο Τεχνολογικό Ίδρυμα του Ισραήλ (Technion) έχουν εκμεταλλευτεί την ισχύ του DNA για να δημιουργήσουν ένα αυτοσυναρμολογούμενο νανοτρανζίστορ, το βασικό λίθο της ηλεκτρονικής. Η έρευνα, που δημοσιεύεται στο περιοδικό Science της 21 Νοεμβρίου, είναι ένα κρίσιμο βήμα για την ανάπτυξη των συσκευών νανοκλίμακας.

Οι Ισραηλινοί επιστήμονες, συγκεκριμένα, εκμεταλλεύτηκαν τις δυνατότητες κάλυψης της κατασκευής με DNA και τις ηλεκτρονικές ιδιότητες των νανოსωλήνων από άνθρακα για να δημιουργήσουν νανοτρανζίστορ αυτοσυναρμολογούμενα.

Ο Erez Braun, ο επικεφαλής επιστήμονας στο πρόγραμμα και συνεργάτης καθηγητής στη Σχολή Φυσικής στο Technion, λένε ότι οι επιστήμονες σκέπτονται να χρησιμοποιήσουν τη βιολογία για να φτιάξουν ηλεκτρονικές διατάξεις, όπως το τρανζίστορ, με συναρμολόγηση τους χωρίς κανένα ανθρώπινο χέρι. Εντούτοις, μέχρι τώρα, δεν έχει ακόμα δειχτεί στο εργαστήριο "Αυτή η εργασία εμφανίζει ότι μπορείτε να ξεκινήσετε με τις πρωτεΐνες του DNA και τη μοριακή βιολογία και να κατασκευάσετε μια ηλεκτρονική συσκευή," λέει ο Braun.

Η ομάδα αυτή υπερνίκησε τα προβλήματα κατασκευής νανοτρανζίστορ με μια διαδικασία δύο βημάτων. Πρώτα χρησιμοποίησαν πρωτεΐνες για να επιτρέψουν σε νανοςωλήνες από άνθρακα να συνδεθούν σε συγκεκριμένες περιοχές στα σκέλη του DNA. Κι έπειτα μετέτρεψαν το υπόλοιπο μόριο του DNA σε αγωγή καλώδιο.

Ο νανοσωλήνας από άνθρακα, που χρησιμοποιείται στο πείραμα, είναι μήκους μόνο 1 nm ( $10^{-9}$ ), ή 1 pm ( $10^{-12}$ ).

Στην επιστήμη των υπολογιστών, καθώς οι επιστήμονες φθάνουν στα όρια της χρήσης του πυριτίου, ο νανοσωλήνας από άνθρακα πιστεύεται ότι θα είναι το επόμενο βήμα για την κατασκευή τρανζίστορ πάνω σε ένα τσιπ, με πολύ μεγάλες ταχύτητες στον υπολογισμό και τη μνήμη.

Η ομάδα του Braun άρχισε τη διαδικασία κατασκευής τους επενδύοντας ένα κεντρικό μέρος ενός μακρομορίου DNA με πρωτεΐνες από ένα βακτηρίδιο *E. Coli*. Έπειτα, νανοσωλήνες από άνθρακα επενδύθηκαν με αντισώματα τα οποία προστέθηκαν, και τα οποία δεσμεύτηκαν πάνω στην πρωτεΐνη.

Μετά από αυτό, προστέθηκε ένα διάλυμα ιόντων αργύρου. Τα ιόντα συνδέονται χημικά με τη 'σπονδυλική στήλη' του φωσφορικού άλατος του DNA, αλλά μόνο εκεί όπου καμία πρωτεΐνη δεν έχει συνδεθεί. Μια αλδεύδη, ακολουθώντας, μειώνει τα ιόντα στο μεταλλικό άργυρο, σχηματίζοντας έτσι τα θεμέλια της κατασκευής ενός αγωγίμου καλωδίου.

Για να ολοκληρωθεί η συσκευή, προστέθηκε και χρυσός. Αυτός ενώνεται με τον άργυρο και δημιουργούν ένα καλώδιο πλήρως αγωγίμο. Το τελικό αποτέλεσμα είναι μια συσκευή νανοσωλήνα από άνθρακα συνδεδεμένη και στα δύο άκρα από ένα σύρμα χρυσού και αργύρου.

Η συσκευή λειτουργεί ως transistor όταν μεταβάλλεται η ηλεκτρική τάση που εφαρμόζεται στο υπόστρωμα. Αυτή αναγκάζει τους νανοσωλήνες είτε να γεφυρώσουν το χάσμα μεταξύ των συρμάτων - ολοκληρώνοντας το κύκλωμα - είτε όχι. Άρα η συσκευή μπορεί να γίνει διακόπτης on και off με την εφαρμογή κάποιας τάσης.

Από τις 45 νανοσυσκευές που δημιουργήθηκαν σε θερμοκρασία δωματίου, σχεδόν το ένα τρίτον προέκυψε ως αυτοσυναρμολογούμενο τρανζίστορ. Η ομάδα έχει συνδέσει ήδη δύο από τις συσκευές μαζί, χρησιμοποιώντας τη βιολογική τεχνική.

Ο μόνος περιορισμός για τις μελλοντικές συσκευές είναι ότι τα συστατικά πρέπει να είναι συμβατά με τις βιολογικές αντιδράσεις και τη διαδικασία της μεταλλικής επίστρωσης.

Ο Braun υπογράμμισε ότι οι υπολογιστές είναι μία μόνο από τις εφαρμογές που μπορούν να έχουν αυτές οι διατάξεις, παραδείγματος χάριν, μικροσκοπικοί αισθητήρες που θα εκτελούν διαγνωστικές δοκιμές στο χώρο της υγείας.



Αν και έχουν ήδη φτιαχτεί τρανζίστορ από νανοσωλήνες άνθρακα, οι επιστήμονες από το Ισραήλ θέλουν αυτά τα νανοκυκλώματα να αυτοσυναρμολογούνται, επιτρέποντας έτσι μια μεγάλης κλίμακας κατασκευή τέτοιων ηλεκτρονικών.

Το DNA, σύμφωνα με τον Braun, είναι κατάλληλο γιατί είναι αυτοσυναρμολογούμενες δομικές μονάδες. Έχουν όμως ένα μειονέκτημα, δεν άγουν το ηλεκτρικό ρεύμα.

Ο στόχος του Braun, όπως εξηγήθηκε, ήταν να δημιουργηθεί ένα κύκλωμα, με τους νανοσωλήνες να είναι ευθυγραμμισμένοι παράλληλα με το σκέλος του DNA, συναντώντας τα νανوسύρματα σε καθένα άκρο. Έτσι θα κατασκευαζόταν ένα κύκλωμα.

"Οι νανοσωλήνες με άνθρακα είναι φυσικώς άκαμπτες δομές, και το πρωτεϊνικό επίστρωμα καθιστά, επίσης, το σκέλος του DNA άκαμπτο. Οι δύο άκαμπτες ράβδοι θα ευθυγραμμιστούν παράλληλα η μια στην άλλη, κάνοντας κατά συνέπεια ένα ιδανικό κατασκεύασμα DNA-νανοσωλήνα. Δηλαδή ένα κύκλωμα με νανοσωλήνα αυτοσυναρμολογούμενο," ολοκλήρωσε.



Ο Braun πρόσθεσε, πάντως, ότι ενώ αυτή η έρευνα καταδεικνύει τη δυνατότητα χρήσης της βιολογίας ως πλαίσιο στην κατασκευή ηλεκτρονικών διατάξεων, η δημιουργία αυτοσυναρμολογούμενων τρανζίστορ από νανοσωλήνες άνθρακα έχει ακόμα μέλλον<sup>115</sup>.

### **Η μεθοδολογία διαχείρισης των κινδύνων και το νομικό σκέλος.**

Η διαχείριση κινδύνου των νανοτεχνολογιών σαν τεχνολογίες αιχμής αποτέλεσε αντικείμενο συστηματικής μελέτης από το 2005 από το Διεθνές Συμβούλιο για τη διαχείριση Κινδύνου (IRGC). Οι τροποποιήσεις, που μπορεί να επιφέρουν τα νανοϋλικά και οι νανοδιατάξεις στον άνθρωπο και το φυσικό περιβάλλον μπορεί να προσφέρουν οφέλη (π.χ. βελτιστοποιήσεις διαγνωστικών και θεραπευτικών μεθόδων, ποσότητας και ποιότητας πόσιμου νερού, καλύτερη εκμετάλλευση ηλιακής ενέργειας, νέα συστήματα διαχείρισης νερού και απορριμμάτων κ.λπ.). Ωστόσο, εγκυμονούν και κινδύνους, άμεσους (π.χ. τοξικότητα λόγω της κλίμακας των υλικών) και έμμεσους, που σχετίζονται με τις κοινωνικές, οικονομικές, πολιτικές και ηθικές προεκτάσεις της χρήσης νανοπροϊόντων.

Αναγνωρίζοντας, ότι οι Νανοεπιστήμες και Νανοτεχνολογία (N&N) αναπτύσσονται με πολύ ταχύ ρυθμό, οι κίνδυνοι και οι ηθικές επιπτώσεις θα πρέπει συνεχώς να ελέγχονται και να επιλαμβάνονται με επίκαιρο και άμεσο τρόπο. Οι περιβαλλοντολογικές διαστάσεις, τα ζητήματα ασφάλειας και υγείας και κυρίως η ενημέρωση της κοινωνίας (ελλιπής σε σημαντικό βαθμό), χρειάζεται να ενταχθούν στην έρευνα των N&N και να ενισχυθεί η συνεργασία μεταξύ όλων των αρμοδίων και εμπλεκόμενων με αυτές, συμπεριλαμβανομένων των μελών της Ευρωπαϊκής Επιτροπής, ακαδημαϊκών, ερευνητικών κέντρων, βιομηχανιών, οικονομικών παραγόντων, μή κυβερνητικών οργανώσεων και τελικά της κοινωνίας στο σύνολό της. Επιπρόσθετα, είναι απαραίτητος ο κατάλληλος συντονισμός μεταξύ των εμπλεκόμενων μερών, με σκοπό τη βελτιστοποίηση της σύμπραξης των

<sup>115</sup>

[www.ics.forth.gr/\\_publications/teliki\\_ergasia.pdf](http://www.ics.forth.gr/_publications/teliki_ergasia.pdf)

αρμοδίων και άμεσα εμπλεκόμενων με τις N&N σε ευρωπαϊκό και διεθνές επίπεδο.

Η δημόσια διαβούλευση σχετικά με κώδικα συμπεριφοράς για υπεύθυνη έρευνα στον τομέα της νανοτεχνολογίας και η συστηματική προώθηση του δημόσιου διαλόγου ιδίως με τις μή κυβερνητικές οργανώσεις, θα πρέπει να συντονιστεί και να συνεχιστεί με την οργάνωση ενός δικτύου επιτροπών δεοντολογίας της έρευνας και στην Ελλάδα καθιστώντας την έτσι επιτακτικό αίτημα εθνικής πολιτικής για τη σύγχρονη έρευνα. Το εθνικό αυτό δίκτυο για τη δεοντολογία στις N&N θα είναι σε συμφωνία με το υπό ίδρυση αντίστοιχο ευρωπαϊκό. Το αίτημα αυτό είναι, ταυτόχρονα, και επίκαιρο, καθώς πρόσφατα θεσπίσθηκε νέο εθνικό νομοθετικό πλαίσιο για την έρευνα.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

---



Τα τελευταία χρόνια, η νανοτεχνολογία έχει αποτελέσει το αντικείμενο πολλών συζητήσεων και αντιπαραθέσεων. Όμως, σε τι ακριβώς αναφερόμαστε όταν μιλάμε για τη νανοτεχνολογία; Αναφερόμαστε στην επιστήμη που αφορά τον κόσμο των ατόμων, δηλαδή το ελάχιστο μέγεθος. Αναφερόμαστε και στις τεχνολογίες, αφού μία από τις ιδιαιτερότητες της νανοτεχνολογίας είναι ότι επιτρέπει την παρατήρηση και τον έλεγχο σε επίπεδο ατόμου, κάτι που ανοίγει νέες προοπτικές στους τομείς της ιατρικής, της μηχανικής, των επικοινωνιών ή του ελέγχου ενέργειας. Αναφερόμαστε επίσης σε εφαρμογές και συνεπώς στην οικονομία και τις αγορές. Μιλάμε ωστόσο και για κινδύνους, καταχρήσεις και φόβους. Τι προφυλάξεις πρέπει να πάρουμε μπροστά στις τεχνολογίες που απασχολούν κάθε πλευρά της καθημερινής μας ζωής; Σε κάθε περίπτωση, οι τεχνολογίες που αφορούν υλικά με ελάχιστο μέγεθος απευθύνονται κυρίως σε νέες γενιές, δηλαδή σε παιδιά από 10 χρονών και πάνω.

Ο όρος νανοτεχνολογία χαρακτηρίζεται από ευρύτητα, όντας πολύ γενικός για να περιγράψει οτιδήποτε συμβαίνει στις διαστάσεις του νανομέτρου. Κατά συνέπεια, μπορεί να χωρισθεί σε πιο ειδικές ενότητες όπως αυτές της νανοηλεκτρονικής, των νανοϋλικών και άλλων. Οι εφαρμογές της είναι αναρίθμητες ενώ οι επιπτώσεις γίνονται αντιληπτές σε πολλαπλά επίπεδα, κατά κύριο λόγο στον οικονομικό τομέα, επηρεάζοντας παγκόσμια βιομηχανίες και οικονομίες, αλλά και στον κοινωνικό, βελτιώνοντας το επίπεδο ζωής μας.

Η νανοτεχνολογία χρησιμοποιείται για να περιγράψει τη δημιουργία και χρήση λειτουργικών δομών μεγέθους μεταξύ 1 και 100 νανομέτρων,

της τάξεως δηλαδή του 910– μέτρων. Οι διαστάσεις γίνονται ευκολότερα αντιληπτές αν κάποιος λάβει υπόψη του ότι ένα νανόμετρο ισούται περίπου με το 1/80000 μιας ανθρώπινης τρίχας ή με το μήκος 10 ατόμων υδρογόνων σε σειρά. Κατά παρόμοιο τρόπο ορίζεται και ο όρος νανοεπιστήμη, ο οποίος αναφέρεται σε επιστήμες οι οποίες μελετούν φαινόμενα στην κλίμακα αυτή.

Επιπλέον το μικρότερο σωματίδιο της ύλης, όπως το είχε αναφέρει ο Δημόκριτος, είναι το άτομο. Το άτομο, σύμφωνα με την κλασσική προσέγγιση, είναι το μόνο αδιαίρετο σωματίδιο της ύλης και το πιο σημαντικό, όπου παίζει ένα μεγάλο ρόλο στην εξέλιξη της.

Αν και το πεδίο της νανοτεχνολογίας μόλις πρόσφατα άρχισε να αναπτύσσεται ουσιαστικά, οι δυνατότητες της είχαν αρχίσει να γίνονται εμφανείς ήδη από την εποχή που ο φυσικός Richard Feynman έδωσε το λόγο με τίτλο "There's Plenty of Room at the Bottom" μιλώντας για τα μεγάλα περιθώρια που αφήνουν οι νόμοι της φύσης για τον έλεγχο της ύλης σε ατομικό επίπεδο. Στη μέχρι τώρα ανάπτυξη της, σημαντικό ρόλο έπαιξαν η σημαντική βελτίωση των τεχνικών χαρακτηρισμού, ενώ σταθμοί μπορούν να θεωρηθούν οι ανακαλύψεις δομών άνθρακα σε μορφή σφαίρας, γνωστές ως φουλερένια, καθώς και σε μορφή σωλήνα, γνωστές ως νανοσωλήνες άνθρακα, με ιδιαίτερες ιδιότητες το καθένα.

Δεν θα πρέπει ωστόσο να φανταστεί κάποιος πως η νανοτεχνολογία αφορά μια επιστημονική επανάσταση. Τα περισσότερα θέματα με τα οποία σχετίζεται προκύπτουν σαν λογική συνέπεια της εξέλιξης της ικανότητας της επιστήμης και της τεχνολογίας να ερευνά και να εργάζεται σε όλο και μικρότερη κλίμακα. Εξάλλου, η κατάλυση, ένα φαινόμενο που ανέκαθεν χαρακτηριζόταν από νανομετρικές διαστάσεις, αποτελεί επιστημονικό κλάδο ο οποίος αναπτύσσεται πολλές δεκαετίες. Επιπλέον, ολόκληρα επιστημονικά πεδία όπως η χημεία ή η βιολογία ανέκαθεν δούλευαν σε τέτοιες διαστάσεις παρόλο που ο όρος νανοεπιστήμη εισήχθη μόλις πρόσφατα. Σήμερα η επιστήμη προχωράει προς την κατεύθυνση της νανοτεχνολογίας και προσπαθεί να φτιάξει σωματίδια τα οποία μεταξύ άλλων μπορούν να

αλλάξουν την επιφανειακή δομή ενός οποιουδήποτε υλικού και να το κάνουν ανεπηρέαστο από τους εξωγενείς παράγοντες.

Όμως για να διαφοροποιηθεί η δομή της ύλης σε σημείο που να μην επηρεάζεται από το περιβάλλον ή από άλλους εξωγενείς παράγοντες, θα πρέπει να επηρεαστεί η επιφανειακή δομή του υλικού κατά τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να μην υπάρχει απώλεια ή θραύση του υλικού κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες. Γι' αυτό τον σκοπό έχουν γίνει και γίνονται ειδικές μελέτες σχετικά με επικαλύψεις υλικών, οι οποίες έχουν δείξει ότι με την εφαρμογή επίστρωσης από ειδικές νανοκρυσταλλικές πούδρες, μπορεί να επηρεαστεί η επιφανειακή δομή του υλικού, ούτως ώστε να δημιουργηθεί μια ασπίδα προστασίας που να περιβάλλει το υλικό και να το προστατεύει από τους εξωγενείς παράγοντες που τείνουν να το φθείρουν. Επίσης τριβολογικές μελέτες έδειξαν ότι μπορεί να μειωθεί η τριβή μεταξύ δύο υλικών (π.χ. στροφαλοφόρος άξονας, έμβολα, έδρανα κύλισης, οδοντωτοί τροχοί) όχι μόνο με λιπαντικά μέσα αλλά με επικάλυψη των τριβόμενων επιφανειών με νανοκρυσταλλικές πούδρες με βάση το σίδηρο, το μολυβδαίνιο και τον άνθρακα. Συγκεκριμένα υλικά όπως τα καρβίδια και τα κεραμικά μπορούν επίσης να μειώσουν την τριβή κατά μεγάλο βαθμό και να παρουσιάσουν μεγαλύτερη σκληρότητα απ' ό,τι η επιφανειακή δομή του χάλυβα.

Η νανοτεχνολογία έχει ήδη αντίκτυπο σε διάφορα προϊόντα όπως νέα τρόφιμα, ιατρικές συσκευές, χημικές επιστρώσεις, ατομικά κιτ εξέτασης της υγείας, αισθητήρες για συστήματα ασφάλειας, μονάδες καθαρισμού ύδατος για επανδρωμένα διαστημόπλοια, οθόνες για παιχνίδια-υπολογιστές χειρός και κινηματογραφικές οθόνες υψηλής ευκρίνειας. Η παγκόσμια αγορά προϊόντων νανοηλεκτρονικής εκτιμάται σε εκατοντάδες δισεκατομμύρια ευρώ και αποτελεί την κινητήρια δύναμη για την πρόσφατη ανάπτυξη της νανοτεχνολογίας.

Η νανοηλεκτρονική θα δημιουργήσει πολύ ισχυρότερους ηλεκτρονικούς υπολογιστές και τρανζίστορ για τηλέφωνα, αυτοκίνητα, οικιακές συσκευές και πλήθος των άλλων καταναλωτικών και βιομηχανικών εφαρμογών που ελέγχονται επί του παρόντος από μικροεπεξεργαστές.

Αντίστοιχα, η κατασκευή νανοδομών θα παράγει υλικά με νέες και βελτιωμένες ιδιότητες για χρήση σε ηλιακούς επίπεδους συλλέκτες, αντιδιαβρωτικές επιστρώσεις, σκληρότερα και ανθεκτικότερα εργαλεία κοπής, φωτοκαταλυτικούς καθαριστές αέρα, ανθεκτικότερες ιατρικές συσκευές, χημικούς καταλύτες, καθώς και στη βιομηχανία μεταφορών. Επιπλέον, θα δημιουργηθούν νέα υλικά για οπτικές, ηλεκτρονικές και ενεργειακές εφαρμογές αποθήκευσης και προϊόντα. Επομένως, ο κλάδος της νανοτεχνολογίας σήμερα έχει αναπτυχθεί σε τέτοιο μεγάλο βαθμό ώστε να υπάρχουν εντυπωσιακά και μεγάλων δυνατοτήτων προϊόντα τα οποία μπορούν να αλλάξουν καθοριστικά τον καθημερινό τρόπο ζωής.

Η εφαρμογή της νανοτεχνολογίας σε διάφορους κλάδους (βιομηχανικό, κατασκευαστικό κ.τ.λ.) εισήγαγε νέα πρότυπα και νέες προκλήσεις. Μεταξύ άλλων, ο τομέας των εφαρμογών του θερμικού ψεκασμού δημιούργησε επικαλύψεις που με τις κατάλληλες τεχνικές επίστρωσης μπορούν να προσφέρουν τη δυνατότητα προστασίας διαφόρων τμημάτων κινητήρων ή κατασκευών από εξωτερικούς παράγοντες, υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας και τριβές.

Στον τομέα των νανოსύνθετων υλικών, η νανοτεχνολογία έχει κάνει σημαντικά άλματα ως προς τον τρόπο επεξεργασίας και διαχείρισης των υλικών αυτών, τα οποία τείνουν να καλύψουν ένα μεγάλο τομέα των συμβατικών υλικών. Οι εκπληκτικές ιδιότητες των νανοςύνθετων υλικών, όπως είναι η υψηλή δυσκαμψία και αντοχή που παρουσιάζουν σε χαμηλές θερμοκρασίες και υψηλές πιέσεις, έχουν κινήσει το ενδιαφέρον της βιομηχανίας ώστε να στραφεί στη χρήση τέτοιων υλικών.

Σήμερα χρησιμοποιούνται νανοςύνθετα υλικά σε επιβατικά και πολεμικά αεροσκάφη γιατί είναι πιο ελαφρύτερα και πιο ανθεκτικά στις εξωτερικές συνθήκες. Επίσης χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία κατασκευής δοχείων πίεσης και δοχείων διαστολής γιατί δεν φθείρονται εύκολα με το χρόνο και δεν χρειάζονται συντήρηση, σε σύγκριση με τα μεταλλικά δοχεία διαστολής τα οποία φθείρονται σε σύντομο χρονικό διάστημα.

Στον τομέα των νανοσωλήνων άνθρακα, η νανοτεχνολογία έφερε την επανάσταση καθώς οι νανοσωλήνες άνθρακα παρουσιάζουν ιδιότητες οι οποίες ξεπερνούν τις δυνατότητες κάθε άλλου φυσικού υλικού. Μπορούν να εφαρμοστούν σε νανოსύνθετα υλικά και να τους παρέχουν πιο εξελιγμένες ιδιότητες όπως μεγαλύτερη ελαστικότητα, μικρότερο βάρος και αντοχή σε φθορά και διάβρωση. Μπορούν να εφαρμοστούν σε φωτοβολταικά στοιχεία και να παρέχουν ιδιότητες όπως καλύτερη συλλογή ηλιακού φωτός και καλύτερη ενεργειακή απόδοση από τα συμβατικά υλικά. Επίσης μπορούν να εφαρμοστούν σε νανοηλεκτρικά κυκλώματα.

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ – ΠΑΡΑΠΟΜΠΕΣ - ΠΗΓΕΣ.**

---

1. Ash, Russell, The Top 10 of Everything, (2006) : The ultimate Book of Lists, Dk Pub,
2. J.McMurry, Οργανική Χημεία Τόμος Ι ,Πανεπιστημιακές εκδόσεις Κρήτης – 2005.
3. <http://nano.gtri.gatech.edu>, Georgia Tech Research Institute
4. M.S. Dresselhaus and M. Endo , Top.Appl.Phys. 80 (2001) 11-28
5. Lijima s, in [ieeexplore.ieee.org](http://ieeexplore.ieee.org)
6. Lijima s, in [ieeexplore.ieee.org](http://ieeexplore.ieee.org)
7. Feynman, R., "Theory of Fundamental Processes", Vol. I, 1st Edition, Addison Wesley Publishing Company, New York (1961), p.p. 172.
8. Moore, G.E., Electronics, 38 (1965), p.p. 114-117.
9. Taniguchi, N., On the Basic Concept of "Nano-Technology", Proceeding of the Production Engineering International Conference, Part II, Japan Society of Precision Engineering, Tokyo, (1974).
10. [www.nano.gr](http://www.nano.gr)
11. Iijima, S., Letters of Nature, 354 (1991), p.p. 56-58.
12. [Blogs.sch.gr/nanosp/2009/04/23](http://blogs.sch.gr/nanosp/2009/04/23)
13. N.Taniguschi, "On the Basic Concept of 'Nanotechnology –part II “, British Society of Precision Engineering (1974)
14. Kahn, Jennifer, "Nanotechnology", National Geographic, pp 98–119, (June – 2006)
15. S. Iijima, Nature, 354, 56 (1991).
16. R.T.K. Baker, Carbon 27 (3), 315 (1989).
17. H. Kanzow and A. Ding, Phys. Rev. B 60 (15) 11180 (1991). C.N. Rao, B.C. Satishkumar, A. Govindajar and A. Nath, CHEMPHYSICHEM 2, 78 (2001). C.N. Rao, RSC Publishing (2005).
18. E. Borowiak-Palen, A. Bachmatiuk, M.H. Rummeli, T. Gemming, M. Kruszynska and R.J. Kalenczuk, Physica E, In Press (2007).
19. C.H. See and A.T. Harris, Int. Eng. Chem. Res. 46, 997 (2007).



20. Zhi Wang, Zhiyong Liang, Ben Wang,, Chuck Zhang, Leslie Kramer, “Processing and property investigation of single-walled carbon nanotube (SWNT) buckypaper/epoxy resin matrix nanocomposites”, *Composites: Part A*, 35, 1225–1232, (2004).
21. Dresselhaus MS, Dresselhaus G, Avouris P. Carbon nanotubes: synthesis, properties and applications. Springer-Verlag: Berlin, 2001.
22. Chen J, Hamon MA, Hu H, Chen Y, Rao AM, Eklund PC, Haddon RC. Solution properties of single-walled carbon nanotubes. *Science* 1998;282:95-98.
23. Grujicic M, Gao G, Rao AM, Tritt TM, Nayak S. UV-light enhanced oxidation of carbon nanotubes. *Appl Surf Sci* 2003;214:289-303.
24. Felten A, Bittencourt C, Pireaux JJ. Gold clusters on oxygen plasma functionalized carbon nanotubes: XPS and TEM studies. *Nanotechnology* 2006;17:1954-1959.
25. Tsang SC, Harris PJF, Green MLH. Thinning and opening of carbon nanotubes by oxidation using carbon dioxide. *Nature* 1993;362:520-522.
26. Liu J, Rinzler AG, Dai H, Hafner JH, Bradley RK, Boul PJ, et al. Fullerene pipes. *Science* 1998;280:1253-1256.
27. Balasubramanian K, Burghard M. Chemically functionalized carbon nanotubes. *Small* 2005;1:180-192.
28. Theodosiou, T.C., Saravanos, D.A, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 20 (2009), p.p. 1649-1661.
29. Hernandez, E., Goze, C., Bernier, P., Rubio, A., *Physical Review Letters*, 80 (1998), pp. 4502–4505.
30. Παπανικολάου, Γ., Μουζάκης, Δ., “Σύνθετα Υλικά”, 1η Έκδοση, Κλειδάριθμος, Πάτρα (2007), p.p. 407.
31. M.S. Dresselhaus and M. Endo , *Top.Appl.Phys.* 80 (2001) p.p.11-28
32. L.V. Radushkevich and V.M Lukyanovich, *Zurn.Fisic.Chim.* 26 (1952 ) p.88
33. W.R.bDavis, R.J. Slawason and G.R. Rigby, *Nature* 171 (1953) p.756
34. M. Hillert and N.Lange, *Z. Kristallogr.* 111 (1958) p.p 24-34

35. R.T. Baker, M.A. Barber, P.S. Harris, I.S. Feates and R.J. Waite, J. Catal. 30 (1973) p.86
36. S. Iijima, Nature 354 (1991) p.56
37. H.W. Kroto, J.R. Heath, S.C. O'Brien, R.F. Curl and R.E. Smalley, Nature 318 (1985) p.162
38. Παπαγεωργόπουλος, 1999.
39. Kroto HW, Heath JR, O'Brien SC, Curl RF, Smalley RE, (1985)
- C60: Buckminsterfullerene. Nature; 318:162–163.
40. X.E.E. Reynhout and J.C. Reijenga, 'The Wondrous World of Carbon Nanotubes' Eindhoven University of Technology, (2003)
41. D.S. Bethune, C.H. Klang, M.S. de Vries, G. Gorman, R. Savoy, J. Vazquez et al, Nature 363 (1993) 605
42. Dresselhaus MS, Dresselhaus G, Avouris P (Eds.), (2001) Carbon Nanotubes, Springer, Berlin, Germany.
43. Wunderlich, B., „Thermal Analysis”, Academic Press, London, 1990
44. <http://www.infogenesis.gr/modules.php?name=News&file=article&sid=110>
45. <http://www.infogenesis.gr/modules.php?name=News&file=article&sid=110>
46. Πηγή: Sciencedaily May 28, 2008
47. K.S. Triantafyllidis, S.A. Karakoulia, D. Gournis, A. Delimitis, L. Nalbandian, E. Maccallini, P. Rudolf, Micropor. Mesopor. Mat. 110 (2008) 128-140
48. K.B. Kouravelou, S.V. Sotirchos, X.E. Verykios, Surf. Coat. Tech. 201 (2007) 9226 – 9231

49. Kroto, H.W., Heath, J.R., O'Brien, S.C., Curl, R.F., Smalley, R.E.,  
Nature, 318 (1985), p.p. 162-163.
50. A.Hirsch: Angew Chem.Int.Ed 41, p11 (2002)
51. W.J.Kim, H.L.Usrey, M.S.Strano: Chem.Mater 19, pp1571-1576 (2002)
52. R. H. Baughman, A. A. Zakhidov, W. A. de Heer, Science 2002, 297,  
787.
53. M. Rodriguez, J. Mater. Res. 8, 3233 (1993).
54. B. Kelly, "Physics of graphite", London, Applied Science, 1981
55. Kelly, N. Macmillan, "Strong solids". Oxford University Press, 1986
56. R. Bacon, "Growth, structure, and properties of graphite whiskers", J.  
Appl. Phys. 31, 283–290 (1960)
57. P. Serp, M. Corrias and P. Kalck, Appl. Catal. A: Gen. 253, 337 (2003).
58. Thess, R. Lee, P. Nikolaev, H. Dai, P. Petit, J. Robet, C. Xu, Y.H. Lee,  
S.G. Kim, A. Rinzler, D.T. Colbert, G. Scuseria, D. Tomanek, J.E.  
Fischer and R. Smalley, Science 273, 483 (1996).
59. G. Overney, W. Zhong, D. Tomanek, "Structural rigidity and  
lowfrequency vibrational-modes of long carbon tubules", Z. Phys. D—  
At. Mol. Clusters 27, 93–96 (1993)
60. J. Lu, "Elastic properties of single and multilayered nanotubes", J.  
Phys. Chem. Solids 58, 1649–1652 (1997)
61. M. Treacy, T. Ebbesen, J. Gibson, "Exceptionally high Young's  
modulus observed for individual carbon nanotubes", Nature 381, 678–  
680 (1996)
62. P. Poncharal, Z. Wang, D. Ugarte, W. de Heer, "Electrostatic  
deflections and electromechanical resonances of carbon nanotubes",  
Science 283, 1513–1516 (1999)
63. M. Falvo, G. Clary, R. Taylor, V. Chi, F. Brooks, S. Washburn et al,  
"Bending and buckling of carbon nanotubes under large strain", Nature  
389, 582–584 (1997)
64. E. Wong, P. Sheehan, C. Lieber, "Nanobeam mechanics: elasticity,  
strength, and toughness of nanorods and nanotubes", Science 277,  
1971–1975 (1997)

65. J. Salvetat, A. Kulik, J. Bonard, G. Briggs, T. Stockli, K. Metenier et al, "Elastic modulus of ordered and disordered multiwalled carbon nanotubes", *Adv. Mater.* 11 161–165 (1999)
66. M. Yu, O. Lourie, M. Dyer, T. Kelly, R. Ruoff, "Strength and breaking mechanism of multiwalled carbon nanotubes under tensile load", *Science* 287, 637–640 (2000)
67. J. Salvetat, G. Briggs, J. Bonard, R. Bacsá, A. Kulik, T. Stockli T et al, "Elastic and shear moduli of single-walled carbon nanotubes ropes", *Phys. Rev. Lett.* 82, 944–947 (1999)
68. M. Yu, B. Files, S. Arepalli, R. Ruoff, "Tensile loading of ropes of single wall carbon nanotubes and their mechanical properties", *Phys. Rev. Lett.* 84, 5552–5555 (2000)
69. C. Miko, M. Milas, J. Seo, E. Couteau, N. Barisic, R. Gaal et al, "Effect of electron irradiation on the electrical properties of fibers of aligned single-walled carbon nanotubes", *Appl. Phys. Lett.* 83, 4622–4624 (2003)
70. J. Salvetat, A. Kulik, J. Bonard, G. Briggs, T. Stockli, K. Metenier et al, "Elastic modulus of ordered and disordered multiwalled carbon nanotubes", *Adv. Mater.* 11 161–165 (1999)
71. S. Xie, W. Li, Z. Pan, B. Chang, L. Sun, "Mechanical and physical properties on carbon nanotubes", *J. Phys. Chem. Solids* 61, 1153–1158 (2000)
72. M.M. Waje, X. Wang, W. Li, Y. Yan, *Nanotechnology* 16 (2005) 395-400.
73. C.C. Chen, C.F. Chen, C.H. Hsu, I.H. Li, *Diamond & Related Materials* 14 (2005) 770-773.
74. Y. Liang, H. Zhang, B. Yi, Z. Zhang, Z. Tan, *Carbon* 43 (2005) 3144-3152.
75. T. Yoshitake, Y. Shimakawa, S. Kuroshima, H. Kimura, T. Ichihashi, Y. Kubo, D. Kasuya, K. Takahashi, F. Kokai, M. Yudasaka, S. Iijima, *Physica B* 323 (2002) 124-126.
76. Περιοδικό Science, Τόμος 292, τεύχος 5517 (2001)

77. N. Taniguchi, "On the Basic Concept of 'Nano-Technology - Part II",  
British Society of Precision Engineering (1974)
78. Περιοδικό Science, Τόμος 292, τεύχος 5517 (2001)
79. W.J.Kim, H.L.Usrey, M.S.Strano: Chem.Mater 19, pp1571-1576 (2002)
80. X. Zheng, M. J. O'Connell, S. K. Doorn, X. Z. Liao, Y. H. Zhao, E. A.
81. N. Taniguchi, "On the Basic Concept of 'Nano-Technology - Part II",  
British Society of Precision Engineering (1974)
82. X. Zheng, M. J. O'Connell, S. K. Doorn, X. Z. Liao, Y. H. Zhao, E. A.  
Akhadov, M. A. Hoffbauer, B. J. Roop, Q. X. Jia, R. C. Dye, D. E.  
Peterson, S. M. Huang, J. Liu & Y. T. Zhu. X. : Nature Materials 3,  
pp673–676 (2004)
83. C.Galiotis, Compos. Sci. Technol. 42, p125
84. N. Popov, Materials Science and Engineering R 43, 61, (2004).
85. [www.jimkava.com](http://www.jimkava.com)
86. [www.jimkava.com](http://www.jimkava.com)
87. P.G. Collins, M..S. Arnold, Ph. Avouris, Science 292, 706 (2001).
88. [www.research.org.cy/metacanvas/attach\\_handler.uhtml?](http://www.research.org.cy/metacanvas/attach_handler.uhtml?) ΠΕΡΙΟΔΙΚΟ  
ΥΨΙΠΕΤΗΣ Νοέμβριος-Δεκέμβριος 2009.
89. [www.research.org.cy/metacanvas/attach\\_handler.uhtml?](http://www.research.org.cy/metacanvas/attach_handler.uhtml?) ΠΕΡΙΟΔΙΚΟ  
ΥΨΙΠΕΤΗΣ Νοέμβριος-Δεκέμβριος 2009.
90. [www.nanorevolution.com](http://www.nanorevolution.com)
91. [www.nanozine.com](http://www.nanozine.com)
92. [www.cordis.lu/nanotechnology](http://www.cordis.lu/nanotechnology)
93. R. H. Baughman, A. A. Zakhidov, W. A. de Heer, Science 2002, 297,  
787.
94. J. Cao, Q. Wang, M. Rolandi, H. Dai, Phys. Rev. Lett. 2004, 93, 216  
803.
95. A.M. Bueche, J. Polym. Sci., 25, 139 (1957).
96. M. J. Biercuk, M. C. Llaguno, M. Radosavljevic, J. K. Hyun, A. T.  
Johnson, Appl. Phys. Lett. 2002, 80, 2767.
97. Πηγή: Honda
98. Charlsley, L.E., and Warrington, B.S., "Thermal Analysis-Techniques  
and Applications", The Royal Society of Chemistry, London, 1992.

99. Hatekeyama, T., and Quinn, X.F., „Thermal Analysis-Fundamentals and Applications to Polymer Science”, 2nd ed., J.Wiley & Sons, New York, 2000.
100. Manhado, L.M.A., Valentini, L., Biagiotti, J., and Kenny, M.J., Carbon, 2005, 43, 1499.
101. Saito, Y., Nishikubo, K., Kawabata, K., and Matsumoto, T., J. Appl. Phys., 1996, 80, 3062.
102. Li GY, Wang PM, Zhao X, (2005) Mechanical behaviour and microstructure of cement composites incorporating surface treated multi walled carbon nanotubes. Carbon: 43: 1239-1245.
103. <http://www.eie.gr/nhrf/institutes/tpci/news/tpci-euryi2004-press-gr.pdf>
104. Science Daily
105. <http://www.enet.gr/?i=news.el.article&id=139199>
106. Rinzler, A. Liu, P. Huffman: Appl. Phys. A 67, p.29 (1998)
107. G. U. Sumanasekera, J. L. Allen, S. L. Fang, A. L. Loper, A. M. Rao, and P. C. Eklund :J. Phys. Chem. B 103, pp 4292–4297 (1999)
108. Gambardella, A. Dallmeyer, K. Maiti, M.C. Malagoli, W. Eberhard, K. Kern, and C. Carbone: Angew Chem. Int. Ed 41, p 1353 (2002)
109. Rinzler, A. Liu, P. Huffman: Appl. Phys. A 67, p.29 (1998)
110. Chen-Ming Liu Hong-Bin Cao Yu-Ping Li Hong-Bin Xuand Yi Zhang: Chin. J. of Analytical Chemistry 44 , pp 2919-2924 (2006)
111. <http://www.chemist.gr/2010/04/3169/#ixzz1lAc7Ohpj>
112. <http://www.chemist.gr/2011/03/4913/#ixzz1lAcKnti7>
113. www.in.gr
114. <http://medgreece.gr/2009>
115. <http://www.physics4u.gr/news/2003/scnews1169.html>

