



**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ**

**ΣΧΟΛΗ ΕΠΑΓΓΕΛΜΑΤΩΝ ΥΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΠΡΟΝΟΙΑΣ**

**ΤΜΗΜΑ ΟΠΤΙΚΗΣ & ΟΠΤΟΜΕΤΡΙΑΣ**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

# **ΓΡΑΦΕΝΙΟ ΕΝΑ ΠΟΛΛΑ ΥΠΟΣΧΟΜΕΝΟ ΥΛΙΚΟ**

**ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ: ΕΙΡΗΝΗ ΛΑΟΥΔΙΚΟΥ  
ΕΙΡΗΝΗ ΞΕΝΟΦΩΝΤΟΣ**

**Όνομα Επιβλέποντα καθηγήτη : κ. ΣΥΓΓΕΛΟΥ ΛΑΜΠΡΙΝΗ**

**Αίγιο, Μάϊος 2014**

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Θέλουμε να πούμε ένα μεγάλο ευχαριστώ σε όλους τους διδάσκοντες και το εκπαιδευτικό προσωπικό του τμήματος Οπτικής και Οπτομετρίας για τις γνώσεις και τα εφόδια που μας προσέφεραν όλα αυτά τα χρόνια.

Η εργασία αυτή περιλαμβάνει τις αξιοθαύμαστες ιδιότητες του γραφενίου, υλικό που απομονώθηκε το 2004 και που μέσα σε 10 χρόνια έχει βρει πάρα πολλές εφαρμογές. Οι πολλές εφαρμογές οφείλονται στις πολλές δυνατότητές του. Μπορούμε να πούμε ότι μέρα με τη μέρα ανακαλύπτονται όλο και περισσότερες δυνατότητες αυτού του υλικού, με αποτέλεσμα αυτή η εργασία να αποτελεί ένα δήγμα .

Με την ολοκλήρωση της εργασίας και μέσα από μια μεγάλη έρευνα, οι γνώση μας για αυτό το υλικό , έχει διευρυνθεί . Έτσι, μέσα από την έρευνα επιστημονικών περιοδικών και βιβλίων, εμπλουτίσαμε τις γνώσεις και κυρίως ενημερωθήκαμε για τις πρόσφατες ανακαλύψεις και εφευρέσεις που αφορούν το γραφένιο.

Κυρίως όμως, θέλουμε να ευχαριστήσουμε τη καθηγήτρια κ. Σύγγελλου Λαμπρινή για την αμέριστη βοήθειά της και τις συμβουλές της, για την εκπόνηση της πτυχιακής εργασίας. Ο ρόλος της ήταν καθοριστικός από τη στιγμή της παράδοσης του θέματος έως την εκπόνηση της εργασίας.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρακάτω εργασία, με θέμα «Γραφένιο ένα πολλά υποσχόμενο υλικό» παρουσιάζει τις δυνατότητες αυτού του υπερ-υλικού. Σκοπός της είναι να αναδείξει τις δυνατότητες αυτού του υλικού και της εφαρμογές του σε διάφορους τομείς, όπως σε κυκλώματα, φωτοβολταϊκά πάνελ και κυρίως σε τομείς της οπτικής όπως σε φακούς επαφής.

Αρχικά παρουσιάζεται η φύση του άνθρακα και οι αλλοτροπικές μορφές που έχει ο άνθρακας (φυσικές- τεχνίτες). Μέσα από μια μελέτη της ιστορίας της ανακάλυψης αυτού του υλικού, θα δούμε διάφορες τεχνικές κατασκευής του.

Στη συνέχεια, αναφέρονται οι εξαιρετικές ιδιότητες του γραφενίου, οπτικές, ηλεκτρονικές, μηχανικές κ.τ.λ. . Εξαιτίας των εξαιρετικών ιδιοτήτων που αναλύονται στη εργασία αυτή, προκύπτουν και οι πολλές εφαρμογές που μπορεί να βρει το γραφένιο στη τεχνολογία. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αναβάθμιση των τηλεπικοινωνιών, καθώς και σε εφαρμογές φιλικές προς το περιβάλλον, όπως τη χρήση του σε φωτοβολταϊκά πάνελ αυξάνοντας την αποδοτικότητα κατά την μετατροπή του φωτός σε ηλεκτρικό ρεύμα .

Κυρίως όμως, θα δούμε αναλυτικά τη χρήση του γραφενίου σε οπτικές εφαρμογές, όπως στη κατασκευή φακών επαφής προκαλώντας υπέρυθρη όραση, απλά με τη χρήση τους.

Οι δυνατότητες αυτού του υλικού, μέχρι και σήμερα ολοένα και αυξάνονται. Γι' αυτό το λόγο, το γραφένιο αναφέρεται σε πολλά δημοσιεύματα ως «υλικό του μέλλοντος»

## **ABSTRACT**

The following work titled " Graphene a promising material " shows the potential of this super - material . The purpose is to demonstrate the potential of this material and its applications, such as circuits , photovoltaic panels and particularly in areas such as optical lenses.

Futhermore, this works includes the nature of the atoms and the allotropic forms of coal (natural - craftsmen) . Through a study of the history of the discovery of this material , you will see various construction techniques .

Then , indicating the exceptional properties of graphene , optical, electronic , mechanical , etc. . Because of the excellent properties analyzed in this paper, arise and many applications can be found in graphene technology . This material can be used to upgrade telecommunications applications as environmentally friendly , such as the use of photovoltaic panels by increasing the efficiency in the conversion of light into electricity .

Mainly, however , will see in detail the use of graphene in optical applications , such as in the manufacture of contact lenses causing infrared vision, simply using them .

This work, we can say that it is a bite in front of countless uses and possibilities of this material . The possibilities of this material , until today still increasing . For this reason , graphene reported in many publications as " material of the future"

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΠΡΟΛΟΓΟΣ</b>	<b>2</b>
<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</b>	<b>3</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>4</b>
<b>ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ</b>	<b>5</b>
<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b>	<b>7</b>

### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : Εισαγωγή στο γραφένιο**

1.1 Ο άνθρακας	7
1.2 Φυσικά αλλότροπα του άνθρακα	7
1.3 Ιστορική αναδρομή τεχνητών αλλότροπων του άνθρακα	9
1.4 Το γραφένιο	10
1.5 Η πειραματική του ανακάλυψη	12
1.6 Εμφάνιση και παραγωγή	14
1.7 Το βραβείο Νόμπελ	16
1.8 Μέθοδοι σύνθεσης γραφενίου	17
1.8.1 Κρυσταλλική ανάπτυξη σε Καρβίδιο του Πυριτίου	17
1.8.2 Κρυσταλλική ανάπτυξη σε μεταλλικό υπόστρωμα	18
1.8.3 Μηχανική αποφλοιώση (Scotch Tape Exfoliation)	19
1.8.4 Σύνθεση γραφενίου μέσω χημικών διεργασιών	21
1.8.5 Τομή Νανοσωλήνων	21
1.8.6 Χημική εναπόθεση από ατμό (CVD6)	22
1.8.7 Παρεμβολή μικρών μορίων με μηχανική απολέπιση ανάμεσα στα φύλλα γραφίτη	22
1.9 Παράγωγα γραφενίου	23
1.9.1 Πολυστρωμικό Γραφένιο	23
1.9.2 Νανοσωλήνες άνθρακα	24
1.9.3 Φουλερένιο	25

### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Ιδιότητες του γραφενίου**

2.1 Ατομική δομή	28
2.2 Μηχανικές ιδιότητες	28
2.3 Ηλεκτρονικές Ιδιότητες	30
2.4 Στροφορμή (Spin)	31
2.5 Θερμικές ιδιότητες	32

2.6 Οπτικές ιδιότητες	33
-----------------------	----

### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Εφαρμογές του γραφένιου στη τεχνολογία**

3.1 Χρήση σε οθόνες LCD	35
3.2 Φωτοβολταϊκά από γραφένιο	38
3.3 Το γραφένιο στις τηλεπικοινωνίες	40
3.4 Κυκλώματα γραφένιου κατευθείαν από τον εκτυπωτή	41
3.5 Υπερ-πυκνωτές γραφένιου	44
3.6 Τατουάζ δοντιού εναντίον λοιμώξεων	48
3.7 Αφαλάτωση με τη χρήση γραφένιου	49
3.8 Τσιπ υπολογιστών	50
3.9 Παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας	52
3.10 Φωτοανιχνευτές	54
3.11 Επιστρώσεις γραφένιου	54
3.12 Διαφανή αγώγιμα φιλμς (TCFs)	56
3.13 Αισθητήρες αερίων	56
3.14 Μπαταρίες ιόντων λιθίου	57

### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Εφαρμογές του γραφένιου στην οπτική**

4.1 Υπέρυθρη όραση	58
4.2 «Φυσαλίδες» γραφένιου για τη κατασκευή οπτικών φακών	61
4.3 Διδιάστατοι φακοί γραφένιου για την εστίαση δέσμης ηλεκτρονίων	64

### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Συμπεράσματα και μελλοντικές προοπτικές**

5.1 Συμπεράσματα	65
5.2 Προοπτικές	66

ΑΝΑΦΟΡΕΣ	65
----------	----

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ ΓΡΑΦΕΝΙΟ

### 1.1 Ο άνθρακας

Ο άνθρακας είναι ένα από τα λίγα στοιχεία που είναι γνωστά από την αρχαιότητα. Είναι το χημικό στοιχείο που συμβολίζεται ως C και έχει ατομικό αριθμό 6. Σαν μέλος της τέταρτης ομάδας του περιοδικού πίνακα, έχει τέσσερα διαθέσιμα ηλεκτρόνια στη στιβάδα σθένους τα οποία μπορούν να δημιουργήσουν ομοιοπολικούς χημικούς δεσμούς. Υπάρχουν τρία φυσικά ισότοπα, το  $^{12}\text{C}$  και  $^{13}\text{C}$  που είναι σταθερά, ενώ ο  $^{14}\text{C}$  είναι ραδιενεργός. Ο άνθρακας είναι το τέταρτο αφθονότερο στοιχείο στον πλανήτη ως προς τη μάζα μετά από το υδρογόνο, το ήλιο, και το οξυγόνο. Είναι παρόν σε όλα τα γνωστά είδη ζωής, και συγκεκριμένα στο ανθρώπινο σώμα ο άνθρακας είναι το δεύτερο αφθονότερο στοιχείο κατά μάζα (περίπου 18.5%) μετά από το οξυγόνο.

### 1.2 Φυσικά αλλότροπα του άνθρακα

Αλλοτροπία είναι το φαινόμενο κατά το οποίο ένα στοιχείο εμφανίζεται ανάλογα με τις συνθήκες, με διάφορες μορφές, οι οποίες διαφέρουν στους δεσμούς ή στη μοριακή δομή. Οι αλλοτροπικές μορφές παρουσιάζουν διαφορές στις ιδιότητες. Συγκεκριμένα, αλλότροπα στοιχεία ονομάζονται όλα εκείνα τα στοιχεία, τα οποία εμφανίζονται με περισσότερες της μιας φυσικές μορφές, αφού τα άτομά τους συνδιάζονται με ποικίλους τρόπους. Τα αλλότροπα στοιχεία συνήθως έχουν διαφορετικές ιδιότητες και η επαναφορά στην αρχική κατάσταση γίνεται κάτω από ορισμένες συνθήκες.

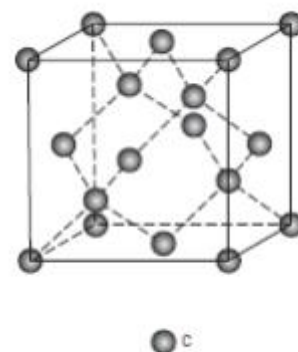
Αλλοτροπικές μορφές παρουσιάζουν το οξυγόνο, ο φωσφόρος, το θείο, το τελλούριο, το αντιμόνιο, το αρσενικό, ο σίδηρος, ο κασσίτερος, ο χρυσός, ο άργυρος, ο άνθρακας κ.ά. Τα αλλότροπα στοιχεία διαφέρουν κατά την κρυσταλλική δομή τους ή κατά τον αριθμό ατόμων του μορίου τους.

Ο άνθρακας είναι ένα από τα στοιχεία του περιοδικού πίνακα που εμφανίζει αλλότροπες μορφές. Από αυτές, κάποιες είναι φυσικές και κάποιες τεχνητές. Τα πιο γνωστά φυσικά αλλότροπα είναι ο γραφίτης, το διαμάντι, και ο άμορφος άνθρακας. Τα τεχνητά αλλότροπα του άνθρακα

είναι τα φουλερένια, οι νανοσωλήνες άνθρακα και το γραφένιο.

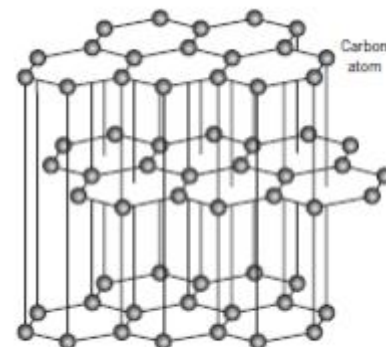
Ο άμορφος άνθρακας είναι μια αλλοτροπική μορφή στην οποία τα άτομα άνθρακα έχουν μια μη κρυσταλλική, ακανόνιστη, υαλώδη κατάσταση, που είναι ουσιαστικά γραφίτης, αλλά χωρίς να έχει μια κρυσταλλική δομή. Βρίσκεται σε μορφή σκόνης, και είναι το κύριο συστατικό ουσιών όπως το ξυλοκάρβουνο, η αιθάλη και ο ενεργός άνθρακας. Σε κανονικές πιέσεις ο άνθρακας παίρνει τη μορφή γραφίτη.

Το διαμάντι (αδάμας) είναι μια πολυμορφική κατάσταση του άνθρακα σε θερμοκρασία ,δωματίου και ατμοσφαιρική πίεση, ενώ η κρυσταλλική του δομή είναι μια παραλλαγή του σφαλερίτη (ZnS) στην οποία όλα τα άτομα άνθρακα καταλαμβάνουν θέσεις όπως δείχνει η Εικόνα 1.1. Έτσι κάθε άτομο άνθρακα συνδέεται με τέσσερις άλλους άνθρακες και οι δεσμοί αυτοί είναι ομοιοπολικοί με  $sp^3$  υβριδισμό. Η μεγάλη αυτή ισχύς των δεσμών εξηγεί αφενός τη μοναδική σκληρότητα του διαμαντιού και αφετέρου την απόλυτη «αδιαφορία» του για χημικές ενώσεις με άλλα άτομα ή μόρια.



**Εικόνα 1.1:**  
Απεικόνιση δομής  
διαμαντιού

Ο γραφίτης είναι η δεύτερη μορφή που μπορεί να λάβει ο καθαρός άνθρακας και στη οποία α άτομά του κάνουν χρήση υβριδισμού  $sp^2$ . Τα άτομα του άνθρακα σχηματίζουν επίπεδα "φύλλα", με δεσμούς πολύ ισχυρούς μεταξύ των ατόμων του ίδιου φύλλου, οι δεσμοί, όμως, μεταξύ των φύλλων είναι ασθενείς.



**Εικόνα 1.2:** Απεικόνιση  
φύλλων γραφίτη

Αντίθετα από το διαμάντι, ο γραφίτης είναι αγωγός του ηλεκτρισμού και μπορεί να χρησιμοποιηθεί, για παράδειγμα, στα ηλεκτρόδια ενός λαμπτήρα. Ο γραφίτης είναι η σταθερότερη μορφή άνθρακα υπό κανονικές συνθήκες. Στην ουσία έχει στρωματική δομή, αποτελείται δηλαδή από γιγάντια διδιάστατα μόρια τα οποία κολλάνε μεταξύ τους με δυνάμεις van der Waals και δημιουργούν την αντίστοιχη στερεά ουσία. Ονομάστηκε από τον Abraham Gottlob Werner το 1789 από την αρχαία ελληνική λέξη "γραφείν". Το όνομα αυτό δόθηκε, λόγω της ιδιότητάς του να «ξεβάφει» όταν τρίβεται σε μαλακή επιφάνεια.



### 1.3 Ιστορική αναδρομή τεχνητών αλλότροπων του άνθρακα

Η νεότερη ιστορία των ινών άνθρακα διαμορφώθηκε από την ανάγκη για την ύπαρξη υλικών με συγκεκριμένες ιδιότητες τόσο κατά τον 19ο αιώνα όσο και πιο πρόσφατα, μετά τον 2ο Παγκόσμιο Πόλεμο. Η πρώτη ανθρακική ίνα (carbon fiber) φτιάχτηκε από τον Τόμας Α. Έντισον που είχε σκοπό να παράγει ένα λεπτό σύρμα για την κατασκευή ενός νέου μοντέλου ηλεκτρικού λαμπτήρα.

Ειδικές ίνες από μπαμπού, προερχόμενες από το Κιότο της Ιαπωνίας, χρησιμοποιήθηκαν για να δημιουργήσουν ένα σπειροειδές πηνίο που στη συνέχεια πυρολύθηκε, οδηγώντας στον σχηματισμό ενός ανθρακικού αντιστάτη, ο οποίος θερμαινόμενος μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως νέο μοντέλο του ηλεκτρικού λαμπτήρα. Ανάλογες μελέτες πάνω στην παραγωγή ανθρακικών νημάτων έγιναν από τους Schutzenberger και Schutzenberger [4]. Οι εργασίες τους εστιάστηκαν στη μελέτη της ανάπτυξης ανθρακικών νημάτων μέσω χημικής εναπόθεσης ατμού.

Η δεύτερη περίοδος έντονης έρευνας στην ανάπτυξη λειτουργικών ανθρακικών ινών πραγματοποιήθηκε στα μέσα του εικοστού αιώνα, από τις ανάγκες της αεροναυπηγικής βιομηχανίας για σύρματα ανθεκτικά, με υψηλές αντοχές και ελαφριά, τα οποία θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή σύνθετων υλικών χαμηλού βάρους με εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες.

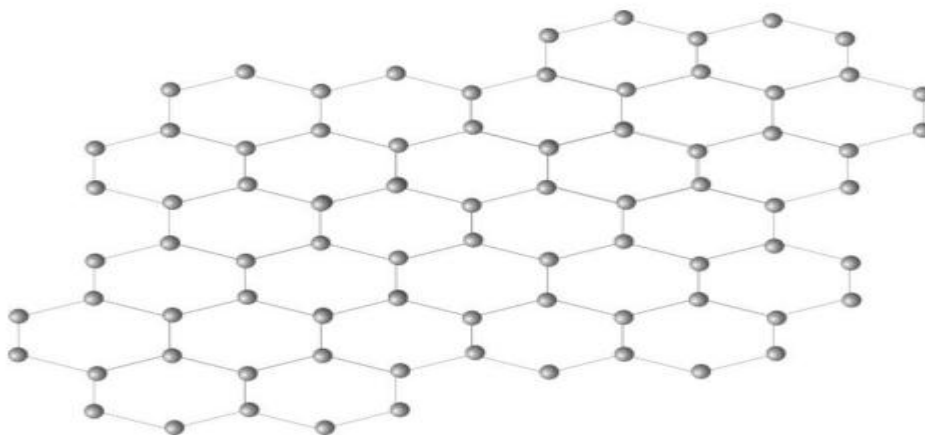
Τα τέλη των δεκαετιών του '50 και του '60 ήταν μία περίοδος εντατικής δραστηριότητας για πολλά εργαστήρια ανά τον κόσμο. Ερευνητικές προσπάθειες για την ανάπτυξη σύνθετων ανθρακικών υλικών (bulk synthetic carbon materials) με ιδιότητες που συγκρίνονται με αυτές του μονοκρυσταλλικού γραφίτη, οδήγησαν στην ανάπτυξη του πυρολυτικού γραφίτη υψηλού προσανατολισμού (Highly Oriented Pyrolytic Graphite, HOPG) το 1962 από τον Ubbelohde και τους συνεργάτες του. Έκτοτε, ο HOPG αποτελεί σημείο αναφοράς στο χαρακτηρισμό των ανθρακικών νημάτων.

Εξαιτίας της ανάγκης πολλών εφαρμογών για σύνθεση ανθρακικών νημάτων υψηλότερης κρυσταλλικότητας σε περισσότερο ελεγχόμενες

συνθήκες, αναπτύχθηκε η τεχνική καταλυτικής χημικής εναπόθεσης από ατμό (catalytic chemical vapor deposition) δημιουργώντας την επιστημονική βάση για την κατανόηση του μηχανισμού και της θερμοδυναμικής συμπεριφοράς των ανθρακικών νημάτων, τα οποία αναπτύχθηκαν με εναπόθεση από ατμό, στις αρχές της δεκαετίας του '70 [4].

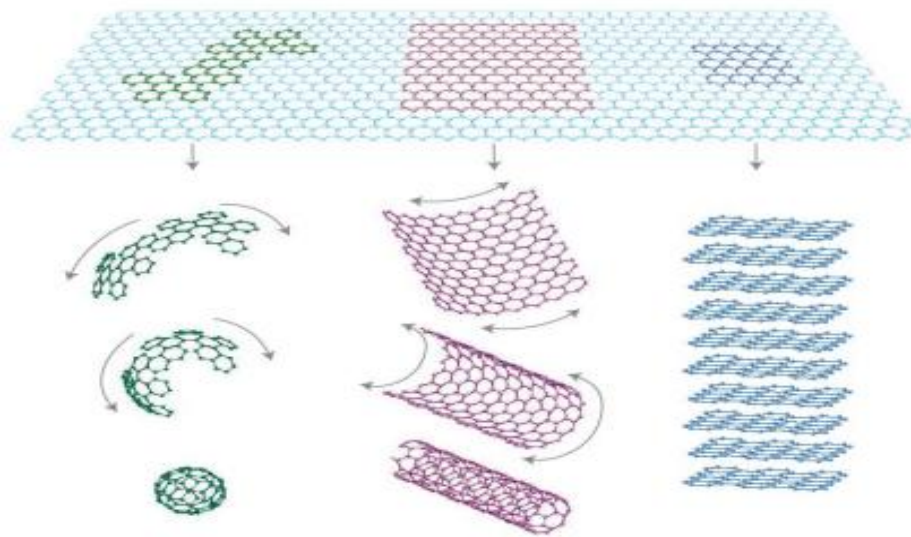
## 1.4 Το γραφένιο

Όπως προείπαμε παραπάνω, ο γραφίτης (Εικόνα 1.2) έχει στρωματική δομή. Κάθε στρώμα αποτελείται από άτομα άνθρακα συνδεδεμένα με τρία άλλα άτομα άνθρακα οδηγώντας σε μια εξαγωνική εικόνα ατόμων (άνθρακα) τοποθετημένων σε ένα επίπεδο. Το γραφένιο είναι το όνομα που δίνουμε σε ένα από αυτά τα στρώματα. Είναι ένα φύλλο άνθρακα πάχους ενός μόνο ατόμου (monolayer) και αποτελείται από διαδοχικά εξάγωνα εκ το οποίων το καθένα περιέχει από ένα άτομο άνθρακα σε κάθε κορυφή και από έναν δεσμό σε κάθε ακμή. Η επαναλαμβανόμενη αυτή δομή του γραφενίου φέρει μεγάλη ομοιότητα με το πλέγμα κερήθρας (honeycomb lattice) σε μια φωλιά μελισσών. Στην Εικόνα 1.3 παρατίθεται η σχηματική αναπαράσταση ενός φύλλου γραφενίου .



*Εικόνα 1.3: Δομή γραφενίου*

Αποτελεί βασικό στοιχείο για τη κατασκευή υλικών από γραφίτη όλων των διαστάσεων . Μπορεί χρησιμοποιηθεί για τη κατασκευή 0D φουλερένιων, 1D νανοσωλήνων καθώς και 3D γραφίτη (Εικόνα 1.4).



*Εικόνα 1.4 : Οι τρεις τρόποι δημιουργίας αλλότροπων του άνθρακα ξεκινώντας από γραφένιο [1]*

Οι αναδιπλώσεις που παρατηρούνται στο γραφένιο προσδίδουν κέρδος όσον αφορά στην ελαστική ενέργεια αλλά καταστέλλουν τις θερμικές δονήσεις.

Εκτός από την θερμοδυναμική ισορροπία οι διδιάστατοι κρύσταλλοι αποδείχθηκαν πως αποτελούν και υλικά εξαιρετικής κρυσταλλικής ποιότητας. Η ποιότητα αυτή του εξαγωνικού πλέγματος μπορεί να παρατηρηθεί κατά την κίνηση των φορέων φορτίου, που στο γραφένιο δύναται να «ταξιδέψουν» για πολύ μεγάλες ενδοατομικές αποστάσεις χωρίς να σκεδαστούν, θέμα στο οποίο θα αναφερθούμε παρακάτω, στις ιδιότητες του γραφενίου. Η ισχυρή φύση των δεσμών μεταξύ των ανθρακικών ατόμων επιβεβαιώνεται και από την έλλειψη εξαρθρώσεων και άλλων ατελειών, οι οποίες αδυνατούν να αναπτυχθούν ακόμα και σε υψηλότερες θερμοκρασίες .

Σαν υλικό είναι εντελώς νέο – όχι μόνο το λεπτότερο που έγινε ποτέ, αλλά και το ισχυρότερο. Η ύπαρξη αυτής της διάταξης είναι αποδεκτή και θεωρητικά επειδή, αντί να παραμένει επίπεδη, γέρνει ελαφρώς, γεγονός που επιτρέπει στη διάταξη να αποκτήσει την πολύτιμη τρίτη διάσταση, η οποία και της δίνει την ισχύ να παραμείνει ενωμένη. Η μεμβράνη γραφενίου αποδείχθηκε στα πειράματα άκρως σταθερή αφού κατάφερε να «αντέξει» και να μη διαλυθεί σε χώρους χαμηλής πίεσης και

σε θερμοκρασίες δωματίου. Όλα τα γνωστά υλικά - και μάλιστα με πολύ μεγαλύτερο πάχος από το γραφένιο - σε ανάλογες συνθήκες οξειδώνονται και αποσυντίθενται. Για την ακρίβεια, μάλιστα, η διάταξη αυτή δεν φάνηκε μοναχά να γέρνει ελαφρώς αλλά μάλιστα το απομονωμένο γραφένιο παρουσίασε «κυματισμό» του επίπεδου φύλλου, με εύρος περίπου ενός νανόμετρου. Αυτοί οι κυματισμοί είναι αποτέλεσμα της αστάθειας των δισδιάστατων κρυστάλλων ή μπορούν να είναι εξωγενείς, προερχόμενοι από τον πανταχού παρόντα ρύπο που εμφανίζεται σε όλες τις εικόνες μικροσκοπίων διέλευσης (TEM), του γραφένιου.

Από τότε που οι επιστήμονες πρώτο-ανακάλυψαν το γραφένιο το 2004, δεν έχουν σταματήσει να μελετούν τις πολλά υποσχόμενες δυνατότητες αυτού του νέου σούπερ-υλικού.

Είναι καλός αγωγός του ηλεκτρισμού και άγει το ηλεκτρικό ρεύμα σαν τον χαλκό. Ως αγωγός της θερμότητας ξεπερνά όλα τα άλλα γνωστά υλικά. Είναι σχεδόν διαφανές, αλλά και τόσο πυκνό που ακόμη και το ήλιο, το μικρότερο άτομο αερίου, δεν μπορεί να το διαπεράσει.

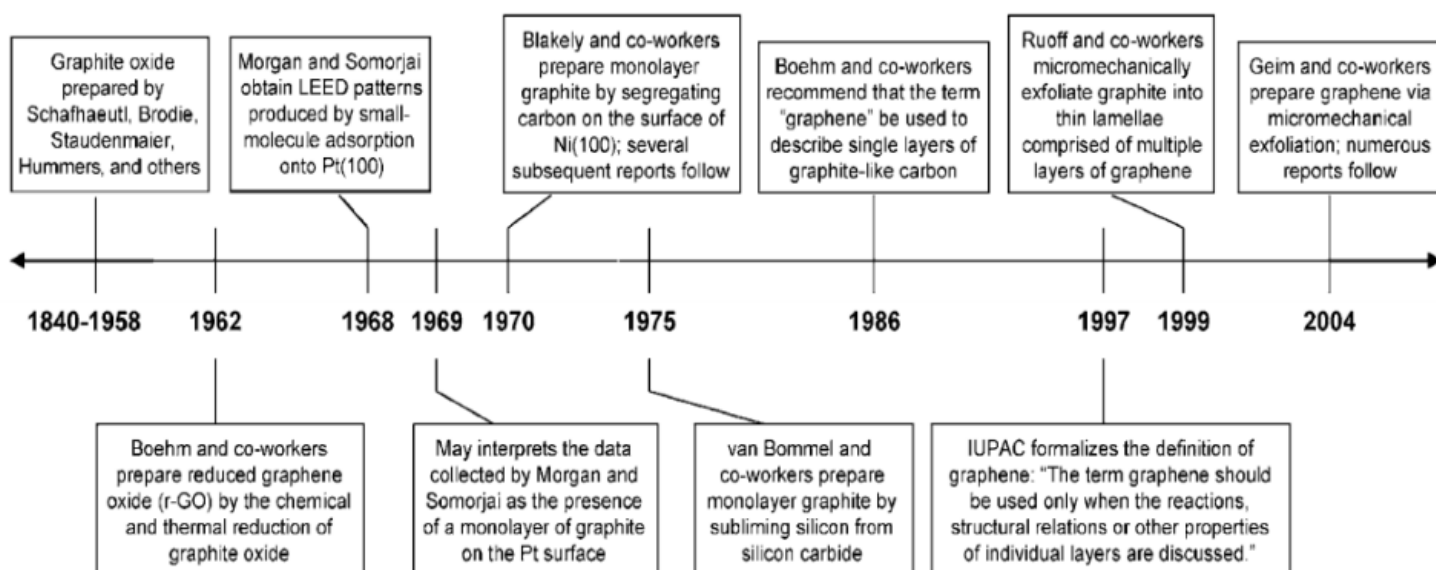
## 1.5 Η πειραματική του ανακάλυψη

Παρά το γεγονός ότι η χρήση του γραφίτη που ξεκίνησε πριν από 6000 χρόνια, όταν Ευρώπη χρησιμοποιήθηκε για τη διακόσμηση κεραμικών, η έρευνα του γραφίτη και η προσπάθεια απομόνωσης ενός φύλλου γραφίτη, χρονολογείται από το 1960.

Η έρευνα του γραφενίου έχει αυξηθεί σιγά-σιγά στα τέλη του 20ου αιώνα, με την ελπίδα να ανακαλυφθούν περισσότερες ηλεκτρικές ιδιότητες ενός λεπτού γραφίτη ή στρωμάτων γραφενίου γραφενίου, ενώ την απόκτηση γραφενίου θεωρήθηκε ότι είναι ένα εξαιρετικά δύσκολο έργο, τόσο θεωρητικά όσο και πειραματικά.

Πριν από 70 και πλέον χρόνια, ο Landau και ο Peierls υποστήριζαν ότι οι κρύσταλλοι δύο διαστάσεων (2D) είναι θερμοδυναμικά ασταθείς και δεν μπορούν να υπάρξουν. Πράγματι, η θερμοκρασία τήξης των λεπτών φιλμ μειώνεται με τη μείωση του πάχους τους, και τα φύλλα γίνονται ασταθή σε πάχη, δεκάδων στρωμάτων. Για αυτόν τον λόγο, οι 2D κρύσταλλοι ήταν γνωστοί μόνο ως μεγαλύτερες τρισδιάστατες δομές. Τα δυσδιάστατα υλικά θεωρήθηκε ότι δεν υπήρχαν, έως το 2004, όπου αποδείχθηκε πειραματικά η ύπαρξη του γραφενίου με χρήση της μεθόδου

scotch tape. Στην εικόνα 1.5 παρουσιάζονται τα σημαντικότερα γεγονότα της ιστορίας του γραφίτη από το 1840 έως το 2004.



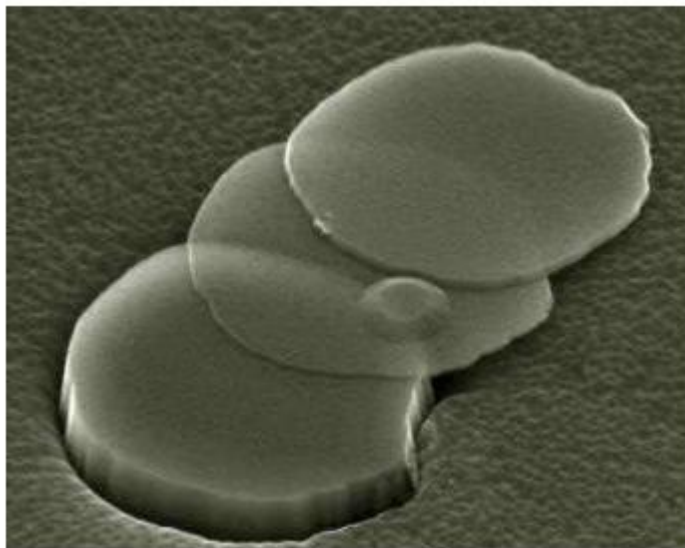
*Εικόνα 1.5: Ημερολόγιο με τα σημαντικότερα γεγονότα της ιστορίας παραγωγής, απομόνωσης και χαρακτηρισμού του γραφενίου .*

Ο όρος γραφένιο πρωτοεμφανίστηκε το 1987 προκειμένου να περιγράψει μονά φύλλα γραφίτη ως ένα από τα συστατικά των ενώσεων παρεμβολής γραφίτη (GICs). Ο όρος χρησιμοποιήθηκε επίσης στις πρώτες περιγραφές των νανοσωλήνων άνθρακα, καθώς και για τη κρυσταλλική αύξηση του γραφενίου και τους πολυκυκλικούς αρωματικούς υδρογονάνθρακες. Μεγαλύτερα μόρια ή φύλλα γραφενίου δεν μπορούσαν να δημιουργηθούν

Οι στρώσεις γραφίτη προηγουμένως (1970) προέρχονταν από κρυσταλλική αύξηση από τα άλλα υλικά. Αυτό το «κρυσταλλικά αυξανόμενο γραφένιο» αποτελείται από ένα μονοατομικού πάχους εξαγωνικό πλέγμα των  $sp^2$  δεσμών των ατόμων άνθρακα, όπως και στο αυτοτελές γραφένιο.

Η θεωρία του γραφενίου διερευνήθηκε για πρώτη φορά από τον Φίλιπ Ρ. Γουάλας το 1947 ως αφετηρία για την κατανόηση των ηλεκτρονιακών ιδιοτήτων του πιο περίπλοκου γραφίτη 3D. Αργότερα, ενιαίες στρώσεις γραφενίου παρατηρήθηκαν άμεσα με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο

Το γραφένιο είναι ένα συναρπαστικό υλικό με πολλές πιθανές εφαρμογές που προέρχονται από τις ασυνήθιστες ιδιότητες του. Θεωρήθηκε αρχικά ότι είναι ασταθές σε ελεύθερη μορφή, έως ότου απομονώθηκε το 2004 από ερευνητές του Πανεπιστημίου του Μάντσεστερ



*Εικόνα 1.6: Πραγματικές φέτες γραφενίου από μια δημοσίευση του 2004 που ανέφερε πρώτα την απομόνωση και τη σταθερότητα του υλικού, πάχους μόνο ενός ατόμου [2]*

## 1.6 Εμφάνιση και παραγωγή

Το γραφένιο είναι ουσιαστικά ένα απομονωμένο ατομικό επίπεδο του γραφίτη. Τα γραφενικά επίπεδα έχουν χωριστεί με παρεμβολές μορίων μεταξύ των επιπέδων του γραφίτη. Το 2004 οι φυσικοί από το Πανεπιστήμιο του Μάντσεστερ και Ινστιτούτο Μικροηλεκτρονικής Τεχνολογίας στην Chernogolovka της Ρωσίας μέτρησαν τις ηλεκτρικές ιδιότητες των νιφάδων που λαμβάνονταν και έτσι παρατηρήθηκαν οι εξαιρετικές τους ιδιότητες.

Από τότε, εκατοντάδες ερευνητές έχουν εισέλθει σε αυτό τον τομέα της έρευνας και, φυσικά, πραγματοποίησαν εκτενή έρευνα πάνω στις προηγούμενες σχετικές δημοσιεύσεις. Η πρώτη βιβλιογραφία δόθηκε από τους πρωτοπόρους από το Μάντσεστερ.

Σε μια σειρά αναφορών πριν το 2004 αναφέρεται η παρεμβολλή ενώσεων ανάμεσα σε φύλλα γραφίτη σε . Οι ερευνητές έτσι παρατήρησαν εξαιρετικά λεπτές γραφιτικές νιφάδες ( "ολιγοστρωματικό γραφένιο" και ενδεχομένως ακόμη και μεμονωμένα στρώματα).

Η παλαιότερη παρατήρηση έγινε από τον Rodney Ruoff σε ένα γερμανόγλωσσο περιοδικό του 1962. Αναφέρθηκε ότι μικροσκοπικά θραύσματα στην περιοχή φύλλων παράγονται (μαζί με τις ποσότητες των άλλων θραυσμάτων) οποτεδήποτε ο γραφίτης εντρίβεται, όπως κατά τη χάραξη γραμμής με ένα μολύβι. Υπήρχε ελάχιστο ενδιαφέρον σε αυτά τα γραφιτικά κατάλοιπα πριν από το 2004 και, ως εκ τούτου, η ανακάλυψη του γραφενίου αποδίδεται συχνά στον Andre Geim και στους συνεργάτες του, ο οποίος παρουσίασε το γραφένιο στη σύγχρονη μορφή του.

Το γραφένιο που παράγεται από μηχανική αποφλοιώση, είναι σήμερα ένα από τα πιο ακριβά υλικά στη Γη, με ένα δείγμα που μπορεί να τοποθετηθεί στη διατομή μιας ανθρώπινης τρίχας να κόστιζε περισσότερο από 1.000 δολάρια τον Απρίλιο του 2008 (περίπου 100.000.000 δολάρια / cm<sup>2</sup>). Από την άλλη πλευρά, η τιμή του κρυσταλλικά αυξανόμενου γραφενίου σε SiC πάνω σε καρβίδιο του πυριτίου έχει τιμή η οποία ήταν περίπου \$ 100/cm<sup>2</sup> το 2009 [4]. Αυτό είναι περίπου 1.000.000 φορές φθηνότερο από το αποφλοιωμένο γραφένιο. Ακόμη φθηνότερο γραφένιο έχει παραχθεί από μεταφορά από νικέλιο, από Κορεάτες ερευνητές.

Σε διάφορες βιβλιογραφίες, στην επιστημονική κοινότητα, το γραφένιο αναφέρεται και ως μονοστρωματικός γραφίτης. Έχει μελετήσει εντατικά η κρυσταλλική ανάπτυξη γραφενίου σε διάφορες επιφάνειες (πάνω από 300 άρθρα πριν από το 2004). Σε ορισμένες περιπτώσεις, τα εν λόγω γραφενικά στρώματα συνδυάζονται με επιφάνειες, για να διατηρούν τους δισδιάστατους ηλεκτρονιακούς δεσμούς της δομής του απομονωμένου γραφενίου, όπως επίσης συμβαίνει με την αποφλοιώση νιφάδων γραφενίου σε σχέση με το διοξείδιο του πυριτίου.

## 1.7 Το βραβείο Νόμπελ

Η Βασιλική Ακαδημία Επιστημών της Σουηδίας ανακοίνωσε στις 5 Οκτωβρίου, ότι απονέμει το βραβείο Nobel Φυσικής για το 2010, από κοινού, στους Andre Geim και Konstantin Novoselov (Εικόνα 1.7), δύο ερευνητές ρωσικής καταγωγής του πανεπιστημίου του Manchester, για τα «ρηξικέλευθα πειράματά τους σχετικά με το δυσδιάστατο υλικό, γραφένιο».

Οι Geim και Novoselov παρασκεύασαν γραφένιο το 2004, επιχειρώντας να απομακρύνουν ένα μονοατομικό στρώμα από γραφίτη, χρησιμοποιώντας, κολλητική ταινία. Χρησιμοποιούσαν νιφάδες γραφίτη, σε μια προσπάθεια να διερευνήσουν τις ηλεκτρικές ιδιότητές του όταν αποφάσισαν να δουν αν θα μπορούσαν να κάνουν πιο λεπτές τις νιφάδες με τη χρήση κολλητικής ταινίας [3]. Τον ίδιο χρόνο δημοσίευσαν στο Science μια εργασία για τις αντοχές, την διαπερατότητα και την αγωγιμότητα του υλικού αυτού.

Το όνομα του υλικού προέρχεται από το γραφίτη, μια από τις πολλές μορφές με τις οποίες βρίσκουμε τον άνθρακα στη φύση όπως αναφέραμε παραπάνω και την κατάληξη «-ένιο», που χρησιμοποιήθηκε από το Γερμανό φυσικό Hanns-Peter Boehm από το 1962 για να περιγράψει φύλλα άνθρακα πάχους ενός μορίου.



Εικόνα 6:  
Andre Geim



Kostya Novoselov

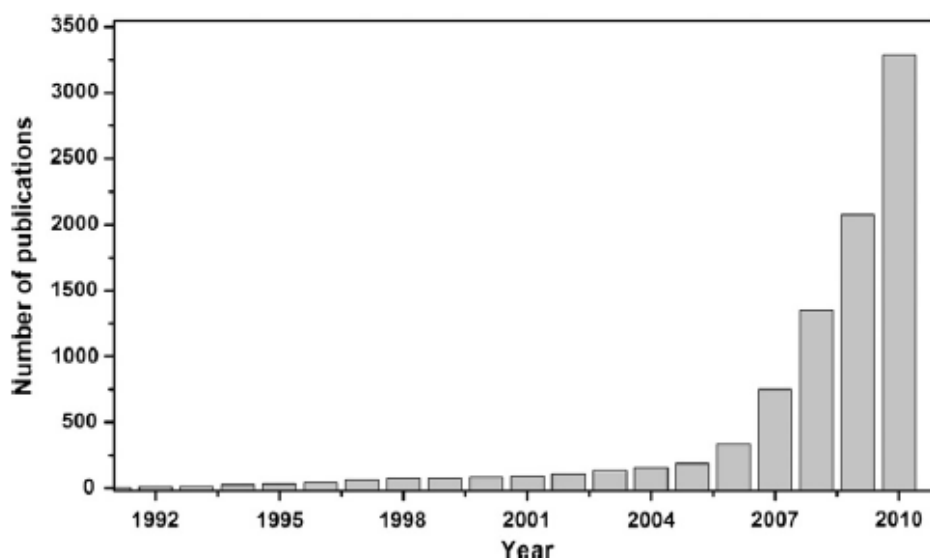
*Εικόνα 1.7: Ο Andre Geim (αριστερά) και ο Kostya Novoselov (δεξιά)*

Η σημασία που μπορεί να έχει το γραφένιο σχετίζεται περισσότερο με τις πιθανές χρήσεις του: η δισδιάστατη φύση του το κάνει ιδιαίτερα ευαίσθητο στις ηλεκτρικές μεταβολές και άρα μπορεί να χρησιμοποιηθεί



εύκολα σαν αισθητήρας, ακόμα και για αέρια. Στον τομέα της ηλεκτρονικής, οι ιδιότητες του γραφένιου το καθιστούν κατάλληλο για την κατασκευή ημιαγωγών και ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, ενώ στη διαφανή μορφή του μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή φωτοβολταϊκών στοιχείων που θα επικολλούνται στα παράθυρά μας, χωρίς να εμποδίζουν την ορατότητα.

Από την ανακάλυψή του γραφένιου, υπήρξε μεγάλο ενδιαφέρον για το νέο αυτό υλικό θαύμα, το οποίο ήταν αφορμή για τη συγγραφή πολλών ερευνητικών άρθρων. Ο παρακάτω πίνακας (Εικόνα 1.8) , δείχνει πως η ποσότητα των δημοσιευμένων άρθρων με θέμα το γραφένιο και τις εκπληκτικές του δυνατότητες , αυξηθεί ραγδαία τα τελευταία χρόνια.



*Εικόνα 1.8: Άρθρα με "γραφένιο" στον τίτλο ανά έτος [4].*

## 1.8 Μέθοδοι σύνθεσης γραφένιου

### 1.8.1 Κρυσταλλική ανάπτυξη σε Καρβίδιο του Πυριτίου

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον για εμπορικές εφαρμογές (κυρίως στην μικρο- και νανο-ηλεκτρονική) παρουσιάζουν οι τεχνικές της επιταξιακής ανάπτυξης, οι τεχνικές δηλαδή που εκμεταλλεύονται τη δομή καταλλήλου υποστρώματος για την ανάπτυξη του επιθυμητού επιστρώματος, στην περίπτωση μας του γραφένιου.

Σε αυτή τη μέθοδο, χρειαζόμαστε ένα υπόστρωμα από Καρβίδιο του Πυριτίου (SiC) . Όταν το υπόστρωμα SiC θερμαίνεται , άτομα πυριτίου εξαχνώνονται από την επιφάνειά του. Η απομάκρυνση των ατόμων πυριτίου επιτρέπει στα ανθρακικά άτομα που βρίσκονται στην επιφάνεια να αλληλεπιδράσουν σχηματίζοντας φύλλα γραφενίου. Το πάχος αυτών των φύλλων εξαρτάται από το χρόνο της θερμικής κατεργασίας (ανόπτηση) και τη θερμοκρασία. Ο σχηματισμός λίγων φύλλων γραφενίου συνήθως απαιτεί μερικά λεπτά ανόπτησης στους 1200°C. Η διαδικασία είναι γνωστή ως «γραφίτοποίηση» (graphitization)

Παρά τα προτερήματα χρήσης αυτής της μεθόδου όμως υπάρχουν και ορισμένα εμπόδια που οφείλουν να ξεπεραστούν. Για παράδειγμα, η δυσκολία να ελεγχθεί πλήρως το πάχος των γραφιτικών υμενίων που παράγονται, όπως επίσης και ο διαφορετικός επιταξιακός ρυθμός ανάπτυξης μεταξύ της πυριτικής και της ανθρακικής πλευράς του SiC [4]

Αποτελεί ιδιαίτερα προσφιλή διαδικασία, καθώς αφενός το πολυεπίπεδο γραφένιο που σχηματίζεται έχει ιδιότητες του μονοεπίπεδου, αφετέρου, είναι μια διαδικασία η οποία επιτυγχάνεται με συνήθεις μεθόδους μικροηλεκτρονικής. Το 2008 επιτεύχθηκε η κατασκευή chip με μερικές εκατοντάδες transistor

### **1.8.2 Κρυσταλλική ανάπτυξη σε μεταλλικό υπόστρωμα**

Σε αυτή τη μέθοδο εκμεταλλευόμαστε τη κρυσταλλική δομή μετάλλων όπως Ρουθίνιο (Ru), Ιρίδιο (Ir) και Λευκόχρυσος (Pt) [4]. Το εκάστοτε υπόστρωμα υπόκειται σε λείανση . Για τον καθαρισμό γίνεται χρήση υπέρηχων. Στη συνέχεια τοποθετείται σε θάλαμο υψηλού κενού, στον οποίο θα ακτινοβοληθεί με Αργό (Ar). Η διαδικασία ολοκληρώνεται με τη θερμική αποσύνθεση με τη βοήθεια αιθυλένιου. Βασικό μειονεκτήματα είναι η εξάρτηση από το υπόστρωμα .

### 1.8.3 Μηχανική αποφλοΐωση (Scotch Tape Exfoliation)

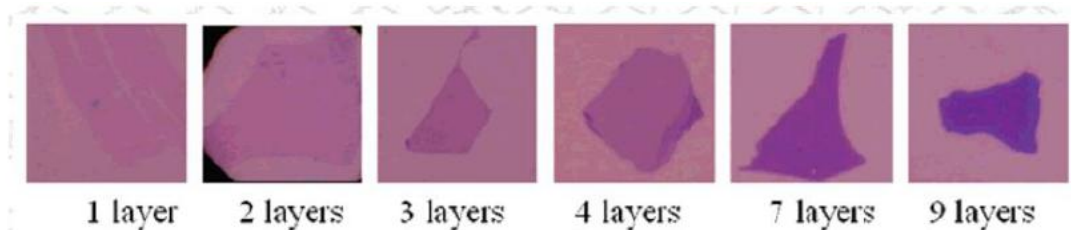
Έως σήμερα έχουν εφαρμοστεί αρκετές τεχνικές για την παρασκευή του γραφενίου. Μία από τις αποδοτικότερες -τουλάχιστον όσον αφορά στις ερευνητικές εφαρμογές παραμένει η κλασική πλέον τεχνική της μηχανικής αποφλοΐωσης (Scotch Tape Exfoliation) των Geim και Novoselov.

Η τεχνική αυτή εαναφέρεται στην αποφλοΐωση γραφίτη καλής κρυσταλλικής ποιότητας (όπως για παράδειγμα ο πυρολυτικός (HOPG)), είτε τρίβοντάς τον πάνω σε διοξείδιο του πυριτίου με υπόστρωμα πυριτίου, είτε με τη χρήση κολλητικής ταινίας είτε εγχαράσσεται (ξηρή εγχάραξη) σε πλάσμα οξυγόνου.

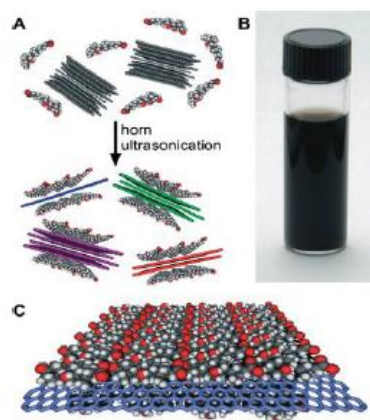
Με τη μέθοδο της μηχανικής αποφλοΐωσης, οι δύο ερευνητές κατόρθωσαν να απομονώσουν και άλλους μονοστρωματικούς κρυσταλλίτες (όπως σεληνιούχο νιόβιο, θειούχο μολυβδένιο, αζωτούχο βόριο). Στη συνέχεια μεταφέρεται στην επιφάνεια ενός φωτοπολυμερούς (photoresist) και με τη βοήθεια μίας κολλητικής ταινίας απολεπίζεται, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1.9 [4]. Οι νιφάδες που παραμένουν τελικά στο φωτοπολυμερές πλένονται με ακετόνη και μεταφέρονται σε ένα δισκίδιο πυριτίου. Αυτές οι νιφάδες περιλαμβάνουν από ένα έως μερικά φύλλα γραφενίου. Παρότι αυτή η προσέγγιση ακολουθήθηκε από τους Geim και Novoselov και οδήγησε σε σημαντικές ανακαλύψεις αδυνατεί να εφαρμοσθεί εμπορικά λόγω της μικρής δυνατότητας παραγωγής μεγάλων ποσοτήτων.

Κατά την παρασκευή του γραφενίου με μηχανική αποφλοΐωση προκύπτει ένας μικρός αριθμός επιθυμητών κρυσταλλιτών, ανάμεσα σε χιλιάδες νιφάδες γραφίτη, διασκορπισμένων σε μία έκταση της τάξης του  $1 \text{ cm}^2$  (επιφάνεια αρκετά μεγάλη για νανομετρικής κλίμακας σάρωση) [4].

Η εύρεση και παρατήρηση των κρυσταλλιτών γραφενίου, μπορεί να επιτευχθεί με οπτική μικροσκοπία, με τη χρήση λευκού φωτός, όταν αυτό είναι τοποθετημένο επάνω σε στρώμα  $\text{SiO}_2$  ή  $\text{Si}$  πάχους 300 nm [4]. Στην περίπτωση αυτή η συμβολή των ανακλώμενων δεσμών οδηγεί σε παρατηρήσιμη οπτική αντίθεση του γραφενίου (Εικόνα 1.8).



**Εικόνα 1.8:** Εικόνες από οπτικό μικροσκόπιο που φαίνονται ένα και περισσότερα στρώματα (layers) γραφενίου πάνω στην επιφάνεια του Si/SiO<sub>2</sub> [20]



**Εικόνα 1.9:** Η μέθοδος απολέπισης μέσω ταινίας (αριστερά), απολέπιση με παρεμβολή μορίων ανάμεσα στα γραφιτικά επίπεδα (δεξιά) [4]

Σημαντικό ρόλο για την ικανή αντίθεση και την οπτική παρατήρηση ακόμη και του μονοστρωματικού γραφενίου παίζει ο συντελεστής απορρόφησης και η μεγάλη σχετικά αδιαφάνειά του, παρόλο που έχει πάχος ενός μόνο ατόμου. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το πάχος του στρώματος SiO<sub>2</sub> είναι ιδιαίτερα κρίσιμο και αποκλίσεις της τάξης του  $\pm 5\%$  καθιστούν το γραφένιο αόρατο. Σύμφωνα μάλιστα με τους Geim και Novoselov αυτός ήταν και ο βασικός λόγος που δεν απομονώθηκε νωρίτερα το υλικό, παρόλο που στις περισσότερες περιπτώσεις ήταν μάλλον παρόν.

#### 1.8.4 Σύνθεση γραφενίου μέσω χημικών διεργασιών

Η σύνθεση του γραφενίου μέσω χημικών διεργασιών περιλαμβάνει την αρχική παρασκευή του οξειδίου του γραφίτη (GO) με τη χρήση της μεθόδου των Hummers-Offeman, η οποία περιλαμβάνει την ανάμιξη του γραφίτη σε διάλυμα θειικού οξέως ( $H_2SO_4$ ), νιτρικού νατρίου ( $NaNO_3$ ) και υπερμαγγανικού καλίου ( $KMnO_4$ ) [4].

Το οξείδιο του γραφίτη είναι μία ιδιαίτερα υδρόφιλη δομή η οποία με κατάλληλη τροποποίηση μπορεί να οδηγήσει στο σχηματισμό οξειδίου του γραφενίου. Παρά το γεγονός ότι οξείδιο του γραφίτη και οξείδιο του γραφενίου μοιράζονται παρόμοιες χημικές ιδιότητες, η δομή τους διαφέρει σημαντικά. Το οξείδιο του γραφενίου είναι ένα μονοστρωματικό υλικό, που προκύπτει από την απολέπιση του οξειδίου του γραφίτη.

Το οξείδιο του γραφενίου, χαρακτηρίζεται ως μονωτικό υλικό και εμφανίζει σημαντικό αριθμό ατελειών και παραμορφώσεων. Η χρήση της υδραζίνης (hydrazine) ως ενός ισχυρού αναγωγικού μέσου, αποδεικνύεται ιδιαίτερα αποδοτική καθώς δεν αντιδρά με το νερό και δημιουργεί πολύ λεπτά υμένα γραφίτη. Η απομάκρυνση των μορίων οξυγόνου καθιστά το οξείδιο του γραφενίου λιγότερο υδρόφιλο [4].

#### 1.8.5 Τομή Νανოსωλήνων

Τα τελευταία χρόνια νέες μέθοδοι έχουν προκύψει και διαφέρουν αρκετά από τις προαναφερθείσες. Σε αυτές περιλαμβάνονται το «ξετύλιγμα» των νανοςωλήνων άνθρακα με χρήση εγχάραξης με πλάσμα σε ροή Αργού (Ar), όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1.10



*Εικόνα 1.10: Η διαδικασία «ξετυλίγματος» για την παραγωγή γραφενίου [5]*

### **1.8.6 Χημική εναπόθεση ατμών (CVD)**

Εκτός από τη χρήση μηχανικής ή χημικής απολέπισης, συνεχώς αναπτυσσόμενη είναι και η χρήση της χημικής εναπόθεσης από ατμό. Αποτελεί μία τεχνική η οποία δύναται να χρησιμοποιηθεί για μαζικότερη παραγωγή ενός μέχρι και λίγων λεπτών υμενίων γραφενίου. Η πρώτη επιτυχημένη προσπάθεια σύνθεσης γραφενίου με CVD αναφέρθηκε το 2006 από τον Somaní.[4].

Μία τυπική διαδικασία CVD περιλαμβάνει τη διάλυση του άνθρακα στην επιφάνεια υποστρώματος νικελίου ακολουθούμενη από τοποθέτηση του άνθρακα πάνω στο υπόστρωμα με ψύξη του νικελίου. Το υπόστρωμα τοποθετείται έπειτα σε έναν θάλαμο CVD που βρίσκεται υπό κενό ( $10^{-3}$  Torr) και σε θερμοκρασία μικρότερη των  $1000^{\circ}\text{C}$ , ενώ πραγματοποιείται ροή αερίου υδρογονανθράκων[4].

Το πάχος και η κρυσταλλικότητα του τελικού προϊόντος καθορίζεται από το ρυθμό ψύξης και τη συγκέντρωση του άνθρακα που αρχικώς διαλύεται στην επιφάνεια του καταλυτικού υποστρώματος. Σημαντικό ρόλο στην ποιότητα του γραφενίου διαδραματίζει φυσικά και το είδος του υδρογονάνθρακα που θα χρησιμοποιηθεί στο θάλαμο .

Μία άλλη μέθοδος CVD που χρησιμοποιείται είναι αυτή με συνεισφορά πλάσματος (PECVD), η οποία δίνει τελικά προϊόντα μεγάλου πάχους. Σε αυτήν την περίπτωση χρησιμοποιείται μεθάνιο ( $\text{CH}_4$ ) σε ατμόσφαιρα  $\text{H}_2$  και πίεση της τάξης των 12Pa[4].

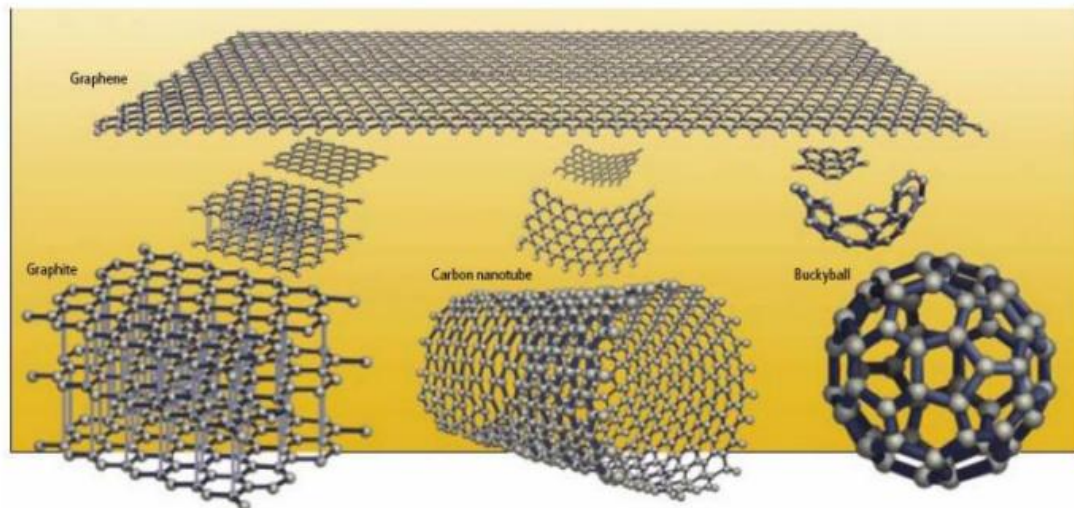
### **1.8.7 Παρεμβολή μικρών μορίων με μηχανική απολέπιση ανάμεσα στα φύλλα γραφίτη**

Μια άλλη μέθοδος, είναι η παρεμβολή ενώσεων παρεμβολής γραφίτη (GICs) ανάμεσα στα φύλλα του γραφίτη . Κατά τη παρεμβολή των ενώσεων αυτών, τα γραφιτικά επίπεδα παραμένουν αναλλοίωτα χωρίς να επηρεάζεται η δομή τους.

Όταν τα στρώματα γραφίτη αλληλεπιδρούν με τα φιλοξενούμενα μόρια μέσω μεταφοράς φορτίων, η ηλεκτρική αγωγιμότητα της επιφάνειας αυξάνεται, όμως οι χημικές ενώσεις δημιουργούν ομοιοπολικούς δεσμούς και η αγωγιμότητα μειώνεται [4]. Η πρώτη ένωση παρεμβολής γραφίτη, (GIC) παρασκευάστηκε από τον Schafhaoutl το 1841, ενώ μελετούσε νιφάδες γραφίτη σε διάλυμα θειικού οξέος.

## 1.9 Παράγωγα γραφενίου

Το γραφένιο, όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα, αποτελεί βασικό δομικό στοιχείο από το οποίο αποτελούνται γραφιτικά υλικά διαφορετικής διαστατικότητας όπως ο γραφίτης (3D), το πολυστρωμικό γραφένιο (3D), οι νανοσωλήνες άνθρακα (1D) και το φουλερένιο.



*Εικόνα 1.11 : Διαφοροποίηση αλλοτροπικών μορφών άνθρακα [6]*

### 1.9.1 Πολυστρωμικό Γραφένιο

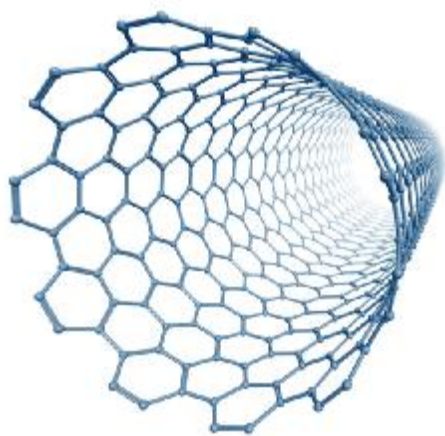
Το γραφένιο ανάλογα με το πλήθος των στρώσεων από τις οποίες αποτελείται, διακρίνεται στο γραφένιο μονού στρώματος, το οποίο αποτελείται από ένα διδιάστατο πλέγμα ατόμων άνθρακα που είναι διευθετημένα από δύο ή και περισσότερα πλέγματα άνθρακα. Ως εκ τούτου, προκύπτει ότι το γραφένιο μονού στρώματος είναι διδιάστατο (2D), όπως και το πλέγμα άνθρακα από το οποίο αποτελείται, ενώ το πολυστρωματικό γραφένιο είναι τρισδιάστατο (3D).



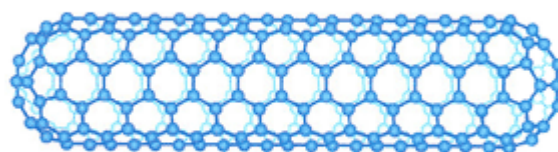
Η μεταφορά από τις δύο διαστάσεις στις τρεις είναι ένα γεγονός το οποίο παρουσιάζει πραγματικά ενδιαφέρον. Τα πολυστρωματικά γραφένια ή Graphene Nanoplatelets (GNPs), όπως αναφέρονται στην παγκόσμια βιβλιογραφία, αποτελούνται από 2 έως 100 φύλλα περίπου, ενώ όσα αποτελούνται πάνω από 100 φύλλα, θεωρούνται λεπτό φιλμ γραφίτη. Μεγαλύτερο επιστημονικό ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα πολυστρωματικά που αποτελούνται από 2 έως 10 περίπου στρώσεις.

### 1.9.2 Νανოსωλήνες άνθρακα

Οι νανοςωλήνες άνθρακα αποτελούν μία μονοδιάστατη (1D) αλλοτροπική μορφή του άνθρακα, η οποία προκύπτει από την αναδίπλωση ενός φύλλου μονοστρωματικού γραφενίου, όπου σχηματίζονται κύλινδροι τυπικής διαμέτρου περίπου 1.4nm , τα άκρα των οποίων είναι δυνατό να είναι είτε ανοιχτά (Εικόνα 1.12), είτε καλυμμένα με ημιφουλερένια (1.13) .



*Εικόνα 1.12 : Δομή νανοςωλήνα άνθρακα με ανοιχτά άκρα .*

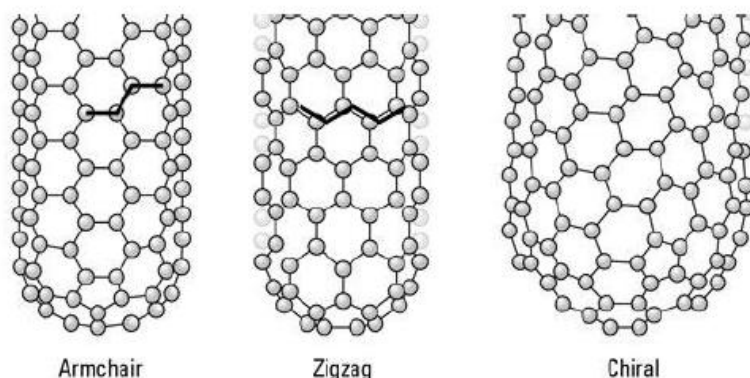


*Εικόνα 1.13 : Δομή νανοςωλήνα άνθρακα με κλειστά άκρα .*

Η δομή ενός νανοςωλήνα άνθρακα μπορεί να προσομοιωθεί με την εξής θεωρητική κατασκευαστική διαδικασία: Το φύλλο γραφενίου διπλώνεται σε συγκεκριμένες διευθύνσεις σχηματίζοντας κύλινδρους έτσι ώστε η διεύθυνση δίπλωσης του κυλίνδρου θα προσδίδει κάθε φορά συγκεκριμένες ιδιότητες στον νανοςωλήνα.



Οι τρεις τύποι νανοσωλήνων άνθρακα που προκύπτουν από την παραπάνω διαδικασία είναι ονομαστικά οι armchair, zig-zag και chiral (Εικόνα 1.15). Οι συγκεκριμένες ονομασίες προέρχονται από την διάταξη των εξαγώνων στην περιφέρεια του κυλίνδρου που έχει προέλθει από συγκεκριμένη κάθε φορά διεύθυνση δίπλωσης του φύλλου γραφενίου. Στην εικόνα 1.15 φαίνονται καθαρά οι διαφορές των τριών αυτών χαρακτηριστικών δομών νανοσωλήνων άνθρακα.



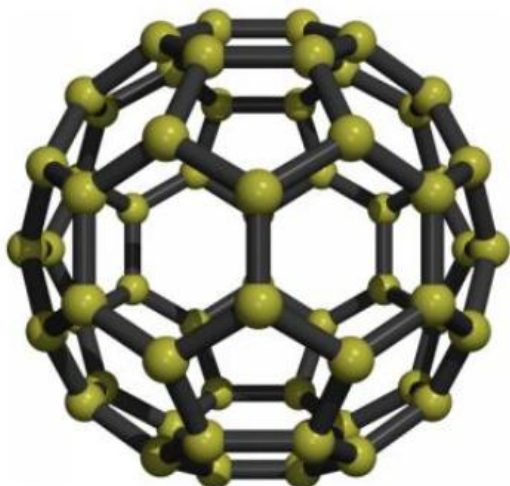
*Εικόνα 1.15: Οι τρεις τύποι νανοσωλήνων άνθρακα*

### 1.9.3 Φουλερένιο

Τα φουλερένια ανακαλύφθηκαν το 1985 από τους Richard E. Smalley, Robert F. Curl και Harold Kroto και τα μόρια πήραν το όνομα τους από τον Αμερικανό αρχιτέκτονα Richard Buckminster Fuller, για το γαιοδετικό θόλο που σχεδίασε (Εικόνα 1.16) Είναι κλειστές κοίλες αρωματικές ενώσεις, οι οποίες αποτελούνται από άρτιο αριθμό ατόμων άνθρακα (από 32 έως 600) κατανομημένων έτσι ώστε να σχηματίζουν πενταγωνικές και εξαγωνικές έδρες. Οι κορυφές των εδρών είναι άτομα άνθρακα, ενώ οι ακμές είναι οι δεσμοί. Δεν υπάρχουν ελεύθερα σθένη, με αποτέλεσμα τα μόρια των φουλερενίων να έχουν χημική και φυσική σταθερότητα. Τα φουλερένια του Buckminster ή αλλιώς Buckyballs είναι ένα κοίλο σύμπλεγμα 60 ατόμων άνθρακα που έχει σχήμα μπάλας ποδοσφαίρου (Εικόνα 1.17). Τα Buckyballs είναι το πιο στρογγυλό και πιο συμμετρικό μεγάλο μόριο που γνωρίζουμε.

Το πιο γνωστό είναι αυτό το οποίο αποτελείται από 60 άτομα άνθρακα ( $C^{60}$ ) και έχει σταθερή δομή που μοιάζει με αυτή της «μπάλας ποδοσφαίρου». Οι ερευνητές έχουν ανακαλύψει μια ολόκληρη οικογένεια

τέτοιων μορίων , όμως είναι και τα φουλερένια με 70, 76 και 84 άτομα άνθρακα ( $C^{60}$ ,  $C^{76}$ ,  $C^{84}$ ).



*Εικόνα 1.17 : Δομή φουλερενίου*

Το Buckyball έχει εξίσου ενδιαφέρουσες φυσικές ιδιότητες. Είναι ανθεκτικό στην κρούση, εξαιρετικά στιβαρό και πολύ σταθερό, ικανό να επιβιώσει σε ακραίες θερμοκρασίες στο διάστημα και υπάρχουν επίσης ενδείξεις υπεραγωγιμότητας. Συστήνεται επίσης ως λιπαντικό.

Τα Buckyballs απορροφούν επίσης καλά τα άτομα υδρογόνου. Για το λόγο αυτό, θεωρείται ότι μπορεί να είναι καλύτερο μέσο αποθήκευσης υδρογόνου, και άρα πιθανά να αποτελούν σημαντικό παράγοντα στη δημιουργία νέων μπαταριών για αυτοκίνητα που δε θα ρυπαίνουν το περιβάλλον.

Άλλες πιθανές εφαρμογές τους στη βιομηχανία είναι: οπτικές συσκευές, χημικοί αισθητήρες και συσκευές χημικού διαχωρισμού, παραγωγή διαμαντιών και καρβιδίων ως εργαλεία κοπής, μπαταρίες και άλλες ηλεκτροχημικές εφαρμογές, πολυμερή, καταλύτες. Πρόσφατα πειράματα που έκανε ο Ron Turco, περιβαλλοντικός μικροβιολόγος στο Πανεπιστήμιο Purdue, δείχνουν ότι τα buckyballs δε βλάπτουν το έδαφος. Επιπλέον, πολλά μόρια φαρμάκων μπορούν να συνδεθούν με τα buckyballs. Όπως και με τα μαγνητικά νανοσωματίδια, η ιατρική μπορεί να διοχετευτεί μόνο εκεί που χρειάζεται, αφήνοντας ανέπαφα τα υγιή κύτταρα. Τα ημισφαιρικά buckyballs και οι νανοσωλήνες άνθρακα χρησιμοποιούνται επίσης στα Μικροσκόπια Ατομικής Δύναμης και σε μικροσκόπια Σάρωσης Σήραγγας για να ακονίζουν την ακίδα ώστε να δίνει εικόνες υψηλής ευκρίνειας των επιφανειών.

Οι Αστρονόμοι που χρησιμοποιούν το τηλεσκόπιο Spitzer Space της NASA ανακάλυψαν μόρια άνθρακα, γνωστά ως "buckyballs," στο διάστημα για πρώτη φορά το 2010. Υπήρχε η πεποίθηση ότι τα Buckyballs αιωρούνταν στο διάστημα αλλά δεν είχαν εντοπιστεί μέχρι σήμερα

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΟΙ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΓΡΑΦΕΝΙΟΥ

### **2.1. Ατομική δομή**

Εικόνες διάθλασης ηλεκτρονίων παρουσίασαν το αναμενόμενο εξαγωνικό δικτυωτό πλέγμα του γραφενίου. Επίσης, το απομονωμένο γραφένιο παρουσίασε «κυματισμό» του επίπεδου φύλλου, με εύρος περίπου ενός νανομέτρου. Αυτοί οι κυματισμοί μπορούν να είναι αποτέλεσμα της αστάθειας των δισδιάστατων κρυστάλλων ή μπορεί να προέρχονται από ρύπους. Για τη μελέτη αυτή, έχουν ληφθεί εικόνες ατομικής ανάλυσης απομονωμένου, μονοστρωματικού γραφενίου πάνω σε υποστρώματα διοξειδίου πυριτίου με χρήση μικροσκοπίου σάρωσης (STM).

Φύλλα γραφενίου σε στερεά μορφή (πυκνότητα  $> 1 \text{ g/cm}^3$ ) εμφανίζονται συνήθως κατά την περίθλαση στρώσεων γραφίτη 0,34 nm. Αυτό ισχύει ακόμη για μοεπίπεδο γραφένιο. Ωστόσο, μη στρωματικό γραφένιο με μόνο δακτύλιους έχει βρεθεί στον πυρήνα των προηλιακών γραφιτικών κρεμμυδιών.

Μία έρευνα στο Πανεπιστήμιο του Μάντσεστερ, η οποία δημοσιεύθηκε στο Mesoscale and Nanoscale Physics, έδειξε ότι το γραφένιο μπορεί να αυτοεπισκευάζει τις τρύπες που τυχόν υπάρχουν στα φύλλα του όταν εκτίθεται σε μόρια τα οποία περιέχουν άνθρακα όπως για παράδειγμα οι υδρογονάνθρακες. Όταν οι τρύπες στο γραφένιο βομβαρδίζονται με καθαρά άτομα άνθρακα, τότε αυτές καλύπτονται πλήρως, με τα άτομα του άνθρακα να σπάνε τα κενά και να ευθυγραμμίζονται πλήρως στην εξαγωνική μορφή.

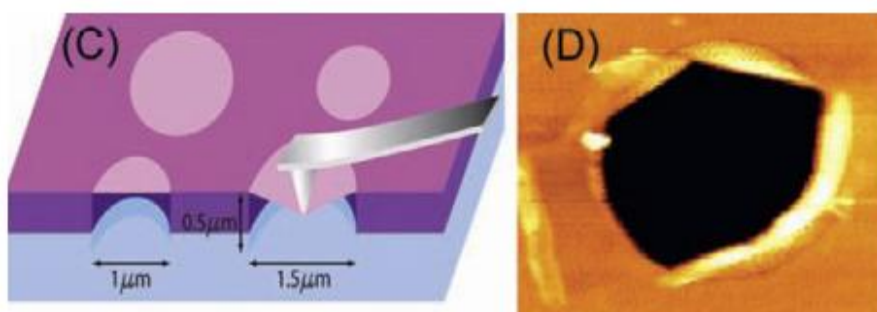
### **2.2. Μηχανικές ιδιότητες**

Μια από τις ιδιότητες του γραφενίου είναι έμφυτη δύναμή του. Λόγω της ισχύος των δεσμών του άνθρακα, το γραφένιο είναι το ισχυρότερο υλικό που έχει ανακαλυφθεί ποτέ, με μέγιστη αντοχή στα 130

δισεκατομμύρια Pascals ( ή 130GPa ) , σε σύγκριση με τα 400.000.000 Pa του δομικού χάλυβα , ή 375.700.000 για αραμιδίου (Kevlar ) [4] .

Δεν είναι μόνο εξαιρετικά ισχυρό , είναι επίσης πολύ ελαφρύ με πυκνότητα  $1\text{g/cm}^3$  . Για να καταλάβουμε καλύτερα τη σπουδαιότητα αυτού του υλικού, αρκεί να σκεφτούμε ότι η παραπάνω πυκνότητα αντιστοιχεί περίπου σε 0.77 mg (μιλιγραμμάρια) ανά τετραγωνικό μέτρο ( για λόγους σύγκρισης , 1 τετραγωνικό μέτρο χαρτιού είναι περίπου 1000 φορές βαρύτερο ) . Λέγεται συχνά ότι ένα μόνο φύλλο γραφενίου ( που έχει πάχος μόνο 1 άτομο ) μάζας 1gr, είναι αρκετό για να καλύψει ένα ολόκληρο γήπεδο ποδοσφαίρου μεγέθους

Για τον υπολογισμό της αντοχής του γραφενίου, οι επιστήμονες χρησιμοποίησαν μια τεχνική με χρήση μικροσκοπίου ατομικής δύναμης. Συγκεκριμένα, η πρώτη συστηματική πειραματική ανάλυση των ελαστικών ιδιοτήτων και της δύναμης που παρουσιάζει το γραφένιο έγινε από τον Lee και την ομάδα του το 2008 . Σε αυτό το πείραμα, μία μεμβράνη γραφενίου τοποθετήθηκε πάνω σε υπόστρωμα με συστοιχίες κυκλικών κοιλοτήτων. Πιέζοντας γραφένιο που βρισκόταν στην κορυφή της κυκλικών κοιλοτήτων (Εικόνα 2.1), μέτρησαν πόσο πολύ μπορείς να πιέσεις γραφένιο σε μια μικρή άκρη χωρίς όμως να σπάσει.



**Εικόνα 2.1:** (σχήμα αριστερά). Μηχανικές δοκιμές του γραφενίου : Σχήμα νανοσκληρομέτρησης σε μεμβράνη γραφενίου - (σχήμα δεξιά) Μικροσκόπιο ατομικής δύναμης: εικόνα μιας σπασμένης μεμβράνης γραφενίου [7]

Διαπιστώθηκε ότι το γραφένιο είναι πιο ανθεκτικό από το διαμάντι και περίπου 300 φορές σκληρότερο από το ασφάλι. Για να το θέσουμε σε ένα πλαίσιο, μπορεί να αντέξει το βάρος ενός ελέφαντα πάνω σε μία βελόνα. Η αντοχή του γραφενίου υπερβαίνει το 1TPa (Tera-Pascal). Η σταθερά ελαστικότητας του διαφέρει από εκείνη του ακατέργαστου γραφίτη, παρόλο που το γραφένιο προέρχεται από τον γραφίτη

Αυτές οι υψηλές τιμές καθιστούν το γραφένιο πολύ ισχυρό και άκαμπτο. Αυτές οι εγγενείς ιδιότητες θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε αξιοποίηση του γραφένιου σε εφαρμογές NEMS, όπως αισθητήρες πίεσης, και ηχεία.

Εκτός από ανθεκτικό είναι όμως και πολύ εκτατό . Μπορεί κάποιος να τεντώσει το γραφένιο έως 20% του αρχικού μήκους του. Αναμένεται ότι οι μηχανικές ιδιότητες του γραφένιου θα βρουν εφαρμογές στην παραγωγή μιας νέας γενιάς των σούπερ ισχυρών σύνθετων υλικών σε συνδυασμό με τις οπτικές ιδιότητες του, τις οποίες θα αναλύσουμε στη συνέχεια.

### 2.3. Ηλεκτρονικές Ιδιότητες

Οι μοναδικές ιδιότητες του γραφένιου προκύπτουν από τη συνολική συμπεριφορά των ηλεκτρονίων . Αυτό από μόνο του δεν είναι κάτι καινούργιο ,όπως συνοψίζεται στην περίφημη ρήση του Philip Ανδερσον "more is different " , γνωρίζουμε ότι όταν ένας μεγάλος αριθμός από σωματίδια αλληλεπιδρούν έντονα μεταξύ τους , αναπάντεχες συλλογικές κινήσεις μπορεί να προκύψουν. Στην περίπτωση των γραφένιου , η αλληλεπίδραση μεταξύ των ηλεκτρονίων και το πλέγμα του , προκαλεί στα ηλεκτρόνια να συμπεριφέρονται σαν να μην έχουν καμία απολύτως μάζα («μιμούνται» σχετικιστικά σωματίδια) . Εξαιτίας αυτού , τα ηλεκτρόνια στο γραφένιου διέπονται από την εξίσωση Dirac - η κβαντομηχανική περιγραφή των ηλεκτρονίων που βρίσκονται σε σχετικιστική κίνηση και , συνεπώς, καλούνται φερμιόνια Dirac [4].

Η σχετικιστική συμπεριφορά των ηλεκτρονίων στο γραφένιου προβλέφθηκε αρχικά το 1947 από τον καναδό θεωρητικό Philip Russell Wallace . Εκείνη την εποχή, ωστόσο, κανείς δεν πίστευε ότι ένα στερεό πάχους μόνο ενός ατόμου θα μπορούσε να υπάρξει , έτσι ο Wallace χρησιμοποίησε το μοντέλο του γραφένιου ως αφετηρία για να μελετήσει τον γραφίτη .

Με βάση το έργο του , η θερμοδυναμική και οι μεταφορικές ιδιότητες του γραφίτη μελετήθηκαν εκτενώς τη δεκαετία του 1960 και το αξιοσημείωτο είναι ότι υπήρξε συμφωνία μεταξύ των θεωρητικών προβλέψεων των ιδιοτήτων όπως η θερμοχωρητικότητα, και τα πειραματικά δεδομένα που εξήγαγαν [4]. Αυτό θεωρείται ως μία από τις μεγαλύτερες επιτυχίες στη φυσική συμπεκνωμένης ύλης.

Μια από τις πιο χρήσιμες ιδιότητες των γραφενίου είναι ότι είναι ένας ημιαγωγός μηδενικού χάσματος ( με τις οπές και τα ηλεκτρόνια ως φορείς φορτίου ) με πολύ υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα . Άτομα άνθρακα έχουν συνολικά 6 ηλεκτρόνια -, 2 στην εσωτερική στιβάδα και 4 στην εξωτερική . Τα 4 ηλεκτρόνια των εξωτερικών στιβάδων σε ένα μεμονωμένο άτομο άνθρακα είναι διαθέσιμα για χημική σύνδεση , αλλά σε ένα γραφένιο, κάθε άτομο είναι συνδεδεμένο με άλλα 3 άτομα άνθρακα για το διδιάστατο επίπεδο , αφήνοντας 1 ηλεκτρόνιο ελεύθερα διαθέσιμο στην τρίτη διάσταση για την ηλεκτρονική αγωγιμότητα. Αυτά τα υψηλής κινητικότητας ηλεκτρόνια ονομάζονται p ( π ) ηλεκτρόνια και βρίσκονται πάνω και κάτω από το φύλλο γραφενίου . Αυτά τα τροχιακά p αλληλεπικαλύπτονται για να συμβάλουν στην ενίσχυση των δεσμών άνθρακα με άνθρακα στο γραφένιο . Βασικά, οι ηλεκτρονικές ιδιότητες του γραφενίου προκύπτουν από τα τροχιακά p ηλεκτρόνια[8] .

Τα τελευταία 50 χρόνια έχει αποδειχθεί ότι τα ηλεκτρόνια και οι οπές έχουν μηδενική μάζα. Αυτό συμβαίνει επειδή η σχέση ενέργειας - κίνησης είναι γραμμική για χαμηλές ενέργειες [8]. Αυτά τα ηλεκτρόνια και οι οπές είναι γνωστά ως φερμιόνια Dirac , ή Graphins .

Οι δοκιμές έχουν δείξει ότι ευκινησία των ηλεκτρονίων στο γραφένιο είναι πολύ υψηλή,  $15.000 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  1 και θεωρητικά πιθανών μπορεί να φτάσει και τα  $200.000 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  (περιορίζεται από τη σκέδαση ακουστικών φωτονίων στο γραφένιο) [8] .

Λέγεται ότι τα ηλεκτρόνια στο γραφένιο μοιάζουν πολύ όπως τα φωτόνια στην ευκινησία τους , λόγω έλλειψης της μάζας τους . Αυτοί οι φορείς φορτίου είναι σε θέση να ταξιδεύουν αποστάσεις νανόμετρου χωρίς να σκεδαστούν. Ένα φαινόμενο γνωστό ως βαλλιστική μεταφορά (ballistic conduction). Ωστόσο, η ποιότητα του γραφενίου και το υπόστρωμα που χρησιμοποιείται θα είναι οι περιοριστικοί παράγοντες . Με διοξείδιο του πυριτίου ( $\text{SiO}_2$ ) ως υπόστρωμα , για παράδειγμα, η ευκινησία μπορεί να φτάσει και τα  $40.000 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  [8].

## 2.4. Στροφορμή (Spin)

Το γραφένιο πιστεύεται ότι είναι ένα ιδανικό υλικό για την σπιντρονική λόγω της χαμηλής αλληλεπίδρασης της τροχιάς σπιν και επίσης λόγω της σχεδόν απουσίας της πυρηνικής μαγνητικής ροπής στον άνθρακα. Ηλεκτρικό ρεύμα περιστροφής (spin-current) έγχυσης και ανίχνευσης στο γραφένιο παρουσιάστηκε πρόσφατα σε θερμοκρασία δωματίου.

Έχει παρατηρηθεί σπιν συνοχής μήκους πάνω από 1 μικρόμετρο σε θερμοκρασία δωματίου και ο έλεγχος του ρεύματος περιστροφής του σπιν με μία ηλεκτρική είσοδο παρατηρήθηκε σε χαμηλή θερμοκρασία.

## 2.5. Θερμικές ιδιότητες

Το γραφένιο, αρχικά σχεδιάστηκε να εφαρμοστεί σε ηλεκτρονικές συσκευές, διότι η θερμική διαχείριση είναι ένας από τους βασικούς παράγοντες για την καλύτερη απόδοση και αξιοπιστία των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων. Οι αλλοτροπικές μορφές του άνθρακα, που αναφέραμε στο πρώτο κεφάλαιο, έχουν μεγάλη θερμική αγωγιμότητα λόγω των ισχυρών ομοιοπολικών δεσμών τους άνθρακα και της σκέδασης φωτονίων. Στην Εικόνα 2.2, παρουσιάζονται οι τιμές της θερμικής αγωγιμότητας του γραφενίου.

Material	Thermal conductivity
Single layer graphene	4840–5300 W/mK at RT
Suspended graphene flake	4100–4800 W/mK at RT
Single layer (suspended)	3000–5000 W/mK at RT (suspended)
Single layer (on SiO <sub>2</sub> support)	600 W/mK at RT (on a silicon dioxide support)
Reduced graphene oxide flake	0.14–0.87 W/mK

*Εικόνα 2.2 : Οι θερμικές ιδιότητες του γραφενίου και υλικών που στηρίζονται στο γραφένιο. [4]*

Ενδεικτικά, οι νανοσωλήνες άνθρακα έχουν θερμική αγωγιμότητα σε θερμοκρασία δωματίου 3000 W / mK [4]. Πρόσφατα, η υψηλότερη θερμική αγωγιμότητα σε θερμοκρασία δωματίου που επετεύχθη, ήταν τα



5000W/mK σε ενιαία στρώματα γραφενίου (καθαρό χωρίς ελαττώματα) [4].

Εφόσον η πυκνότητα φορέων στο καθαρό γραφένιο είναι σχετικά χαμηλή, η ηλεκτρονική συνεισφορά στη θερμική αγωγιμότητα, σύμφωνα με το νόμο Wiedemann-Franz είναι αμελητέα. Η θερμική αγωγιμότητα του γραφενίου λοιπόν, οφείλεται στην κίνηση των φωτονίων, δηλαδή αγωγιμότητα λόγω διάχυσης σε υψηλές θερμοκρασίες και βαλλιστική αγωγιμότητα ( $\kappa$ ) σε χαμηλές θερμοκρασίες. Σύμφωνα με προσομοιώσεις μοριακής δυναμικής (MD), οι οποίες βασίστηκαν στην προσέγγιση Green-Kubo, δείχθηκε μία εξάρτηση του  $\kappa = 1/T$  από τη θερμοκρασία για γραφένιο χωρίς ατέλειες, καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται πάνω από τους 100K [4].

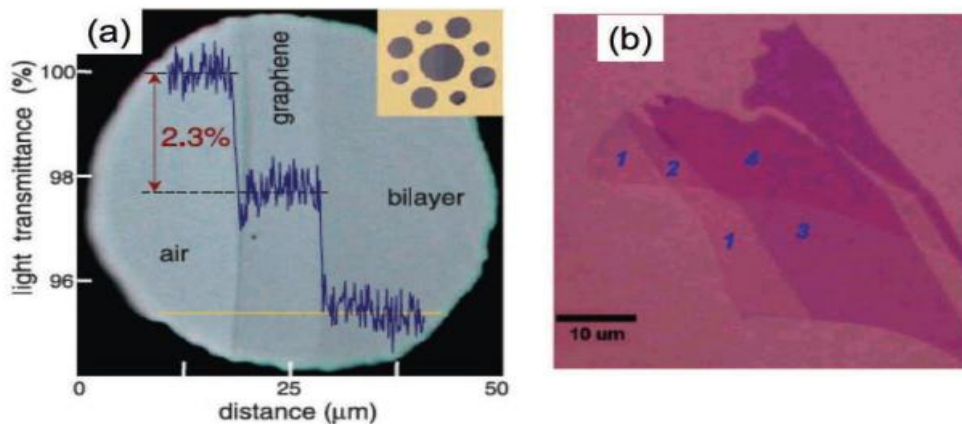
## 2.6. Οπτικές ιδιότητες

Όσον αφορά στις οπτικές ιδιότητες, είναι σχεδόν διαφανές απορροφώντας το ~2.3% του προσπίπτοντος φωτός, για ένα ευρύ φάσμα μηκών κύματος από το υπέρυθρο έως και το ορατό.

Η δυνατότητα του γραφενίου να απορροφήσει το 2,3 % του προσπίπτοντος λευκού φωτός, είναι μια μοναδική και ενδιαφέρουσα ιδιότητα, λαμβάνοντας ιδιαίτερα υπόψη ότι είναι πάχους μόνο ενός ατόμου. Αυτό οφείλεται στις προαναφερθείσες ηλεκτρονικές ιδιότητες, τα ηλεκτρόνια δρουν σαν άμαζοι μεταφορείς φορτίων με πολύ υψηλή κινητικότητα.

Η ασυνήθιστα χαμηλή ενέργεια της ηλεκτρονικής δομής του μονοστρωματικού γραφενίου, αναδुकνειεί ηλεκτρόνια και οπές κωνικής ζώνης που συναντιούνται μεταξύ τους στο σημείο Dirac που είναι ποιοτικά διαφορετικό από τις πιο κοινές τετραγωνικές συμπαγείς ζώνες.

Πριν από μερικά χρόνια, αποδείχτηκε ότι ένα ποσοτό του λευκού φωτός απορροφάται με βάση σταθεράς λεπτής υφής. Η απορρόφηση αυξάνεται γραμμικά με ταυτόχρονη αύξηση του αριθμού των φύλλων γραφενίου τα οποία «στοιβάζονται» προσεγγίζοντας ένα τρισδιάστατο μοτίβο όπως βλέπουμε και στην Εικόνα 2.2 [16].



*Εικόνα 2.3: Απορρόφηση ενός φύλλου γραφενίου (αριστερά) και αύξηση της απορρόφησης ανάλογα με τον αριθμό των φύλλων (δεξιά) [16]*

Μελέτες έδειξαν ότι η αδιαφάνεια του γραφενίου είναι ανεξάρτητη του μήκους κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας και αυξάνει κατά 2.3% με κάθε επιπλέον φύλλο γραφενίου. Η σταθερά λεπτής υφής, όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα, είναι  $1/137$  ( $\alpha \approx 1/137$ ), όπου καθορίζει την αλληλεπίδραση ταχέως κινούμενων φορτίων-ΗΜ ακτινοβολίας) ενώ η ανακλαστικότητα του γραφενίου μπορεί να φτάσει μέχρι το 0,1% της προσπίπτουσας ακτινοβολίας [16].

Λόγω της εντυπωσιακών αυτών χαρακτηριστικών, έχει παρατηρηθεί ότι η οπτική ένταση μπορεί να φτάσει ένα συγκεκριμένο όριο (γνωστό ως ροή κορεσμού) όπου μετά από αυτό αρχίζει και εμφανίζεται κορεσμός (η πολύ υψηλή ένταση του φωτός προκαλεί μια μείωση στην απορρόφηση).

Όσον αφορά το πόσο καλά θέλουμε να καταλάβουμε τις πραγματικές δυνατότητες, ιδιότητες του γραφενίου, αυτό είναι μόνο η κορυφή του παγόβουνου. Πριν ενταχθεί για τα καλά σε τομείς της τεχνολογίας στους οποίους πιστεύεται ότι θα υπερέχει, θα πρέπει να αφιερώσουμε πολύ περισσότερο χρόνο για την κατανόηση του τι ακριβώς το κάνει τόσο καταπληκτικό υλικό. Δυστυχώς, ενώ έχουμε πολλή φαντασία και έρχονται νέες ιδέες για πιθανές εφαρμογές και χρήσεις για γραφενίου, χρειάζεται χρόνος για να εκτιμηθεί πλήρως, στο τι πραγματικά είναι το γραφένιο και προκειμένου να αναπτύξουμε τις ιδέες αυτές και να τις εφαρμόσουμε στην καθημερινότητά μας [16].

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Εφαρμογές του γραφενίου στη τεχνολογία

### 3.1 Χρήση σε οθόνες LCD

Σύμφωνα με την ίδια ομάδα των ερευνητών που κατασκεύασαν πρώτοι τα φύλλα 2D άνθρακα σχεδόν πριν από δέκα χρόνια , το γραφένιο θα έχει τις ιδανικές οπτικές ιδιότητες για να σχηματιστούν διαφανή ηλεκτρόδια σε οθόνες υγρών κρυστάλλων (LCD) . Οι ερευνητές έχουν επίσης αναπτύξει μια τεχνική που ξεπερνά τα προβλήματα, με την κατασκευή αρκετά μεγάλων ποσοτήτων γραφενίου.

Οι τυπικές οθόνες LCD περιέχουν μία συστοιχία πολλών «κυττάρων» , καθένα από τα οποία αποτελείται από ένα λεπτό στρώμα υγρών κρυστάλλων που είναι τοποθετημένο μεταξύ ενός ζεύγος πολωτών που διασταυρώνονται σε γωνία  $90^\circ$  μεταξύ τους . Φως που εισέρχεται σε ένα τέτοιο κύτταρο πολωνεται προς μία κατεύθυνση όταν περνά μέσα από τον πρώτο πολωτή , έτσι ώστε όταν φτάσει το δεύτερο να μη μπορεί να περάσει . Αυτό έχει ως αποτέλεσμα στο κύτταρο να εμφανίζεται σκοτάδι . Για να φωτιστεί το κύτταρο, το φως πρέπει να περάσει μέσα από το δεύτερο πολωτή , ο οποίος απαιτεί , ο παρεμβαλλόμενος υγρός κρύσταλλος να περιστρέψει το πολωμένο φως .

Για να γίνει αυτό , ένα ηλεκτρικό πεδίο εφαρμόζεται κατά μήκος των πολωτών και αυτό περιστρέφει τον προσανατολισμό των μορίων στον υγρό κρύσταλλο . Η πόλωση του φωτός οδηγείται κατά μήκος των μορίων , και από τη στιγμή που φθάνει το δεύτερο πολωτή έχει περιστραφεί κατά  $90^\circ$  , με αποτέλεσμα να μπορεί να περάσει.

Φυσικά , το ηλεκτρικό πεδίο πρέπει να εφαρμοστεί με τη χρήση ηλεκτροδίων. Επομένως, αυτά πρέπει να είναι διαφανή και καλοί αγωγοί του ηλεκτρισμού . Για τις εν λόγω μηχανικές κατασκευές συνήθως στρέφονται σε οξειδίο ινδίου κασσιτέρου ( ITO ) . Ωστόσο , το υλικό αυτό έχει μειονεκτήματα, όπως για παράδειγμα , το ίνδιο είναι σπάνιο και επομένως ακριβό και επίσης το ITO μπορεί να απελευθερώσει τόσα ιόντα ινδίου και οξυγόνο, τα οποία εμποδίζουν το υγρό κρύσταλλο από το να ευθυγραμμιστεί σωστά.

Τώρα , μια ομάδα που περιλαμβάνει τον Andre Geim και Kostya Novoselov από το Πανεπιστήμιο του Μάντσεστερ στη Βρετανία και Sergey Morozov από το Ινστιτούτο Μικροηλεκτρονικής Τεχνολογίας στο Chernogolovka στη Ρωσία έχουν διαπιστώσει ότι το γραφένιο είναι γενικά πιο διαφανές από ότι το ITO . Επιπλέον, είναι ένα υλικό χωρίς μειονεκτήματα στη χρήση του για κατασκευή LCD οθονών αλλά και με πάρα πολλές εφαρμογές.

Το γραφένιο αποτελείται από ένα κυματιστό φύλλο άνθρακα πάχους ενός ατόμου , και όχι σαν ένα ενιαίο στρώμα από έναν γραφίτη . Πράγματι , το γραφένιο συχνά κατασκευάζεται από την αποκόλληση ενός στρώματος από ένα λεπτό κομμάτι του γραφίτη με κολλητική ταινία , μια διαδικασία γνωστή ως ή τη «μέθοδο της κολλητικής ταινίας" , όπως αναφέραμε στη αρχή της εργασίας.

Το τελικό αποτέλεσμα είναι τελικά , ότι φύλλα γραφενίου είναι γενικά πιο διαφανή και πιο αγώγιμα από τις στοιβάδες του οξειδίου του ινδίου (ITO) και κασσίτερου. Αυτό καθιστά το γραφένιο ένα πολύ καλό και δυναμικό υλικό για ηλεκτρόδια σε οθόνες υγρών κρυστάλλων (LCD) [21].

Ένα όφελος από τη χρήση γραφενίου για ηλεκτρόδια LCD είναι ότι , σε αντίθεση με το ITO , είναι σταθερό . Αυτό αποτρέπει την απελευθέρωση ιόντων στο "στρώμα ευθυγράμμισης " , η οποία μερικές φορές εμφανίζεται σε ηλεκτρόδια LCD. Τέτοια «αδέσποτα» ιόντα μπορούν να μειωθούν σημαντικά χωρίς να επηρεάζουν την αποτελεσματικότητα του στρώματος ευθυγράμμισης , προκαλώντας ανεπιθύμητο " κόλλημα εικόνας " [21].

Ίσως το πιο σημαντικό , ωστόσο πλεονέκτημα του γραφενίου σε σχέση με το ITO , έχει να κάνει με τη διαφάνεια . Η ομάδα του Geim χρησιμοποίησε μικρομηχανική διάσπαση για να τοποθετήσει τις νιφάδες του γραφενίου σε ένα γυαλί και στη συνέχεια το τοποθέτησε του σε ένα οπτικό μικροσκόπιο . Έτσι, βρήκαν ότι το γραφένιο είχε οπτική μετάδοση περίπου στο 98 % , σημαντικά υψηλότερο από το 82-85 % του ITO [21] .

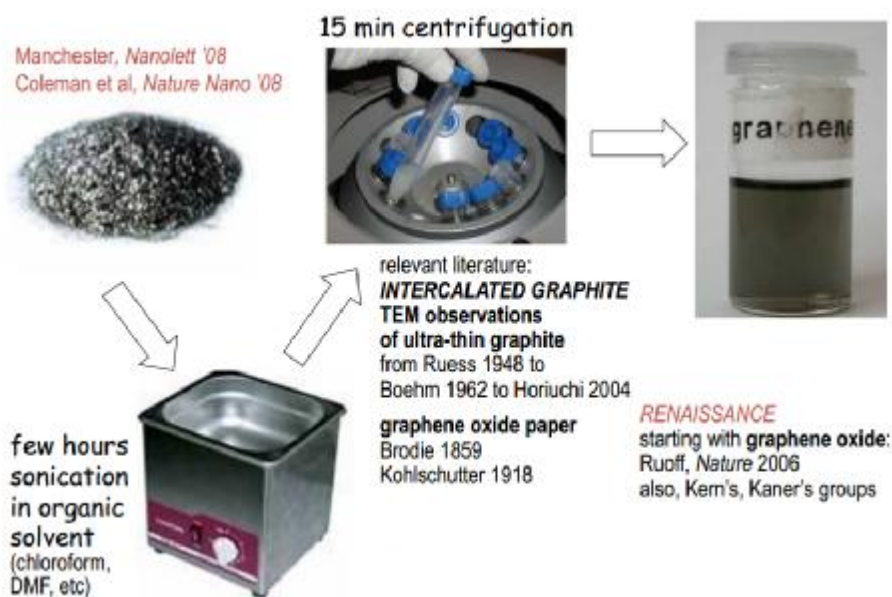
Είναι πολύ εντυπωσιακό ότι γεγονός , ότι το γραφένιο μπορεί να επιτύχει υψηλή οπτική μετάδοση μέσα από ένα φύλλο, αντίστασης 6 kΩ . Προσθέτοντας στρώμα πολυβινυλικής αλκοόλης , η οποία έχει την

τάση μειώνει την αντίσταση στα 400 Ω . Περαιτέρω πρόσθεση χημικών στοιχείων μπορεί να μειώσει την αντίσταση φύλλου έως και τα 50 Ω . Αντίθετα , ένα ηλεκτρόδιο από ΙΤΟ , όταν γίνεται αρκετά λεπτό για να ισοσταθμίσει τη διαφάνεια του γραφενίου , ανεβάζει στα ύψη την αντίσταση κάθε φύλλου .

Το ένα μειονέκτημα του γραφενίου είναι ότι , στο παρελθόν , ήταν δύσκολο να παραχθεί . Η μηχανική αποφλοιώση μπορεί να παράγει μόνο λίγες νιφάδες σε ένα μεγάλο χρονικό διάστημα , και συνεπώς θεωρείται απίθανο να χρησιμοποιηθεί για εμπορικούς σκοπούς. Ωστόσο , η ομάδα του Geim έχει αναπτύξει μια νέα μέθοδο παραγωγής που μπορούν να αποκομίσουν μεγαλύτερες ποσότητες .

Αρχίζουν με την τοποθέτηση κρυστάλλων γραφίτη σε ένα υγρό διμεθυλοφορμαμίδιου (DMF) και στη συνέχεια υποβάλλοντάς τα σε υπερήχους για πάνω από τρεις ώρες. Ο γραφίτη είναι υδρόφοβο υλικό που σημαίνει ότι έχει την τάση να κολλάει στο νερό, αλλά σε DMF η υπερήχηση επιτρέπει τη « διάλυση » σε νιφάδες του μίγματος. Στη συνέχεια, οι ερευνητές , τοποθετούν σε φυγόκεντρο το μίγμα για 10 λεπτά ενός απομάκρυνση μεγάλων νιφάδων από ενός νιφάδες που αποτελούνται από μονές στοιβάδες γραφενίου. Τέλος , τοποθετούν αυτές ενός νιφάδες γραφενίου για δύο ώρες ενός 250 ° C μέσα σε υδρογόνο και αέριο αργόν [17].

Το τελικό αποτέλεσμα, είναι να παράγονται νιφάδες μεταξύ ενός και τεσσάρων στρωμάτων γραφενίου Παρόλα αυτά οι οπτικές ιδιότητες ταιριάζουν με εκείνες του γραφενίου που παράγεται από μικρομηχανική διάσπαση . Η διαδικασία φαίνεται στην εικόνα 3.1:



Εικόνα 3.1: Η διαδικασία παραγωγής γραφενίου με τη χρήση διαλύματος DMF

### 3.2 Φωτοβολταικά από γραφένιο

Οι εξελίξεις στην έρευνα γραφενίου έχουν οδηγήσει σε πολυάριθμες θεμελιώδεις ανακαλύψεις . Σε αυτό το δυσδιάστατο υλικό, οι φορείς φορτίου μπορούν να μιμηθούν σχετικιστικά σωματίδια μηδενικής μάζας με αποτέλεσμα την υψηλή κινητικότητα των φορέων στο εσωτερικό του. Δεν είναι όμως αναγνωρισμένο ως ένα από τα ισχυρότερα υλικά, αλλά είναι επίσης εξοπλισμένο με μοναδικές ιδιότητες μόνο αναγνωριστεί ως ένα από τα ισχυρότερα υλικά , 28 αλλά είναι επίσης εξοπλισμένο με μοναδικές ιδιότητες που κυμαίνονται όπως η υψηλή θερμική αγωγιμότητα , και υψηλή οπτική διαπερατότητα. Ως εκ τούτου, έχει προκαλέσει το ενδιαφέρον σε νανοσύνθετες εφαρμογές με βάση από γραφένιο, όπου περιλαμβάνονται τα φωτοβολταϊκά συστήματα .

Υλικά με βάση το γραφένιο, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη κατασκευή ηλιακών συλλεκτών, λόγω της μεγάλης ευκινησίας των φορέων στο εσωτερικό του γραφενίου. Μέχρι σήμερα, το πιο διαδεδομένο υλικό για τη κατασκευή φωτοβολταϊκών , είναι το πυρίτιο, ωστόσο αναμένεται να εκτοπιστεί από το γραφένιο , το υπερ-υλικό που βρίσκει μέρα με τη μέρα όλο και περισσότερες εφαρμογές, ενώ υπόσχεται υψηλή αποδοτικότητα κατά την μετατροπή του φωτός (φωτόνια) σε ηλεκτρικό ρεύμα (ηλεκτρόνια). Συγκεκριμένα, οι φωτοβολταϊκές κυψέλες από γραφένιο διατηρούν την υψηλή τους αγωγιμότητα και παραμένουν διάφανες: όλα αυτά με κόστος κατασκευής συγκριτικά χαμηλό και χρήση μη τοξικών υλικών [23].

Τα συμβατικά υλικά που μετατρέπουν το φως σε ηλεκτρικό ρεύμα, όπως το πυρίτιο, μετατρέπουν ένα μόνο ηλεκτρόνιο για κάθε φωτόνιο που απορροφάται.

Ένα φωτόνιο περιέχει πολλή περισσότερη ενέργεια από αυτή που μπορεί να μεταφέρει ένα ηλεκτρόνιο κατά τη κίνησή του. Όμως , μεγάλο μέρος από την ενέργεια που περιέχεται στο εισερχόμενο φως χάνεται με τη μορφή θερμότητας.

Για τη μελέτη του γραφενίου για τη κατασκευή φωτοβολταϊκών, οι επιστήμονες τοποθέτησαν γραφένιο σε ένα λεπτό φύλλο χαλκού το οποίο

στη συνέχεια μετέφεραν σε ένα γυάλινο υπόστρωμα. Στο τέλος επικάλυψαν την κατασκευή τους με ένα λεπτό φύλλο πυριτίου και το χρησιμοποίησαν ως στρώμα επαφής σε δύο συμβατικές εκδοχές φωτοβολταϊκής κυψέλης με βάση το πυρίτιο: η πρώτη με βάση άμορφο πυρίτιο και η δεύτερη με βάση το πολυκρυσταλλικό πυρίτιο [23].

Στην πρώτη περίπτωση παρότι η μορφολογία του ανώτατου στρώματος μεταβλήθηκε όταν δέχτηκε την ηλιακή ακτινοβολία, το γραφένιο παρέμεινε ανιχνεύσιμο.

Επιπλέον, οι συσκευές με στρώμα γραφενίου έδειξαν υψηλότερη κινητικότητα ηλεκτρικά φορτισμένων ηλεκτρονίων σε σύγκριση με τις συμβατικές που βασίζονται στο οξείδιο του ψευδαργύρου σε ποσοστό 30%.

Νέα έρευνα, απέδειξε ότι όταν το γραφένιο απορροφά ένα φωτόνιο από το προσπίπτον φως, παράγει πολλαπλά ηλεκτρόνια ικανά να δημιουργήσουν ρεύμα. Αυτό σημαίνει ότι αν κατασκευαστούν, συσκευές στηριζόμενες στο γραφένιο για τη μετατροπή του φωτός σε ηλεκτρικό ρεύμα θα είναι πολύ πιο αποδοτικές από τις υφιστάμενες τεχνολογίες. Η αποδοτικότητα μπορεί να φτάσει και το 60%, ανοίγοντας στο δρόμο για τα φωτοβολταϊκά τρίτης γενιάς [23].

Ερευνητές του Ινστιτούτου Τεχνολογίας της Μασσαχουσέτης ανέπτυξαν ένα φωτοβολταϊκό το οποίο καλύπτει τις παραπάνω προϋποθέσεις και επιπλέον είναι διάφανο. Η νέα ηλιακή κυψέλη βασίζεται σε στρώσεις του εύκαμπτου υλικού γραφενίου επικαλυμμένες από ένα στρώμα νανοκαλωδίων.

Για να ανταπεξέλθει σε τυχόν προβλήματα, η ερευνητική ομάδα χρησιμοποιεί μια σειρά επικαλύψεων από πολυμερή ώστε το γραφένιο να επικολληθεί σε ένα στρώμα οξειδίου του ψευδαργύρου και στη συνέχεια επιστρώνει ένα υλικό που αντιδρά στην ηλιακή ακτινοβολία. Τα υλικά αυτά περιλαμβάνουν κβαντικές κουκκίδες θείουχου μόλυβδου και ένα πολυμερές με τον χημικό τύπο P3HT. Τα καλύτερα αποτελέσματα με απόδοση 4,2% επιτεύχθηκαν από τις κβαντικές κουκκίδες [23].

Στόχος των επιστημόνων είναι να κατασκευάσουν τα εν λόγω φωτοβολταϊκά σε μεγάλη κλίμακα ώστε να περιοριστούν τα κόστη και να προχωρήσει η εμπορική τους εκμετάλλευση.

Υψηλές αποδόσεις έχουν επιτευχθεί σε χρήση διαλύματος περοβσκίτη σαν βάση των ηλιακών κυττάρων σε συνδιασμό με νανοσωματίδια  $\text{TiO}_2$  (διοξείδιο του τιτανίου) έχουν επιτευχθεί χρησιμοποιώντας ένα στρώμα συλλογής ηλεκτρονίων που απαιτεί θερμοκρασία  $500^\circ\text{C}$  για τη τοποθέτησή του. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, το κόστος της διαδικασίας να είναι ιδιέτερα ανεβασμένο. Σύμφωνα με τα όσα αναφέραμε παραπάνω, μια οικονομικότερη λύση είναι η διαδικασία εναπόθεσης σύνθετων υλικών γραφενίου. Τα υλικά αυτά επιτρέπουν, ολόκληρη η συσκευή να κατασκευαστεί σε θερμοκρασίες μικρότερες των  $150^\circ\text{C}$  [23].

Αυτά τα ηλιακά κύτταρα παρουσιάζουν απόδοση στο 15,6%. Το έργο αυτό αποδεικνύει ότι νανοςύνθετα υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανάπτυξη φθηνότερων και αποδοτικότερων φωτοβολταϊκών συστημάτων.

### 3.3 Το γραφένιο στις τηλεπικοινωνίες

Η ορολογία «γρήγορο Ίντερνετ» συνδέθηκε με τη νέα τεχνολογία ADSL, που εξαπλώθηκε τα τελευταία χρόνια σε σπίτια και γραφεία, όμως το νέο και πολλά υποσχόμενο υλικό γραφένιο φιλοδοξεί να φέρει μια νέα επανάσταση, κάνοντας τις συνδέσεις του διαδικτύου δεκάδες φορές ακόμα πιο γρήγορες από ό,τι είναι σήμερα.

Μια ομάδα ερευνητών των βρετανικών πανεπιστημίων Μάντσεστερ και Κέμπριτζ, η οποία περιλαμβάνει τους νομπελίστες καθηγητές Αντρέ Γεϊμ και Κονσταντίν Νοβόσελον, ανακάλυψαν ένα τρόπο να βελτιώνουν τις συσκευές από γραφένιο έτσι ώστε να χρησιμοποιούνται ως φωτο-ανιχνευτές σε μελλοντικές οπτικές τηλεπικοινωνίες πολύ υψηλής ταχύτητας.

Συνδυάζοντας το γραφένιο με μεταλλικές νανοδομές, οι επιστήμονες πέτυχαν να αυξήσουν μέχρι 20 φορές την ανίχνευση του φωτός από το γραφένιο, πράγμα που ανοίγει το δρόμο για νέα μεγάλα άλματα στις ταχύτητες του διαδικτύου και άλλων μορφών επικοινωνιών. Οι συσκευές γραφενίου, με περαιτέρω βελτιώσεις, θα μπορούσαν να καταστήσουν εφικτές συνδέσεις Ίντερνετ όχι μόνο μερικές δεκάδες, αλλά εκατοντάδες φορές πιο γρήγορες σε σχέση ακόμα και με τα πιο γρήγορα σημερινά



οπτικά καλώδια, χάρη στις μοναδικές ιδιότητες των ηλεκτρονίων του γραφένιου (έχουν υψηλή κινητικότητα και ταχύτητα).

Το βασικό πρόβλημα ως τώρα, που εμπόδιζε την πρακτική αξιοποίηση του γραφένιου στις τηλεπικοινωνίες, ήταν η χαμηλή αποδοτικότητά του, καθώς το γραφένιο -το πιο λεπτό υλικό στον κόσμο- απορροφά πολύ λίγο φως (περίπου το 3% της συνολικής ποσότητας που πέφτει πάνω του), ενώ το υπόλοιπο διατρέχει το υλικό, χωρίς να παράγει ηλεκτρικό ρεύμα. Τοποθετώντας όμως δύο μεταλλικά σύρματα πάνω σε γραφένιο και ρίχνοντας φως πάνω σε αυτή τη δομή, οι ερευνητές έδειξαν ότι δημιουργείται επαρκής ηλεκτρική ενέργεια.

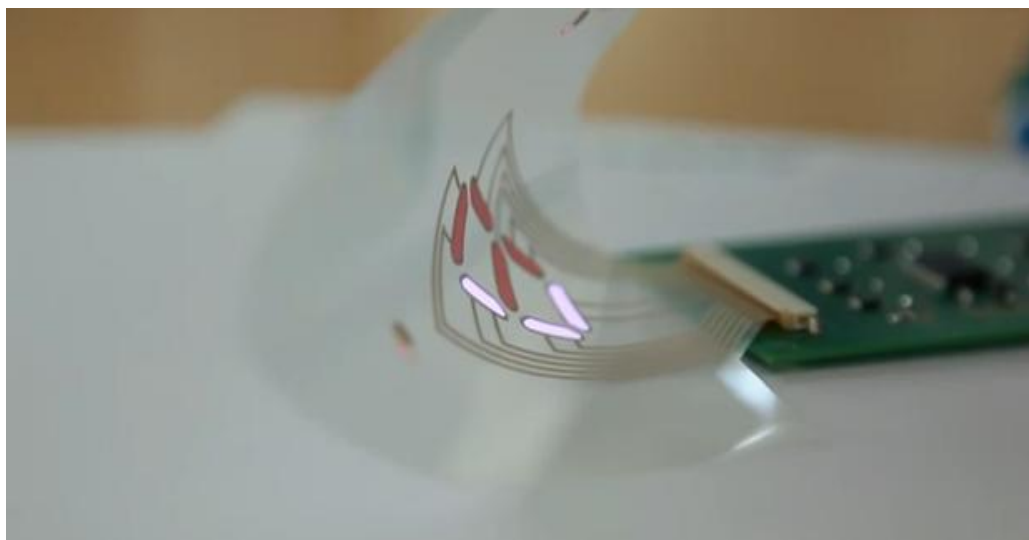
Οι δύο νομπελίστες και οι συνεργάτες τους -χάρη στις λεγόμενες «πλασμονικές νανοδομές»- κατάφεραν να βελτιώσουν δραστικά το οπτικό ηλεκτρικό πεδίο στο γραφένιο και να συγκεντρώσουν αποδοτικά το φως μέσα στο δισδιάστατο μονό στρώμα (μεμβράνη) άνθρακα πάχους μόλις ενός ατόμου, σε εξαγωνική διάταξη, που είναι το γραφένιο. Όπως δήλωσε ο Novoselov, η τεχνολογία παραγωγής γραφένιου ωριμάζει πλέον με ταχύ ρυθμό, πράγμα που διευρύνει τη γκάμα των πιθανών μελλοντικών εφαρμογών του. Ήδη πολλές κορυφαίες εταιρίες ηλεκτρονικών θεωρούν το γραφένιο το ιδανικό υλικό για την επόμενη γενιά συσκευών, στο πεδίο της φωτονικής και της οπτοηλεκτρονικής, χάρη στον ιδανικό συνδυασμό οπτικών και ηλεκτρονικών ιδιοτήτων που προσφέρει.

### **3.4 Κυκλώματα γραφένιου κατευθείαν από τον εκτυπωτή**

Μια νέα ηλεκτρονική μελάνη με δυνατότητα εύκολης εκτύπωσης σε διάφορες επιφάνειες με μηδαμινό κόστος, ανέπτυξαν βρετανοί ερευνητές από το Πανεπιστήμιο του Κέιμπριτζ.

Με βάση το γραφένιο, η αγώγιμη μελάνη χρησιμοποιήθηκε από τους ειδικούς για τη δημιουργία ενός μικρού πλαστικού πληκτρολογίου, με ιδιότητες... πιάνου. Το υλικό πάχους μόλις ενός ατόμου, σύμφωνα με τους ίδιους, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί επιτυχώς για την εκτύπωση οικονομικών ηλεκτρονικών κυκλωμάτων.

Με τη βοήθεια αυτού του υλικού, θα μπορούσαν να εκτυπωθούν ηλεκτρονικά κυκλώματα απευθείας επάνω σε υφάσματα και ρούχα, π.χ. για την παρακολούθηση της υγείας ασθενών, ή σε αποσκευές για την παρακολούθηση της ταξιδιωτικής τους «πορείας». Στην Εικόνα 3.3 φαίνεται ένα τέτοιο τυπωμένο κύκλωμα πάνω σε πλαστική μεμβράνη.



*Εικόνα 3.3: Κύκλωμα τυπωμένο με μελάνη γραφένιου πάνω σε πλαστική μεμβράνη συνδεδεμένο πάνω σε πλακέτα. Το τελικό αποτέλεσμα της παραπάνω συνδεσμολογίας είναι η παρουσίαση ακέραιων μονοψήφιων αριθμών πάνω στη πλαστική μεμβράνη.*

Μέχρι τώρα, προηγούμενα αγώγιμα μελάνια περιείχαν πολύτιμα μέταλλα, γεγονός που εκτόξευε το κόστος της όλης διαδικασίας της εκτύπωσής τους στα ύψη. Το γραφένιο που χρησιμοποίησαν οι βρετανοί επιστήμονες πέρα από οικονομικό και ιδιαίτερα αποδοτικό, είναι περιβαλλοντικά σταθερό, γεγονός που σημαίνει ότι δεν απαιτεί οποιαδήποτε περαιτέρω επεξεργασία μετά την εκτύπωσή του.

Το ηλεκτρονικό πιάνο (Εικόνα 3.3) , που σχεδίασαν οι ειδικοί από το Τμήμα Ηλεκτρικής Μηχανικής σε συνεργασία με τους ειδικούς της εταιρείας Novalia Limited, αποκαλύπτει τις λειτουργικές δυνατότητες της νέας μελάνης. Τα ηλεκτρονικά πλήκτρα του πιάνου εκτυπώθηκαν επάνω σε πλαστική διαφάνεια και σε ρόλο ηλεκτροδίων, συνδέονται με ένα απλό ηλεκτρονικό κύκλωμα, με μια μπαταρία και ένα ηχείο. Όταν ο χρήστης αγγίζει το ηλεκτρόδιο από γραφένιο, το ηλεκτρικό φορτίο του πλήκτρου αλλάζει. Η αλλαγή αυτή ανιχνεύεται και μεταβιβάζεται από το κύκλωμα στο ηχείο, εκπέμποντας τον ήχο της νότας.

Η ίδια ερευνητική ομάδα, σε συνεργασία με την εταιρεία Printed Electronics Limited, έχει επίσης αναπτύξει μια εύκαμπτη ψηφιακή οθόνη, με τη βοήθεια συμβατικών μέσων εκτύπωσης και μιας διάφανης και αγωγίμης επίστρωσης γραφενίου στο επάνω μέρος.



*Εικόνα 3.4 : Το ηλεκτρονικό πιάνο από γραφένιο*

Η τεχνολογία παραγωγής ηλεκτρονικών εξαρτημάτων μέσω εκτύπωσης δεν είναι καινούργια αλλά μέχρι σήμερα χρησιμοποιούνταν μελάνια από μεταλλικά νανοσωματίδια. Όμως αυτά τα εξαρτήματα οξειδώνονταν μετά από 1-2 έτη και δεν έχουν αποδοτικότητα ανάλογη με εκείνη των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων από πυρίτιο.

Η νέα μέθοδος με τη χρήση του γραφενίου θα φέρει σύμφωνα με τους ειδικούς επανάσταση αφού τα τυπωμένα ηλεκτρονικά εξαρτήματα (π.χ τρανζίστορ) από γραφένιο είναι πιο ελαφρά, περισσότερο αγωγίμα, μεγαλύτερης σταθερότητας, αξιοπιστίας και χαμηλότερου κόστους από τα υπόλοιπα.

Οι εφαρμογές που μπορεί να προκύψουν από αυτή την εξέλιξη είναι πολλές. Μπορούν να παραχθούν εύκολα «φορητοί» υπολογιστές, ενσωματωμένοι στα ρούχα, καθώς και διάφορες εύκαμπτες, διάφανες συσκευές.

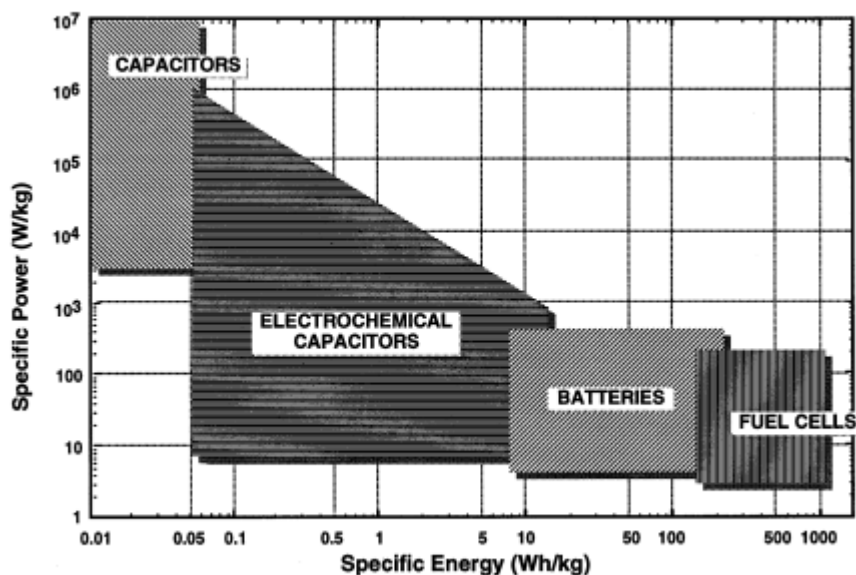
### 3.5 Υπέρ-πυκνωτές γραφενίου

Οι επιστήμονες έχουν αγωνίζονται να αναπτύξουν λύσεις αποθήκευσης ενέργειας, όπως μπαταρίες και πυκνωτές που μπορεί να συμβαδίσει με τον τρέχοντα ρυθμό εξέλιξης ηλεκτρονικών εξαρτημάτων για μια σειρά ετών. Δυστυχώς, η κατάσταση στην οποία βρισκόμαστε τώρα είναι ότι, ενώ είμαστε σε θέση να αποθηκεύουν μεγάλη ποσότητα ενέργειας σε ορισμένους τύπους μπαταριών, οι εν λόγω μπαταρίες είναι πολύ μεγάλες, πολύ βαριά, απελευθερώνουν την ενέργειά τους πολύ αργά. Στη εικόνα 3.5 παρουσιάζεται μια σύγκριση μεταξύ των συσκευών αποθήκευσης ενέργειας [26].

Πυκνωτές, από την άλλη πλευρά, είναι σε θέση να απελευθερώσουν ενέργεια πολύ γρήγορα, αλλά μπορούν να αποθηκεύσουν πολύ λιγότερη ενέργεια από μια μπαταρία. Εφαρμογές με βάση το γραφένιο μπορούν να οδηγήσουν σε νέους τρόπους για την αποθήκευση της ενέργειας, με υψηλό αποθηκευμένο φορτίο. Η λύση, βρίσκεται στους υπερπυκνωτές.

Για να καταλάβουμε τι είναι οι υπερπυκνωτές, είναι απαραίτητο να αναφέρουμε μερικά λόγια για τους κοινούς πυκνωτές. Οι πρώτοι πυκνωτές κατασκευάστηκαν στα μέσα της δεκαετίας του 1800 από τον Michael Faraday, όπου αναφέρονται ως "συμπυκνωτές". Οι συσκευές αυτές είχαν την ικανότητα να αποθηκεύουν ηλεκτρικό φορτίο, και ως εκ τούτου, τελικά κατέληξε να είναι γνωστό ως πυκνωτές. Ένας απλός πυκνωτής αποτελείται μόνο από τρία μέρη: δύο μεταλλικά ηλεκτρόδια (π.χ.: αλουμίνιο) και ένα διηλεκτρικό διαχωριστή (πολυαιθυλένιο).

Το ηλεκτρόδιο που είναι συνδεδεμένο με το θετικό ακροδέκτη της μπαταρίας είναι γνωστός ως η άνοδος, και το ηλεκτρόδιο που συνδέεται με τον αρνητικό ακροδέκτη της μπαταρίας είναι γνωστός ως η κάθοδος.



Εικόνα 3.5: Σύγκριση των συσκευών αποθήκευσης ενέργειας [26]

Όταν η μπαταρία είναι συνδεδεμένη με τον πυκνωτή , ηλεκτρικό φορτίο ρέει από το μπαταρία μέσα στον πυκνωτή , αλλά όχι μέσα από αυτό . Αντί να διέρχεται από το ηλεκτρόδια , τα φορτία συσσωρεύονται στα ηλεκτρόδια .

Οι υπερπυκνωτές , είναι γνωστοί και ως ηλεκτροχημικοί πυκνωτές ή υπερπυκνωτές. Μπορούν να ξεπεράσουν ορισμένα από τα όρια των μπαταριών , αλλά γενικά δεν μπορούν να τις αντικαταστήσουν ολοκληρωτικά . Μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ορισμένες εφαρμογές όπου αποτυγχάνουν οι μπαταρίες, καθώς επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως συμπληρώματα για τις ηλεκτρονικές διατάξεις.

Οι υπερπυκνωτές, είναι παρόμοιοι κατ 'αρχήν με τους απλούς πυκνωτές , αλλά χρησιμοποιούν ένα διαφορετικό μηχανισμό για την αποθήκευση φορτίου . Αντί για την αποθήκευση σε διηλεκτρικά υλικά με αποτέλεσμα την επιβάρυνσή τους , οι υπερπυκνωτές χρησιμοποιούν ιόντα ηλεκτρολυτών , που προκαλούν αποθήκευση φορτίου σε ηλεκτρικά διπλά στρώματα .

Μια υποκατηγορία των υπερπυκνωτών , που ονομάζονται ψευδοπυκνωτές , εκμεταλλεύεται έναν διαφορετικό μηχανισμό για τη φόρτιση , την αποθήκευση μέσω χημικών αντιδράσεων στην άνοδο. Η άλλη υποκατηγορία υπερπυκνωτών είναι ηλεκτροχημικοί πυκνωτές διπλού στρώματος ( EDLC ) , οι οποίες χρησιμοποιούν σχεδόν εξ ολοκλήρου αποθήκευση φορτίου διπλού στρώματος . Σε γενικές γραμμές , η απόδοση των υπερπυκνωτών εξαρτάται πλέον σε μεγάλο βαθμό από την τεχνολογία των υλικών που χρησιμοποιούνται για τα ηλεκτρόδια .Μία από τις πολλές πιθανές εφαρμογές του γραφενίου είναι σε υλικά για τη κατασκευή ηλεκτροδίων των υπερπυκνωτών .

Όσον αφορά τους υπερπυκνωτές, μέχρι στιγμής, το πιο κοινό στοιχείο που χρησιμοποιείται για υπερπυκνωτές είναι ο άνθρακας. Σχεδόν όλοι οι εμπορικοί υπερπυκνωτές χρησιμοποιούν ηλεκτρόδια που βασίζονται σε ανθρακικά υλικά, λόγω του σχετικά χαμηλού κόστους του. Κατά την τελευταία δεκαετία, πολλές προσπάθειες έχουν γίνει να χρησιμοποιηθούν άλλες, πιο προηγμένες μορφές άνθρακα για την κατασκευή ηλεκτροδίων υπερπυκνωτών. Έτσι, οι έρευνες έχουν στραφεί προς τους νανοσωλήνες άνθρακα.

Αντίθετα από τις μπαταρίες αυτές, ο υπέρ-πυκνωτής μπορεί να φορτιστεί ή να εκφορτιστεί σε μερικά λεπτά ή ακόμα και σε μερικά δευτερόλεπτα. Η νέα συσκευή έχει μια συγκεκριμένη ενεργειακή πυκνότητα 85.6 Wh/kg στη θερμοκρασία δωματίου και 136 Wh/kg στους 80 °C. Αυτές είναι οι

υψηλότερες τιμές για ένα διπλού στρώματος υπέρ-πυκνωτή βασισμένο σε νάνο-υλικά από άνθρακα.

Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό γνώρισμα των υπέρ-πυκνωτών είναι ότι υπάρχει ένα εξαιρετικά στενό χάσμα μεταξύ των ηλεκτροδίων. Αυτό σημαίνει ότι ένα μεγάλο ποσό ηλεκτρικού φορτίου μπορεί να αποθηκευτεί σε έναν πολύ μικρό σχεδόν μικροσκοπικό όγκο.

Αυτή η νέα τεχνολογία χρησιμεύει για μια ενεργειακή συσκευή αποθήκευσης που αποθηκεύει σχεδόν τόσο ενέργεια όσο και μια μπαταρία αλλά που μπορεί να επαναφορτιστεί σε μερικά λεπτά ή δευτερόλεπτα

Η συσκευή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να επαναφορτίσει, κινητά τηλέφωνα, ψηφιακές κάμερα και μικροϋπολογιστής. Η ομάδα που περιλαμβάνει τους επιστήμονες της Angstrom Materials στις ΗΠΑ και το Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο Dalian στην Κίνα, δουλεύει τώρα σκληρά για να βελτιώσει περαιτέρω την ενεργειακή πυκνότητα της συσκευής. Στόχος των ερευνητών, είναι να καταφέρουν να κατασκευάσουν υπερ-πυκνωτή που να αποθηκεύει τόση ενέργεια όση υπάρχει και στις μπαταρίες λιθίου-ιόντων μέσα σε λιγότερο από δύο λεπτά.

Βέβαια οι πραγματικές συσκευές υπολείπονται ακόμα των θεωρητικών τιμών της χωρητικότητας των 550 F/g. Παρά το θεωρητικά υψηλό συντελεστή επιφάνειας ανά μάζας του γραφένιου, ένας υπέρ-πυκνωτής των 550 F/g δεν έχει επιτευχθεί σε μια πραγματική συσκευή και αυτό γιατί τα φύλλα γραφένιου τείνουν να κολλήσουν μεταξύ τους. Οι επιστήμονες, προσπαθούν να υπερνικήσουν αυτό το πρόβλημα , με την ανάπτυξη μιας στρατηγικής που αποτρέπει τα φύλλα του γραφένιου να κολλήσουν το ένα με το άλλο. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί εάν κυρτά φύλλα γραφένιου χρησιμοποιηθούν αντί των επιπέδων.

Ένας μεταπτυχιακός φοιτητής χρησιμοποίησε μια συσκευή εγγραφής DVD (LightScribe DVD burner ) για να κάνει γραφένιο σε ένα εργαστήριο χημείας που διευθύνεται από τον Ric Kaner, καθηγητή στο Πανεπιστήμιο της Καλιφόρνια, Λος Άντζελες. Η τεχνολογία LightScribe ήταν το χρήσιμο χαρακτηριστικό γιατί χαράζει εικόνες πάνω στην επιφάνεια του DVD. Αποδεικνύεται ότι το λέιζερ μετατρέπει επίσης ένα κοινό υλικό, οξείδιο του γραφίτη, σε φύλλα γραφένιου.

Το λέιζερ παράγει γραφένιο με ένα χαρακτηριστικό που το καθιστά ιδιαίτερα ελπιδοφόρο για τους υπερπυκνωτές: Προκύπτει από οπές ή

πόρους. Στο εξαιρετικά πορώδες γραφένιο μπορούν να στοιβάζονται πολλά στρώματα σε βάθος, ενώ και οι δύο πλευρές του κάθε στρώματος εξακολουθούν να είναι προσιτές. Σε πειράματα, που γίνονται με γραφένιο, έχει διπλασιαστεί ή τριπλασιαστεί η ενεργειακή πυκνότητα των υπερπυκνωτών.

Το πλεονέκτημα αυτής της διαδικασίας είναι η παραγωγή υπέρ-πυκνωτών γραφενίου σε μεγάλες επιφάνειες και σε κόστος που αντιστοιχεί σε ένα πολύ μικρό ποσοστό εκείνου της παραδοσιακής διαδικασίας, δηλαδή της λιθογραφίας. Η λιθογραφία έχει αποδειχθεί εξαιρετικά δαπανηρή, με αποτέλεσμα να είναι σχεδόν απαγορευτική. Με τον τρόπο αυτόν, καταφέραμε να κατασκευάσουμε περισσότερους μικροσκοπικούς υπέρ-πυκνωτές επάνω σε ένα δισκάκι σε λιγότερο από 30 λεπτά και χρησιμοποιώντας οικονομικά υλικά.

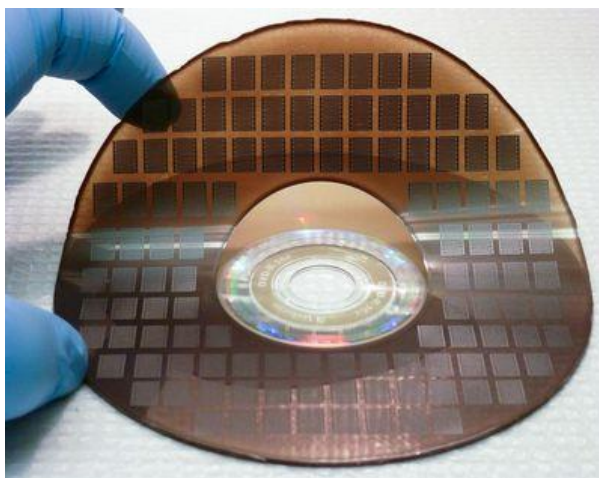
Το λείζερ παράγει γραφένιο με ένα χαρακτηριστικό που το καθιστά ιδιαίτερα ελπιδοφόρο για τους υπερπυκνωτές: προκύπτει από οπές ή πόρους. Στο εξαιρετικά πορώδες γραφένιο μπορούν να στοιβάζονται πολλά στρώματα σε βάθος, ενώ και οι δύο πλευρές του κάθε στρώματος εξακολουθούν να είναι προσιτές. Σε πειράματα, που γίνονται με γραφένιο, έχει διπλασιαστεί ή τριπλασιαστεί η ενεργειακή πυκνότητα των υπέρ-πυκνωτών. Σύμφωνα με τον Ric Kaner, ένα στρώμα γραφενίου δεν αποθηκεύει πολλή ενέργεια. Γι'αυτό το λόγο προσπαθούν να τοποθετήσουν εκατοντάδες ή ακόμα και χιλιάδες στρώματα γραφενίου

Οι υπερ-πυκνωτές, είναι μια τεχνολογία που θα μπορέσει να εφαρμοστεί μέσα στα επόμενα δέκα χρόνια. Όμως, ακόμα και τότε, οι υπερ-πυκνωτές θα χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με τις μπαταρίες. Σε αντίθεση βέβαια με τις μπαταρίες, οι υπέρ-πυκνωτές δεν υπάρχει φόβος υπερθέρμανσής τους.

Τα πλεονεκτήματα της ασφάλειας των υπέρ-πυκνωτών θα αυξηθούν καθώς η ζήτηση για φορητές συσκευές ενέργειας αυξάνεται, δήλωσε ο . Οι πυκνωτές παρουσιάζουν τις δικές τους ανησυχίες για ασφάλεια, γιατί κάθε τεχνολογία που αποθηκεύει ενέργεια είναι δυνητικά επικίνδυνη. Ένα μειονέκτημα των υπέρ-πυκνωτών, είναι η ύπαρξη τοξικών και εύλεκτων ουσιών που παράγονται κατά τη κατασκευή τους. Ωστόσο, οι κατασκευαστές προχωρούν στη σταδιακή κατάργηση των τοξικών και εύφλεκτων χημικών ουσιών με αποτέλεσμα να μπορέσουν να επιτύχουν καλύτερες επιδόσεις από αυτές των μπαταριών ιόντων-λιθίου.

Εν τω μεταξύ, η ασφάλεια της μπαταρίας θα γίνει μεγαλύτερο θέμα διότι οι κυψέλες μεγαλώνουν, όπως αυτές που τώρα χρησιμοποιούνται στα

ηλεκτρικά οχήματα. Όσο μεγαλύτερη είναι η μπαταρία, τόσο πιο πιθανό είναι κάτι να πάει στραβά.



*Εικόνα 3.6 : Ένα DVD από το εργαστήριο του Ric Kaner με μικρο-υπερπυκνωτές [25].*

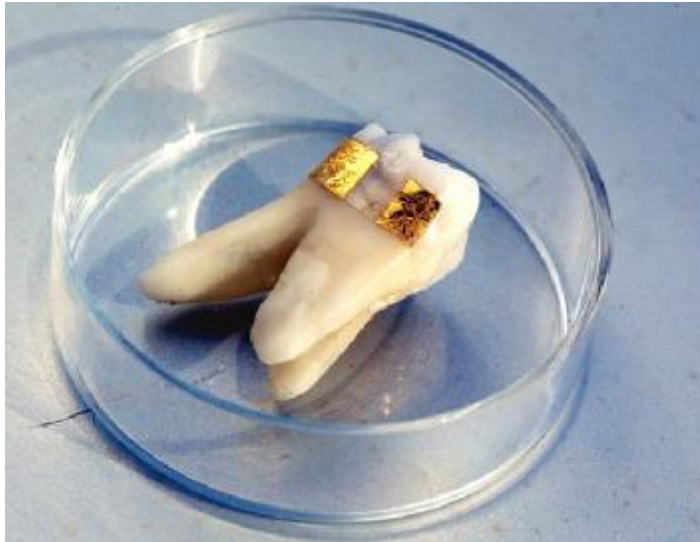
### **3.6 Τατουάζ δοντιού εναντίον λοιμώξεων**

Ένας μικροσκοπικός υπέρλεπτος αισθητήρας ο οποίος τοποθετείται ως τατουάζ επάνω στα δόντια μπορεί να αποτελέσει έναν πολύ καλό «συναγερμό» ανίχνευσης λοιμώξεων.

Ο αισθητήρας που είναι φτιαγμένος από γραφένιο, μπορεί να ανιχνεύσει βακτήρια και να μεταδώσει τις πληροφορίες σχετικά με την κατάσταση του οργανισμού στους γιατρούς του κάθε ασθενούς. Η επιφάνεια του γραφένιου είναι πολύ κολλώδης και άκρως ευαίσθητη. Επάνω σε αυτήν την επιφάνεια «εμφυτεύονται» προσεκτικά δομημένα πεπτίδια (αλληλουχίες αμινοξέων) τα οποία και αναγνωρίζουν τους βακτηριακούς εχθρούς του οργανισμού.

Σε πειράματα που διεξήγαγε η ερευνητική ομάδα, ο αισθητήρας τοποθετήθηκε επάνω στο δόντι μιας αγελάδας (Εικόνα 3.5). Ένας φοιτητής εξέπνευσε επάνω στον αισθητήρα και εκείνος «έπιασε στον αέρα» ίχνη βακτηρίων στην αναπνοή του.





*Εικόνα 3.5: Το «τατουάζ» γραφενίου πάνω σε δόντι*

Ο επικεφαλής των ερευνητών Michael MacAiren πιστεύει ότι αυτού του είδους οι αισθητήρες θα μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τους στρατιώτες στο πεδίο της μάχης προκειμένου να φαίνεται γρήγορα εάν ένα τραύμα έχει μολυνθεί ή ακόμη και στα νοσοκομεία όπου νοσηλεύονται ασθενείς με εξασθενημένο ανοσοποιητικό σύστημα οι οποίοι είναι άκρως ευάλωτοι στα βακτήρια.

### **3.7 Αφαλάτωση με τη χρήση γραφενίου**

Η Lockheed Martin, μια εταιρεία περισσότερο γνωστή για τα μαχητικά αεροπλάνα και τους πυραύλους που παράγει, υποστηρίζει τώρα ότι μπορεί να χρησιμοποιήσει το θαυματουργό υλικό γραφένιο για να μειώσει το κόστος και να αυξήσει την παραγωγή στις μονάδες αφαλάτωσης θαλασσινού νερού.

Η αφαλάτωση είναι σήμερα μια ακριβή διαδικασία που βασίζεται στην αρχή της αντίστροφης ώσμωσης: το θαλασσινό νερό διοχετεύεται υπό μεγάλη πίεση σε φίλτρα με μικροσκοπικούς πόρους, οι οποίοι αφήνουν το νερό να περάσει αλλά συγκρατούν τα ιόντα των αλάτων.

Η διαδικασία θα μπορούσε να γίνει πιο αποδοτική με τη χρήση του γραφενίου, ατόμων άνθρακα που διατάσσονται όλα στο ίδιο επίπεδο και σχηματίζουν έτσι ένα υπέρλεπτο, υπερανθεκτικό φύλλο. Η Lockheed

Martin υπολογίζει ότι η ενέργεια και η πίεση που απαιτείται προκειμένου να περάσουν τα άτομα νερού από τα φίλτρα αφαλάτωσης θα ήταν 100 φορές μικρότερη αν τα φίλτρα ήταν μεμβράνες γραφενίου με τρύπες διαμέτρου ενός νανόμετρου (ενός εκατομμυριοστού του χιλιοστού). Το γραφένιο «είναι 500 φορές πιο λεπτό από τα καλύτερα φίλτρα που κυκλοφορούν στη σημερινή αγορά. Είναι επίσης πιο γερό από το ατσάλι» επισήμανε στο Reuters ο Τζον Στέτσον, μηχανικός της Lockheed Martin.

Η εταιρεία θα έχει πρέπει πάντως να ξεπεράσει αρκετές τεχνικές προκλήσεις: το γραφένιο είναι σήμερα απαγορευτικά ακριβό για εμπορική χρήση, παράγεται σε μικρές μόνο ποσότητες, και επιπλέον η τεχνική που απαιτείται για τη δημιουργία των μικροσκοπικών οπών δεν έχει ακόμα τελειοποιηθεί.

Το πρωτότυπο ενός φίλτρου γραφενίου, το οποίο θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί και στις σημερινές εγκαταστάσεις αφαλάτωσης, θα είναι έτοιμο εντός του 2014-2015. Σύμφωνα με τον ΟΗΕ, περίπου 780 εκατομμύρια άνθρωποι εξακολουθούν σήμερα να μην έχουν πρόσβαση σε καθαρό, πόσιμο νερό.

### **3.8 Τσιπ υπολογιστών**

Τώρα, σε νέα μελέτη τους, που παρουσίασαν στο περιοδικό φυσικής «Nature Physics» οι δύο ρωσικής καταγωγής ερευνητές, μαζί με τον Λεονίντ Πονομαρένκο, για πρώτη φορά αναλύουν με ποιο τρόπο το γραφένιο θα μπορούσε να αξιοποιηθεί μέσα σε ηλεκτρονικά κυκλώματα για την παραγωγή νέου τύπου «τσιπ».

Μια ομάδα ερευνητών του αμερικανικού κολοσσού της πληροφορικής IBM, δημιούργησε ένα πρώτο κύκλωμα υψηλής ταχύτητας από γραφένιο, στο οποίο όλα τα στοιχεία είναι ολοκληρωμένα σε ένα μοναδικό «τσιπάκι».

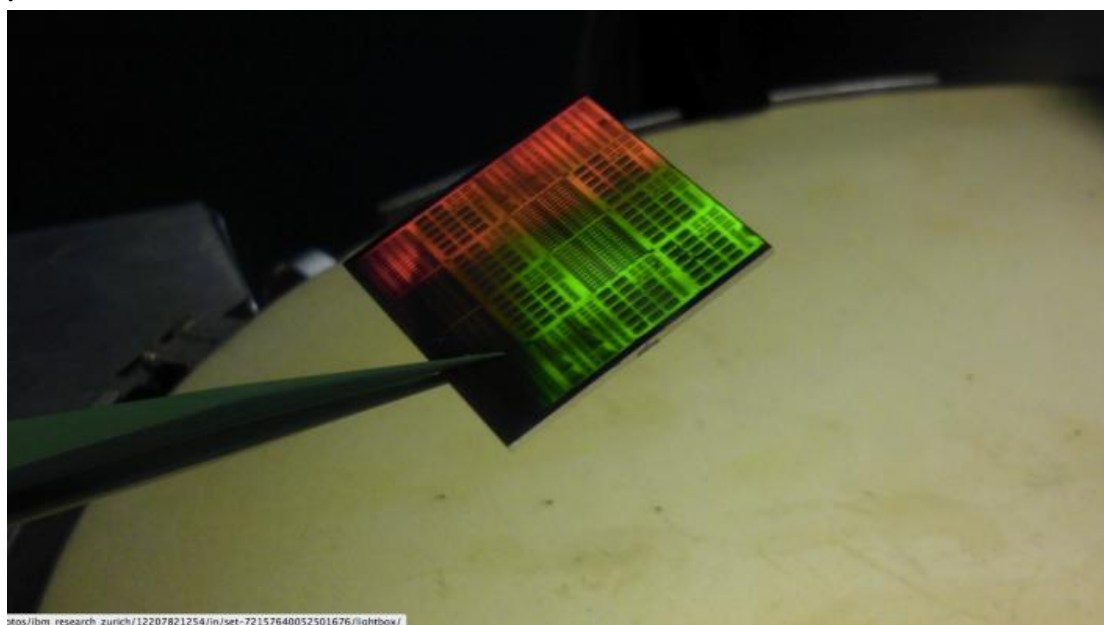
Πρόκειται για παγκόσμια πρωτοπορία, ένα σημαντικό βήμα για τη δημιουργία μιας νέας γενιάς ηλεκτρονικών βασισμένων στο γραφένιο και όχι στο πυρίτιο όπως μέχρι σήμερα, με δυνητικές εφαρμογές από τις ασύρματες επικοινωνίες μέχρι τους ενισχυτές.

Μέχρι τώρα όμως, τα ασύρματα κυκλώματα, σαν αυτά που περιέχονται στις συσκευές Bluetooth και Wi-Fi, δεν ήταν δυνατό να κατασκευαστούν με τρανζίστορ από γραφένιο, διότι είναι τεχνικά δύσκολο -επειδή το

γραφένιο παθαίνει ζημιές εύκολα - να συνδυαστούν στο ίδιο «τσιπάκι» τα ευαίσθητα τρανζίστορ γραφενίου με τα άλλα αναγκαία μεταλλικά εξαρτήματα ενός κυκλώματος, όπως οι αντιστάσεις και τα πηνία.

Αυτή η δυσκολία όμως πλέον ξεπεράστηκε με μια απλή αντιστροφή της συνήθους παραγωγικής διαδικασίας, δηλαδή πρώτα να τοποθετηθούν στο τσιπ τα μεταλλικά στοιχεία και μετά τα τρανζίστορ. Έτσι, οι ερευνητές του Κέντρου Ερευνών Watson της IBM στη Νέα Υόρκη δημιούργησαν το πιο εξελιγμένο και πλήρως λειτουργικό ολοκληρωμένο κύκλωμα (τσιπ) από γραφένιο, το οποίο έχει απόδοση 10.000 φορές καλύτερη από οποιαδήποτε άλλη σχετική προσπάθεια στο παρελθόν.

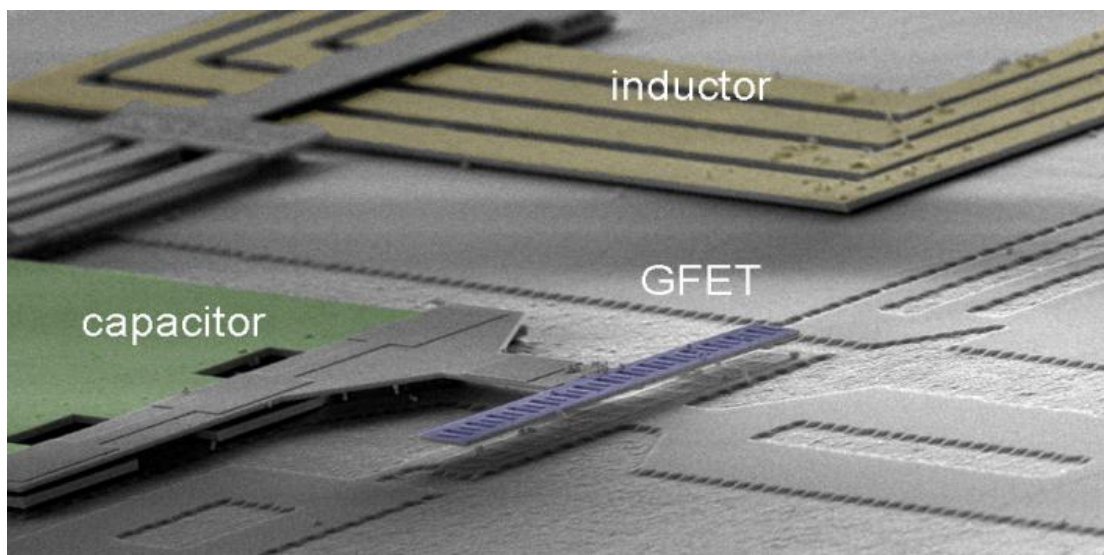
Η IBM Research έχει δημιουργήσει ένα τσιπ πυριτίου, σε ένα πρότυπο κομμάτι πυριτίου 200 χιλιοστών, χρησιμοποιώντας τη τυπική διαδικασία κατασκευής CMOS. Αυτό το τσιπ, το οποίο είναι ένας δέκτης ραδιοσυχνοτήτων (RF), είναι ακριβώς ένα κανονικό τσιπ, με αντιστάσεις, πυκνωτές, τρανζίστορ, εκτός από ένα κομμάτι: τα κανάλια του τρανζίστορ είναι κατασκευασμένα από γραφένιο (Εικόνα 3.6). Η λειτουργία του τσιπ είναι πολύ στοιχειώδης: Λαμβάνει και αποκαθιστά ασύρματα σήματα στο φάσμα 4.3GHz



*Εικόνα 3.6 : Ένα τσίπ γραφενίου που δοκιμάζεται από την IBM Research*

Το σήμα «I-B-M» (ψηφιακό κείμενο τριών γραμμάτων) μεταδόθηκε στη ραδιοσυχνότητα των 4,3 GHz χωρίς καμία απώλεια ή παραμόρφωση. Το ολοκληρωμένο κύκλωμα αποτελείται από τρία τρανζίστορ γραφενίου,

τέσσερα επαγωγικά πηνία, δύο πυκνωτές και δύο αντιστάσεις. Όλα αυτά τα συστατικά του «τσιπ» βρίσκονται σε μια έκταση 0,6 τετραγωνικών χιλιοστών. Επιπλέον, χάρη στην υψηλή αγωγιμότητα του γραφενίου, όπως αναφέραμε στις ηλεκτρονικές ιδιότητες, το νέο κύκλωμα χρησιμοποιεί λιγότερη ηλεκτρική ενέργεια από τα συμβατικά ραδιο-τσιπ.



*Εικόνα 3.7: Μια άποψη του ολοκληρωμένου κυκλώματος όπως φαίνεται μέσα από ένα ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης. Τα τρανζίστορ γραφενίου που βρίσκεται στη μωβ περιοχή [11]*

### 3.9 Παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας

Η υδροηλεκτρική ενέργεια είναι μια από τις παλαιότερες τεχνικές για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Πάνω από 150 χώρες που χρησιμοποιούν αυτή τη πηγή, ως ανανεώσιμη πηγή ενέργειας.

Οι υδροηλεκτρικές γεννήτριες λειτουργούν αποτελεσματικά μόνο σε μεγάλες κλίμακες, αν και σε μεγάλες κλίμακες υπάρχει ο κίνδυνος να διακοπεί η ροή του ποταμού και πιθανόν να βλάψει τα τοπικά οικοσυστήματα.

Κατά τα τελευταία έτη, οι επιστήμονες έχουν ερευνήσει την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με τη χρήση νανοδομών. Συγκεκριμένα, έχουν ασχοληθεί με τη παράγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση ιονικών υγρών-ένα υγρό με φορτισμένα ιόντα μέσα σε αυτό- που ωθούνται μέσω ενός συστήματος μέσω διαφοράς πίεσης. Ωστόσο, η ικανότητα συλλογής της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας έχει περιοριστεί επειδή απαιτεί διαφορά πίεσης για την οδήγηση του ιοντικού υγρού μέσω ενός μικρού σωλήνα. Αλλά οι επιστήμονες έχουν βρει τώρα ότι η μεταφορά μικρών

σταγονιδίων αλμυρού νερού με τη χρήση γραφενίου παράγει ηλεκτρική ενέργεια χωρίς την ανάγκη διαφοράς πίεσης.

Ερευνητές από την Κίνα ανέπτυξαν ένα στρώμα γραφενίου και τοποθέτησαν μια σταγόνα αλατόνερου σε αυτό. Στη συνέχεια έσυραν το σταγονίδιο σε όλο το στρώμα γραφενίου με διαφορετικές ταχύτητες και διαπίστωσαν ότι η διαδικασία αυτή δημιουργεί μία μικρή διαφορά τάσεως.

Εκτός του ότι είναι η πρώτη φορά που αποδεικνύεται αυτό το φαινόμενο, οι επιστήμονες βρήκαν μια γραμμική σχέση μεταξύ της ταχύτητας και της παραγόμενης ενέργειας. Όσο πιο γρήγορα έσυραν τα σταγονίδια σε όλη την επιφάνεια του γραφενίου, τόσο μεγαλύτερη είναι η τάση που δημιουργείται. Οι επιστήμονες επίσης διαπίστωσαν ότι η τάση αυξήθηκε όταν πολλαπλά σταγονίδια του ίδιου μεγέθους χρησιμοποιήθηκαν σε μία φορά.

Οι επιστήμονες εξέτασαν την κατανομή φορτίου των σταγονιδίων καθώς βρίσκονταν σε ακινησία πάνω στο φύλλο γραφενίου καθώς και σε κίνηση πάνω σε αυτό. Όταν το σταγονίδιο ήταν ακίνητο, η κατανομή ήταν συμμετρική και στις δύο πλευρές, αφήνοντας μια μηδενική διαφορά δυναμικού μεταξύ τους.

Ωστόσο, όταν η σταγόνα σύρθηκε σε όλη την επιφάνεια του γραφενίου, η κατανομή αυτή άλλαξε. Τα ηλεκτρόνια αποβάλλονται από το γραφένιο προς το ένα άκρο της σταγόνας και απορροφώνται από το γραφένιο στο άλλο άκρο, το οποίο οδηγεί στη δημιουργία μεγάλου δυναμικού στη μία πλευρά του σταγονιδίου και παράγει ένα μετρήσιμη τάση σε όλη το μήκος του [10].

Όλη αυτή η διαδικασία μπορεί να αποφέρει τη παραγωγή σημαντικής ποσότητας ηλεκτρική ενέργεια. Αυτή η διαδικασία μπορεί να αναβαθμιστεί με τη χρήση σταγονιδίων από χλωριούχο χαλκό και τη τοποθέτησή του σε μια επιφάνεια γραφενίου. Η επιφάνεια γέρνει προς τη μία πλευρά και το σταγονίδιο ρέει από το ένα άκρο στο άλλο με τη βοήθεια της βαρύτητας, με αποτέλεσμα την παραγωγή τάσης  $-30\text{mV}$  περίπου.

Η τάξη μεγέθους της παραγόμενης τάσης είναι μικρότερη από τις σημερινές υδροηλεκτρικές γεννήτριες. Βέβαια, οι νανογεννήτριες μπορούν να λειτουργήσουν σαν μικρές συσκευές, κάτι που δεν μπορούν να κάνουν τα υδροηλεκτρικά συστήματα [10].

### 3.10 Φωτοανιχνευτές

Οι ερευνητές απέδειξαν ότι το γραφένιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εφαρμογές τηλεπικοινωνιών και ότι η αδύναμη οπτική του απόκριση θα μπορούσε να μετατραπεί σε πλεονεκτήματα για ταχύες εφαρμογές στη φωτονική .

Διαπιστώθηκε ότι το γραφένιο θα μπορούσε να αξιοποιηθεί ως ένας απορροφητήρας με ευρεία οπτική απόκριση που κυμαίνεται από το υπεριώδες έως το υπέρυθρο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα Υπάρχει ένα πολύ ισχυρό ερευνητικό ενδιαφέρον για τη χρήση γραφενίου για εφαρμογές στην οπτοηλεκτρονική.

Η ιδέα των φωτοανιχνευτών με βάση το γραφένιο είχε συλληφθεί νωρίτερα και η καταλληλότητα του γραφενίου για φωτοανίχνευση υψηλού εύρους ζώνης έχει αποδειχθεί ότι είναι 10 Gbit / s δεδομένων [11] Μια νέα προσέγγιση βασίζεται στην ενσωμάτωση του γραφενίου σε οπτική μικροκυλότητα . Το αυξημένο πλάτος ηλεκτρικού πεδίου στο εσωτερικό της κοιλότητας δημιουργεί περισσότερη ενέργεια για να απορροφηθεί, οδηγώντας σε σημαντική αύξηση τη φωτοαπόκριση [12].

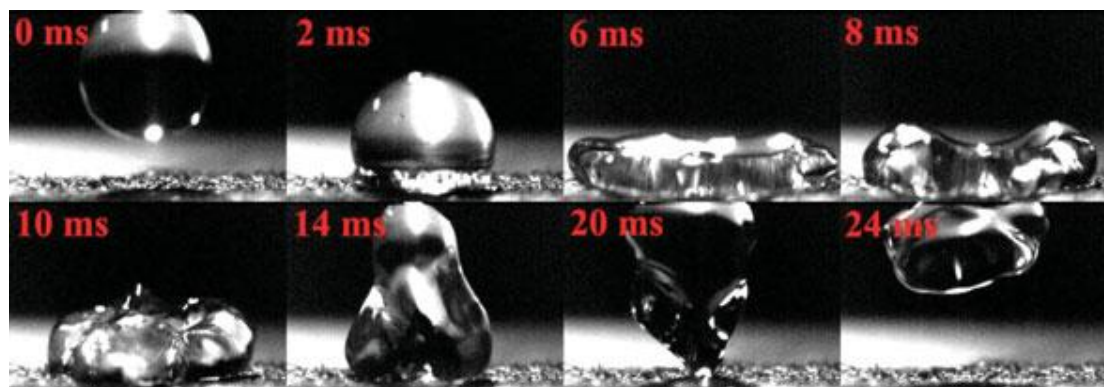
### 3.11 Επιστρώσεις γραφενίου

Μία πολύ χρήσιμη και εντυπωσιακή εφαρμογή φύλλων γραφενίου είναι η επίστρωσή του πάνω σε επιφάνειες. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία υπερυδροφοβών επιφανειών. Τέτοιες επιφάνειες έχουν δείξει υπερυδροφοβηκότητα τόσο στατικά όσο και δυναμικά (κρούση σωματιδίων).

Η εικόνα 3.8 δείχνει τα στιγμιότυπα της πρόσκρουσης μιας σταγόνας νερού πάνω σε αφρώδες υλικό επιστρωμένο με γραφένιο. Η ταχύτητα κρούσης ακριβώς πριν χτυπήσει το σταγονίδιο την επιφάνεια ήταν 76 cm / sec. Η αλληλουχία των στιγμιότυπων δείχνει τη παραμόρφωση του σταγονιδίου κατά τη διάρκεια της πρόσκρουσης . Η σταγόνα απλώνεται, και στη συνέχεια μαζεύεται και από την επιφάνεια με επιτυχία. Ο συντελεστής της επιστροφής είναι ~ 0.37 ( δηλαδή το ποσοστό



μεταβολής της ταχύτητας πριν και μετά τη κρούση) για το αφρώδες υλικό επικαλυμμένο με γραφένιο [14].



*Εικόνα 3.8: Στιγμιότυπα μιας σταγόνας νερού που προσκρούει πάνω σε μια επιφάνεια επικαλυμμένη με γραφένιο [13].*

Η σκουριά αλλά και η διάβρωση των μετάλλων είναι ένα σοβαρό παγκόσμιο πρόβλημα και πολλές προσπάθειες βρίσκονται σε εξέλιξη για να βρεθούν νέοι τρόποι επιβράδυνσης ή αποτροπής τέτοιων φαινομένων. Η διάβρωση είναι αποτέλεσμα της επαφής της επιφάνειας του μετάλλου με αέρα, το νερό ή άλλες ουσίες. Μία κύρια προσέγγιση περιλαμβάνει την επικάλυψη μετάλλων με υλικά που θωρακίζουν την επιφάνεια του μετάλλου. Δυστυχώς όμως τα υλικά που χρησιμοποιούνται σήμερα έχουν περιορισμούς [14].

Πρόσφατες μελέτες, απέδειξαν ότι το γραφένιο, μπορεί να χρησιμοποιηθεί άμεσα σε χαλκό ή νικέλιο ή σε οποιοδήποτε άλλο μέταλλο, προκειμένου να προστατευθεί από τη διάβρωση ή τη σκουριά. Η επικάλυψη των μετάλλων από ένα μοναδικό στρώμα γραφενίου γίνεται μέσω χημικής απόθεσης ατμών (CVD) με αποτέλεσμα να επιβραδύνει τη διάβρωση, στο χαλκό κατά 7 φορές ενώ στο νικέλιο κατά 20 φορές [14].

Το εντυπωσιακότερο, είναι ότι ένα μονό στρώμα γραφενίου παρέχει την ίδια προστασία από τη διάβρωση, με οργανικά υλικά που είναι πέντε φορές παχύτερα. Επιστρώσεις γραφένιο θα μπορούσαν να είναι το ιδανικό κατασταλτικό της διάβρωσης μικροηλεκτρονικών στοιχείων που χρησιμοποιούνται σε διασυνδέσεις, εξαρτήματα αεροσκαφών και εμφυτεύσιμες συσκευές, αυξάνοντας τον χρόνο ζωής τους [14]. Βέβαια, μπορούμε να σκεφτούμε και την ασφάλεια που παρέχει ένα τέτοιο υλικό

σαν επίστρωση σε βασικά εξαρτήματα αεροσκαφών, κάνοντας της πτήσεις ασφαλέστερες

### 3.12 Διαφανή αγώγιμα φιλμ (TCFs)

Με την υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα που αναφέραμε , την υψηλή κινητικότητα των φορέων , και της μέτριας οπτικής διαπερατότητα στο ορατό φάσμα φάσμα , το γραφένιο ενδείκνεται για τη κατασκευή αγώγιμων φιλμ (TCFs) .

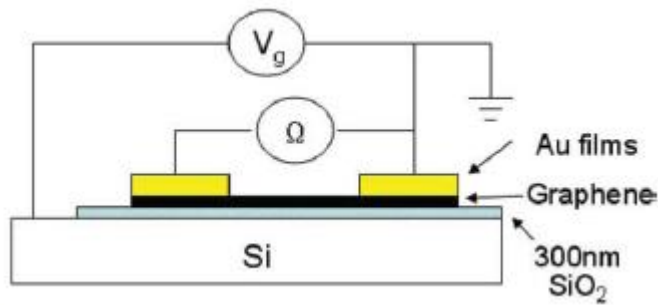
Το γραφένιο έχει θεωρηθεί ως ένα πολλά υποσχόμενο υλικό για κατασκευή TCFS , διότι έχει εξαιρετικά υψηλή ηλεκτρική κινητικότητα και οπτική διαφάνεια , και η πρώτη ύλη για την εξαγωγή του είναι σχετικά φθηνή.

Υψηλής ποιότητας μεμβράνες γραφενίου μπορούν να παρασκευαστούν με χημική απόθεση ατμών (CVD) σε μεγάλη κλίμακα , με διαφάνεια > 90 % στα 350 - 2200 nm. Έτσι, τα φιλμ γραφενίου μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη κατασκευή ηλεκτροδίων με σκοπό τη χρήση τους σε ηλιακά κύτταρα.

### 3.13 Αισθητήρες αερίων

Έρευνα έχει δείξει ότι μονοεπίπεδο γραφένιο είναι ικανό να ανιχνεύσει μια ποικιλία μορίων , τόσο αερίων όσο και βιομόρια . Charge μεταφορά μεταξύ προσροφημένων μορίων και γραφενίου προτείνεται να είναι υπεύθυνα για τη χημική αντίδραση . Κατά την απορόφηση των μορίων από την επιφάνεια του γραφενίου, αλλάζει το επίπεδο Fermi , η πυκνότητα των φορέων και αλλαγή της αντίστασής του [16]. Στην εικόνα 3.9 φαίνεται μια σχηματική αναπαράσταση ενός αισθητήρα με τη χρήση μονοεπίπεδου φύλλου γραφενίου:





**Εικόνα 3.9:** Σχηματική μιας συσκευής αισθητήρα αερίου γραφενίου [16]

### 3.14 Μπαταρίες ιόντων λιθίου

Οι αυξανόμενες ενεργειακές ανάγκες δίνουν κίνητρα στους ερευνητές να ψάξουν για το εναλλακτικών πηγές ενέργειας. Μεταξύ των διαφόρων εναλλακτικών λύσεων, έχει δοθεί μεγάλη προσοχή στις επαναφορτιζόμενες μπαταρίες ιόντων λιθίου λόγω των χαρακτηριστικών του, υψηλότερη ειδική ενέργεια και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής του.

Οι μοναδικές ιδιότητες του γραφενίου συμπεριλαμβανομένων της υψηλής ηλεκτρικής αγωγιμότητας, υψηλή αναλογία επιφάνειας προς όγκο, τον υπέρλεπτο ευέλικτο χαρακτήρα και χημική σταθερότητα, το καθιστούν ιδανικό υποψήφιο για την κατασκευή των σύνθετων νανοδομημάτων για εφαρμογές αποθήκευσης ενέργειας. Σε τέτοια σύνθετα υλικά, το γραφένιο είναι μια ιδανική λύση, γιατί αποτρέπει τη διαστολή ή συστολή των νανοδομημάτων υλικών για τη διάρκεια της φόρτισης και εκφόρτισης.

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται στις μπαταρίες ιόντων λιθίου είναι κυρίως  $\text{SnO}_2$ ,  $\text{Co}_3\text{O}_4$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $\text{TiO}_2$ . Αυτά τα οξείδια μετάλλων έχουν θεωρητικά μεγάλες ικανότητες, αλλά εξαιρετικά χαμηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα.

Πρόσφατες μελέτες δείχνουν ότι η προσθήκη του υλικών βασισμένων στο γραφένιο, βελτιώνουν της απόδοση των μπαταριών.

Η βελτίωση αυτή αποδίδεται στην εξαιρετική ηλεκτρική αγωγιμότητα, στη θερμική και χημική σταθερότητα και μηχανική ευελιξία του ενός φύλλου γραφενίου. Τα εύκαμπτα φύλλα γραφενίου φιλοξενούν μια μεγάλη ποσότητα του όγκου του οξειδίου του μετάλλου κατά τη διάρκεια της διαδικασίας φόρτισης-εκφόρτισης.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥ ΓΡΑΦΕΝΙΟΥ ΣΤΗΝ ΟΠΤΙΚΗ

### 4.1 Υπέρυθρη όραση

Όλοι θυμόμαστε τη ταινία τρόμου " Predator ", όπου ο πρωταγωνιστής ον Arnold Schwarzenegger καταδιώκεται μέσα από τις ζούγκλες της Κεντρικής Αμερικής από ένα τεχνολογικά εξελιγμένο εξωγήινο πλάσμα που έχει ένα άδικο πλεονέκτημα : μπορεί να δει στο θερμικό υπέρυθρο .

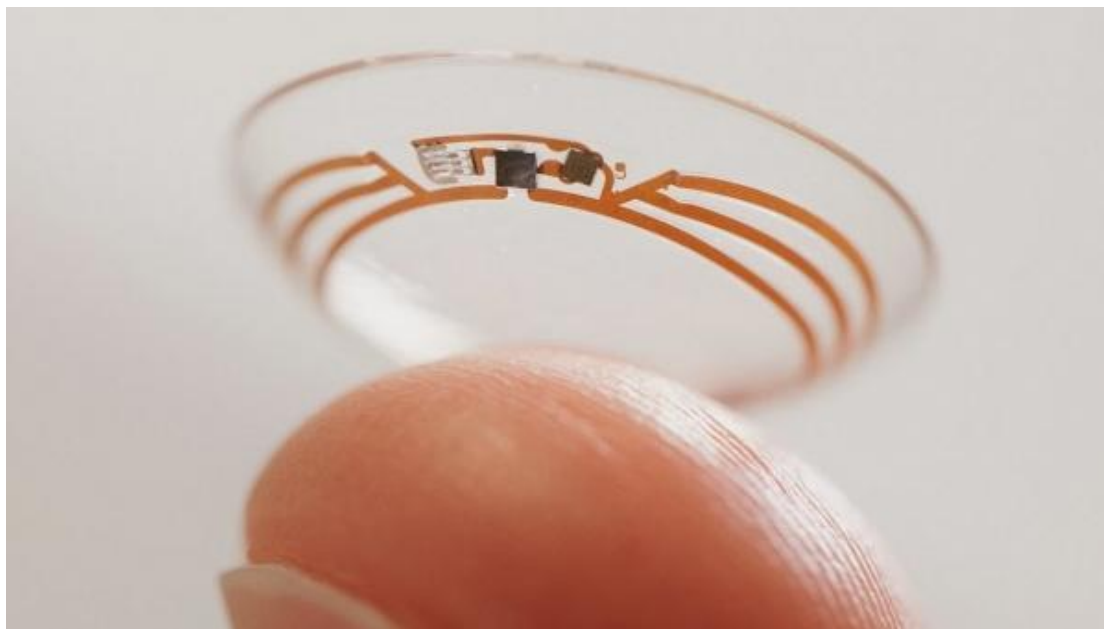
Οι ερευνητές από το Πανεπιστήμιο του Michigan έχουν αναπτύξει ένα είδος φακού επαφής από γραφένιο, που μπορεί να δει σε ολόκληρο το υπέρυθρο φάσμα . Οι χρήστες που φορούν αυτούς τους φακούς επαφής θα έχουν υψηλής τεχνολογίας όραση και θα μπορούν να βλέπουν τον κόσμο σαν το αρπακτικό από τη ταινία του 1987 (Εικόνα 4.1) .



*Εικόνα 4.1: Η υπέρυθρη όραση όπως παρουσιάστηκε από την ταινία «Predator» του 1987*

Σύμφωνα με τον Zhaohui Zhong, βοηθός καθηγητής των ηλεκτρικών και μηχανικών υπολογιστών στο Πανεπιστήμιο του Michigan, οι φακοί επαφής μια μέρα στο εγγύς μέλλον θα είναι σε θέση να «βλέπουν» σε όλο το φάσμα υπέρυθρης ακτινοβολίας (Infrared) , καθώς και ορατού (visible) και υπεριώδους (Ultraviolet) φωτός (Εικόνα 4.2).

Υπήρξαν και στο παρελθόν προσπάθειες να χρησιμοποιήσουν γραφένιο σε φακούς επαφής για το σκοπό αυτό, αλλά ήταν ανεπιτυχής, λόγω της χαμηλής απορρόφησης του φωτός (2,3% ) του, γραφενίου σε ορισμένα τμήματα του φάσματος του φωτός.



*Εικόνα 4.2: Τσιπ τοποθετημένο πάνω σε φακό επαφής για την όραση στο υπεριώδες σχεδιασμένο από τη Google*

Η πρόκληση που είχαν να αντιμετωπίσουν τα προηγούμενα χρόνια οι επιστήμονες, ήταν να αντιμετωπίσουν τη χαμηλή ευαισθησία του γραφενίου στο ορατό φως, όπως αναφέρθηκε στην ενότητα με τις οπτικές ιδιότητες του γραφενίου. Είναι εκατό και χίλιες φορές μικρότερη από ό,τι μια απλή εμπορική συσκευή. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι, η ένταση του ανιχνεύσιμου φωτός δεν είναι αρκετή για τη δημιουργία ηλεκτρικού ρεύματος . Επομένως, ο στόχος ήταν να ενισχυθεί το παραγόμενο ρεύμα.

Ο Zhong και η υπόλοιπη ερευνητική του ομάδα από το Michigan έχουν λύσει αυτό το πρόβλημα, δημιουργώντας ένα σύστημα στρωμάτων γραφενίου το ένα πάνω στο άλλο. Τοποθετήθηκε ένα μονωτικό φράγμα μεταξύ δύο εξαιρετικά λεπτών επιπέδων γραφενίου με αποτέλεσμα τη δημιουργία ηλεκτρικού ρεύματος το οποίο στη συνέχεια θα σταλεί στα κατώτερα στρώματα. Συγκεκριμένα, καθώς το φως χτυπά το ανώτερο στρώμα , απελευθερώνει ηλεκτρόνια , δημιουργώντας θετικά φορτισμένες οπές. Τα ηλεκτρόνια στη συνέχεια κινούνται μέσα από αυτές τις οπές ( χάρη σε ένα κβαντικό μηχανικό τέχνασμα ) , δημιουργώντας ένα ηλεκτρικό πεδίο που επηρεάζει τη ροή του ρεύματος που διαπερνάει το κάτω στρώμα .Ο σχεδιασμός , σύμφωνα με τον Zhong, είναι υπέρλεπτος , και θα μπορούσε να προσαρμοστεί σε ένα φακό

επαφής ή σε ένα κινητό τηλέφωνο. Η όλη συσκευή έχει το μέγεθος ενός νυχιών , και μπορεί εύκολα να μειωθεί περαιτέρω, εάν παραστεί ανάγκη

Η πιο άμεση χρήση για μια τέτοια συσκευή θα ήταν για τους στρατιώτες σε πολεμική ζώνη . Ακριβώς όπως και στο " Predator ", θερμική υπέρυθρη όραση επιτρέπει στους χρήστες να δουν εύκολα σε ένα σκοτεινό ή ομιχλώδες τοπίο .

Φυσικά η πώληση τέτοιων φακών προς τους καταναλωτές, έχει ένα μειονέκτημα. Θα αυξηθεί η ανησυχία της προστασίας της ιδιωτικής ζωής.

Υπάρχουν πολλοί λόγοι για τους οποίους ένα άτομο θα ήθελε να έχει φακούς επαφής γραφενίου . Θα ήταν πολύ χρήσιμοι προς τους αστυνομικούς , πυροσβέστες , καθώς και κάθε άλλη εργασία , όπου οι άνθρωποι πρέπει να εργαστούν σχεδόν στο απόλυτο σκοτάδι .

Θα μπορούσαν επίσης να είναι χρησιμοποιηθούν για τη νυχτερινή οδήγηση σε περιοχές όπου ο φωτισμός των δρόμων δεν είναι αρκετός. Έτσι μειώνεται η πιθανότητα κάποιου ατυχήματος λόγω της χαμηλής ορατότητας.

Οι φακοί αυτοί, θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν από τους ιατρούς για την παρακολούθηση της ροής του αίματος από έναν ασθενή χωρίς την ανάγκη να μετακινήσής του ή την υποβολή τους σάρωση

Επίσης , οι ιστορικοί τέχνης θα μπορούσαν να ανιχνεύσουν τα στρώματα του χρώματος και ενδεχομένως ολόκληρης της ζωγραφιάς που είναι κρυμμένη πίσω από την εικόνα ενός πίνακα

Όμως, ήδη κυκλοφορούν στην αγορά συσκευές νυχτερινής όρασης. Οι φακοί επαφής από γραφένιο είναι η καλύτερη από τις τρέχουσες συσκευές νυχτερινής όρασης. Αυτό προκύπτει από το γεγονός , ότι οι συσκευές νυχτερινής όρασης απαιτούν εξοπλισμό ψύξης , έτσι ώστε να μην ανιχνεύουν τη θερμική ακτινοβολία που εκπέμπουν τα άτομα που τα φοράνε . Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, οι συσκευές αυτές να είναι σχετικά ογκώδεις. Προφανώς, το μέγεθος ενός φακού επαφής γραφενίου είναι ασύγκριτο σε σχέση με την «ογκώδη» συσκευή νυχτερινής όρασης. Επίσης, είναι και πολύ πιο εύχρηστοι.

Η τρέχουσα τεχνολογία νυχτερινής όρασης περιλαμβάνει την καταγραφή του υπέρυθρου τμήματος του φάσματος του φωτός του . Η υπέρυθρη ακτινοβολία εκπέμπεται λόγω της θερμότητας των αντικειμένων .

Φακοί επαφής γραφένιο είναι μόνο μία από τις πολλές χρήσεις που οι επιστήμονες και οι ερευνητές έχουν αναπτύξει. Οι πιθανές χρήσεις για γραφένιο είναι σχεδόν απεριόριστες, αλλά καμία αίσθηση δεν θα μπορεί να συγκριθεί με την αίσθηση που θα μπορούσαν να προκαλέσουν οι φακοί επαφής γραφένιο που επιτρέπουν να δούμε τη νύχτα.

#### 4.2 «Φυσαλίδες» γραφένιο για τη κατασκευή οπτικών φακών

Άλλη μια εφαρμογή μπορεί να προσθέσει στο ρεπερτόριό του το γραφένιο. Μια ομάδα με επικεφαλής τον νομπελίστα Kostya Novoselov του πανεπιστημίου του Μάντσεστερ στη Βρετανία, «φούσκες» γραφένιο θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή οπτικών φακών των οποίων η εστιακή απόσταση μπορεί να μεταβάλλεται. Οι δομές αυτές - που σχηματίζονται όταν το υλικό τεντώνεται - μπορεί να είναι μια εναλλακτική λύση αντί των συμβατικών φακών, ρυθμιζόμενη την εστίαση στο μέλλον.

Αν και η έρευνα έχει επικεντρωθεί κυρίως σε ηλεκτρονικές ιδιότητες του γραφένιο, έχει επίσης μια σειρά από άλλα ειδικά χαρακτηριστικά. Για παράδειγμα, είναι αδιαπέραστο από αέρια, είναι πολύ ελαστικό - μπορεί να τεντωθεί μέχρι 20% - και είναι διαφανές στο φως.

Λόγω της ελαστικότητάς τους, φυσαλίδες διαφόρων σχημάτων μπορούν να εμφανιστούν στην επιφάνειά του, βοηθώντας στη κατασκευή αυτών των φακών. Σύμφωνα με τον Novoselov, φυσαλίδες σφαιρικού σχήματος μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να κατασκευη οπτικών φακών μεταβλητής καμπυλότητας, απλά με την αλλαγή της τάσης που του εφαρμόζεται. Αυτό σημαίνει, ότι η εστίαση του φακού μπορεί να αλλάξει όπως ακριβώς αλλάζει και στο ανθρώπινο μάτι [18].

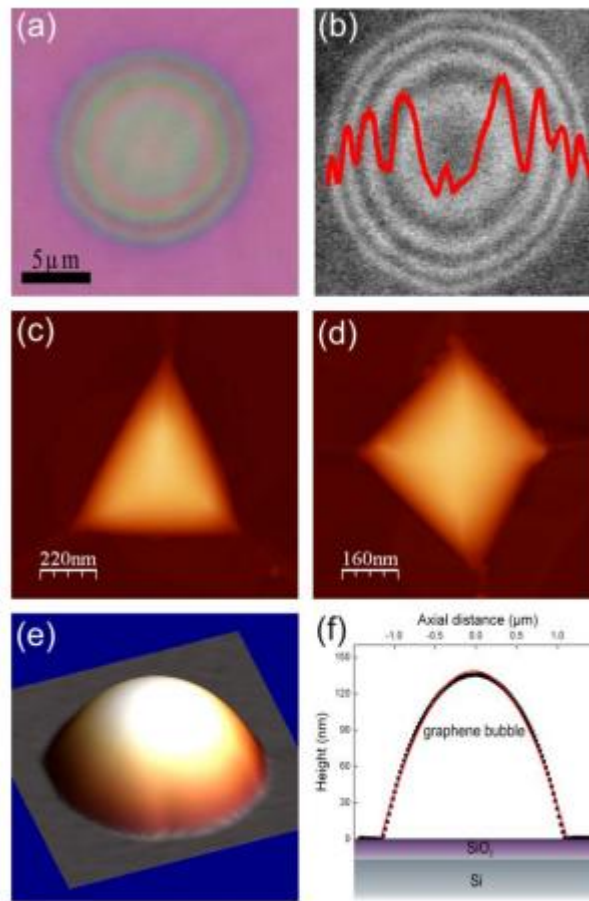
Τέτοια συστήματα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε κάμερες κινητών τηλεφώνων, κάμερες φωτογραφικών μηχανών και σε γυαλιά με αυτόματη εστίαση. Οι σημερινοί φακοί αυτόματης εστίασης είναι κατασκευασμένοι από διαφανείς υγρού κρυστάλλους (LCs) ή υγρά. Οι LCs λειτουργούν χάρη στη δυνατότητά τους να αλλάζουν τον δείκτη διάθλασής του σύμφωνα με το εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο. Οι φακοί υγρών, λειτουργούν λίγο διαφορετικά. Αναλόγως την εξωτερική πίεση που τους ασκείται, αλλάζουν το σχήμα του, με αποτέλεσμα την αλλαγή της εστιακής τους απόστασης [18].

Παρόλο που τέτοιες συσκευές λειτουργούν καλά, είναι σχετικά δύσκολο να κατασκευαστούν επειδή περιλαμβάνει την τοποθέτηση δύο ή περισσότερων υγρών ή στρώσεων υγρών κρυστάλλων μεταξύ των διαφανών ηλεκτροδίων - για παράδειγμα, εκείνων που κατασκευάζονται από οξειδίο ινδίου κασσιτέρου (ΙΤΟ). Το ΙΤΟ έχει το πρόσθετο μειονέκτημα ότι είναι ακριβό, όπως επίσης και το ίνδιο, που είναι σπάνιο. Οπτικά υλικά με βάση με το γραφένιο μπορούν να χρησιμοποιηθούν χρησιμοποιώντας πιο απλές μεθόδους κατασκευής, με αποτέλεσμα και πιο χαμηλό κόστος κατασκευής [18].

Ερευνητική ομάδα ξεκίνησε με τη προετοιμασία μεγάλων νιφάδων γραφενίου σε επίπεδες επιφάνειες με υπόστρωμα οξειδίου του πυριτίου. Όταν ο αέρας που διοχετεύεται κάτω από το γραφένιο δεν μπορεί να ξεφύγει, μια φυσαλίδα του υλικού σχηματίζεται. Οι ερευνητές εντόπισαν τέτοιες δομές, οι οποίες είναι εξαιρετικά σταθερές και κυμαίνονται σε μέγεθος από μερικές δεκάδες νανόμετρα σε δεκάδες μικρά, χρησιμοποιώντας ένα οπτικό μικροσκόπιο.

Για να δείξουν ότι οι φυσαλίδες θα μπορούσαν να λειτουργήσουν ως φακοί αυτόματης εστίασης, ο Novoselov και συνεργάτες του, κατασκεύασαν συσκευές που περιέχουν 1 ηλεκτρόδια τιτανίου / χρυσού και τα έφεραν σε επαφή με τα φυσαλίδες με χρήση διάταξης που μοιάζει με τρανζίστορ. Με τον τρόπο αυτό, μπορούσαν να εφαρμόζουν μια τάση στα άκρα τους. Οι ερευνητές στη συνέχεια πήραν οπτικές μικροφωτογραφίες των δομών, ενώ η η τάση που εφαρμόσαν κυμάνθηκε από -35 έως 35 V. Όπως ήταν αναμενόμενο, έβλεπαν τις φυσαλίδες να γίνονται πιο κυρτές όσο αυξανόταν η τάση [18].

Στη πραγματικότητα, αυτές οι φυσαλίδες γραφενίου μπορούν να εμφανιστούν και με τη χρήση υγρού υψηλού δείκτη διάθλασης ή καλύπτοντάς τις με το υλικό αυτό. Μάλιστα, οι νέοι φακοί φυσαλίδων γραφενίου είναι μια διασταύρωση μεταξύ των συμβατικών υγρών κρυστάλλων και φακών με υγρό [18].



**Εικόνα 4.3:** (a) Οπτική μικρογραφία φυσαλίδας γραφενίου υπό το λευκό φως , που βρίσκεται σε υπόστρωμα πυριτίου. (b) Οπτική μικρογραφία φυσαλίδας γραφενίου κάτω από μονοχρωματική ακτίνα φωτός , που βρίσκεται σε υπόστρωμα πυριτίου (c,d) εικόνες από μικροσκόπιο ατομικής δύναμης (AFM) , που δείχνει τριγωνικές φυσαλίδες σε υπόστρωμα BN (νιτρίδιο του βορίου) (e) σάρωση φυσαλίδας γραφενίου από AFM διαστάσεων 3μm x 3μm (f) Διάγραμμα του υποστρώματος συναρτήσει της διατομή της φούσκας, που λαμβάνεται με τη χρήση AFM. [19]

### 4.3 Διδιάστατοι φακοί γραφενίου για την εστίαση δέσμης ηλεκτρονίων

Το γραφένιο , το " υλικό θαύμα " από άνθρακα , έχει μια άλλη πιθανή χρήση στον κόσμο των ηλεκτρονικών υψηλής ταχύτητας . Μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ένα εργαλείο που μπορεί να εστιάσει μια ροή ηλεκτρονίων , διαδικασία που είναι παρόμοια με τον τρόπο που ένας οπτικός φακός εστιάζει το φως .

Ένα νέο πρωτότυπο αποκαλύπτει ότι ένα στρώμα γραφενίου, όταν είναι τεντώμένο , μπορεί να δράσει ως ένα δισδιάστατο φακός για τα ηλεκτρόνια . Η έρευνα έγινε από από μια διεθνή ομάδα ερευνητών από το Τεχνολογικό Ινστιτούτο της Καρλσρούης στη Γερμανία και το Γαλλικό Εθνικό Κέντρο Επιστημονικής Έρευνας ( CRNS ) [22] .

Το γραφένιο είναι ένας άριστος αγωγός : τα ηλεκτρόνια ρέουν ελεύθερα σε όλη την επιφάνειά του σε ευθείες γραμμές . Σύμφωνα με μια θεωρία που είχε προταθεί παλαιότερα , «τεντωμένο» γραφένιο εμποδίζει τη ροή των ηλεκτρονίων , επιβραδύνοντάς τα και αλλάζοντας πορεία τους . Οι επιστήμονες πίστευαν ότι αυτό το αποτέλεσμα θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για να συγκεντρώσουν ηλεκτρόνια σε ένα συγκεκριμένο σημείο , με τον τρόπο που ένας οπτικός φακός συγκεντρώνει τις προσπίπτουσες ακτίνες σε ένα σημείο.

Για να δημιουργηθεί ο φακός , οι ερευνητές έφτιαξαν ένα «παραμορφωμένο» στρώμα γραφενίου που καλύπτει ομαλά μια σειρά εξαγωνικών τρυπών μεγέθους νάνο πάνω υπόστρωμα από καρβίδιο του πυριτίου . Οι ερευνητές διαπίστωσαν ότι θα μπορούσαν να την εστιακή απόσταση του φακού με την αλλαγή της γεωμετρίας του .

Πρακτικές εφαρμογές αυτού του έργου περιλαμβάνουν χρήσεις σε υψηλής ταχύτητας ηλεκτρονικά , όπου το γραφένιο θα μπορούσε να λειτουργήσει ως ένα μέσο μεταφοράς για την ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ των διαφόρων τμημάτων του κυκλώματος . Αντίθετα με την παραδοσιακή ανταλλαγή πληροφοριών , στις οποίες τα ηλεκτρόνια ρέουν μέσω των καλωδίων , η νέα μέθοδος θα επιτρέψει ηλεκτρόνια μια πρωτοφανή ελευθερία κινήσεων , παρόμοια με εκείνη του φωτός στο κενό [22] .



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

### 5.1 Συμπεράσματα

Στα πλαίσια της παρούσας πτυχιακής εργασίας, σκοπός ήταν η ανάδειξη των δυνατοτήτων και των ιδιοτήτων του γραφενίου. Είναι προφανές ότι οι εξαιρετικές ιδιότητες του γραφενίου έχουν καταστήσει επιτακτική την ανάγκη χρήσης του σε νέες εφαρμογές. Μεγάλη προσπάθεια έχει αφιερωθεί στην εξερεύνηση της φυσικής και της χημείας του γραφενίου. Οι ιδιότητες, όπως η υψηλή ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα που προέρχεται από υλικό δύο διαστάσεων δεν έχουν παρατηρηθεί ούτε στα τρισδιάστατα υλικά.

Ένα μεγάλο μέρος των ερευνητικών δημοσιεύσεων τα τελευταία 5 χρόνια καταδεικνύει τη σημασία του γραφενίου και που μπορεί να ξεπεράσει την έρευνα του πυριτίου, για την ανάπτυξη της μικροηλεκτρονικής. Ενώ οι έρευνες με βάση το πυρίτιο βρίσκονται σε προχωρημένο στάδιο, προκειμένου να ξεπεραστούν τεχνολογικοί φραγμοί, το γραφένιο πρέπει να ερευνηθεί εκτενώς, δεδομένου ότι κατέχει το μέλλον ηλεκτρονικών νανοεφαρμογών.

Τα ημιμεταλλικά χαρακτηριστικά του γραφενίου έχουν τροποποιηθεί για να συνειδητοποιήσουμε τις εφαρμογές του τρανζίστορ. Νανოსωλήνες γραφενίου και διπλοστιβάδες γραφενίου είναι τα αποτελέσματα της τροποποίησης που οδηγεί σε ένα κατάλληλο ενεργειακό χάσμα και επιτρέπει τις εφαρμογές σε FET [4]. Ωστόσο, το γραφένιο ως ένα νέο υλικό εξακολουθεί να αντιμετωπίζει πολλές προκλήσεις, από τη σύνθεση και τον χαρακτηρισμό μέχρι την τελική κατασκευή της συσκευής.

Οι εξαιρετικές ιδιότητες παρατηρήθηκαν σε φύλλα γραφενίου χωρίς ελλωτώματα που δημιουργήθηκαν από τη μέθοδο της μηχανικής αποφλοιώσης, η οποία βέβαια δεν ενδείκνεται για τα παραγωγή ποσοτήτων γραφενίου μεγάλης κλίμακας. Οι εναλλακτικές μέθοδοι έχουν εξελιχθεί τα τελευταία χρόνια. Πρόσφατες αναφορές δείχνουν ότι η μέθοδος CVD καθιστά εύκολη τη μεταφορά του στρώματος γραφενίου πάνω στο υπόστρωμα [4].

Αυτές οι ανακαλύψεις προσφέρουν νέες και συναρπαστικές ευκαιρίες για τις βιομηχανίες ημιαγωγών . η χημική απολέπιση του γραφίτη σε GO ακολουθούμενη από θερμική και χημική αναγωγή , έχει προσφέρει μια οικονομικώς αποδοτική οδό παραγωγής οξειδίου του γραφενίου σε μεγάλη κλίμακα . Ωστόσο , η χημική και θερμική τροποποίηση μειώνει τις ηλεκτρικές και μηχανικές ιδιότητες.

Οι πιθανές εφαρμογές με βάση το γραφένιο, περιλαμβάνουν διαφανή εύκαμπτα ηλεκτροδία , γραφενίου , αποθήκευση ενέργειας , αισθητήρες. Οι οπτικές εφαρμογές, περιλαμβάνουν φακούς επαφής γραφενίου, οθόνες LCD με χρήση ηλεκτροδίων γραφενίου.

Παρά τη χαμηλή απορρόφηση ορατού φωτός (2,3%), με χρήση κατάλληλων κυκλωμάτων μπορεί αυτή η χαμηλή απορρόφηση να είναι αρκετή για τη δημιουργία και ανίχνευση ηλεκτρικού ρεύματος, με σκοπό την υπέρυθρη όραση. Λόγω αυτής της χαμηλής απορροφητικότητας, η ανίχνευση του γραφενίου σε εργαστήρια με τη βοήθεια οπτικού μικροσκοπίου, προϋποθέτει τη τοποθέτηση του φύλλου γραφενίου πάνω σε κατάλληλο υπόστρωμα [4]. Η τρέχουσα ανίχνευση γραφενίου με ένα οπτικό μικροσκόπιο εξαρτάται από το πάχος του υποστρώματος και το μήκος κύματος του προσπίπτοντος φωτός . Επομένως, χρειάζεται περισσότερη έρευνα για να αναπτυχθεί μια σχετικά απλή μέθοδος ανίχνευσης στρώματος γραφενίου που είναι ανεξάρτητη από το υπόστρωμα.

## 5.2 Προοπτικές

Παρά το βασιλεύοντα αισιοδοξία για γραφενίου με βάση ηλεκτρονικά " graphene " μικροεπεξεργαστές είναι απίθανο να εμφανίζονται για τα επόμενα 20 χρόνια . Εν τω μεταξύ , μπορεί κανείς να σίγουρα ελπίζουμε για πολλές άλλες γραφενίου με βάσηεφαρμογές να ενηλικιωθεί .

Η πιο άμεση εφαρμογή για γραφενίου είναι ίσως η χρήση της στα σύνθετα υλικά . Πράγματι , έχει αποδειχτεί ότι νιφάδες γραφενίου μπορούν να συνδυαστούν με κρυσταλλίτες. Αυτό επιτρέπει τη παραγωγή αγωγίμων πλαστικών η οποία σε συνδυασμό με το χαμηλό κόστος παραγωγής καθιστά σύνθετα υλικά γραφενίου ιδιαιτέρως ελκυστικά.

Μια άλλη δυνατότητα είναι η χρήση του γραφενίου σε σκόνη σε ηλεκτρικές μπαταρίες. Η μεγάλη αναλογία επιφάνειας προς τον όγκο και η υψηλή αγωγιμότητα που παρέχονται από το γραφένιο μπορεί να οδηγήσει σε βελτίωση της αποτελεσματικότητας των μπαταριών . Οι νανοσωλήνες άνθρακα έχουν επίσης ληφθεί υπόψη για την εφαρμογή αυτή , αλλά γραφενίου σε σκόνη έχει ένα σημαντικό πλεονέκτημα, ότι είναι φτηνό να στη παραγωγή του..

Λεπτές νιφάδες γραφίτη χρησιμοποιούνται σε οθόνες πλάσματος ( εμπορικά πρωτότυπα ) πολύ πριν το γραφένιο να απομονωθεί , και πολλές πατέντες έχουν κατατεθεί για το θέμα αυτό . Είναι πιθανό ότι στο άμεσο μέλλον , το γραφενίου σε μορφή σκόνης να μπορέσει να προσφέρει ακόμα μεγαλύτερες δυνατότητες σε αυτές τις οθόνες.

Οι νανοσωλήνες άνθρακα , έχει αναφερθεί ότι είναι ένα εξαιρετικό υλικό για τη χρήση σε αισθητήρες αερίου αλλά σε σύγκριση με το γραφένιο προσφέρουν περισσότερα πλεονεκτήματα στη συγκεκριμένη εφαρμογή. . δεν μπορούμε να παραλείψουμε παραπέμπουν αποθήκευσης υδρογόνου , το οποίο έχει μια ενεργή , αλλά αμφιλεγόμενο θέμα για τους νανοσωλήνες .

Έχει ήδη προταθεί ότι το γραφένιο είναι ικανό να απορροφά ένα τελικά μεγάλη ποσότητα υδρογόνου και πειραματικές προσπάθειες προς αυτή την κατεύθυνση είναι αναμένονται.

Η χημική τροποποίηση του γραφενίου μπορεί να οδηγήσει σε εντελώς νέα φυσική . Ανάλογα με τη φύση των χημικών προσμίξεων και πώς είναι εισάγονται μέσα στο πλέγμα του γραφενίου ( προσρόφηση , ή παρεμβολή ) , μπορεί να υπάρξουν πολλά ενδιαφέροντα αποτελέσματα . Μικρές συγκεντρώσεις αλκαλικών μετάλλου , είναι ικανές να αλλάξουν το χημικό δεσμό. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα να επηρεάσει τους υβριδισμούς του και ως εκ τούτου να επηρεαστεί η ηλεκτρονική δομή του [17]. Επομένως, μπορούμε να φανταστούμε μια μεγάλη ποικιλία υλικών με τη πρόσμιξη διαφόρων υλικών στο πλέγμα του γραφενίου.

## ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. A. Geim, K. Novoselov, Nature Mater. 6, 183, (2007)
2. M. Griffiths, Graphene, Physics World,(2006)
3. "The Nobel Prize in Physics 2010". Nobelprize.org. Nobel Media AB 2013. Web. 9 Apr 2014
4. Virendra Singh, Daeha Joung, Lei Zhai, Soumen Das, Saiful I. Khondaker, Sudipta Seal, *Graphene based materials: Past, present and future*, Progress in Materials Science, 56(8), pp. 1178-1271, (2011).
5. J. Gong, Intech, Croatia, *Graphene-Synthesis, characterization, properties and applications*, (2011).
6. Magazine Scientific American ,INC, (April-2008)
7. C. Lee, X. Wei, J.W. Kysar, J. Hone, Science, Volume 321, 385-388 (2008)].
8. A.H.Castro Neto, F.Guinea, N.M.R.Peres, K.S.Novoselov, K.Geim, The electronic properties of graphene, (2009)
9. A.A. Balandin, S. Ghosh, W. Bao, I. Calizo ,D. Teweldebrhan, F. Miao, C. Ning Lau, Superior Thermal Conductivity of Single-Layer Graphene, (2008)
10. Nature, J. Yin, X. Li, J. Yu, Z. Zhang, J. Zhou , W. Guo, *Generating electricity by moving a droplet of ionic liquid along graphene*, (2014)
- 11.Nanowerk, *Graphene photodetectors for high-speed optical communications*, (2010)
- 12.Nanowerk, *Microcavity vastly enhances photoresponse of graphene photodetectors*, (2012)
- 13.E, Singh, Z. Chen, F. Houshmand, Wencai Ren1, Y. Peles, H. Cheng, N. Koratkar, *Superhydrophobic Graphene Foams*, (2012)

14. D. Prasai , J. C. Tuberquia , R. R. Harl , G. K. Jennings , K. I. Bolotin, *Graphene: Corrosion-Inhibiting Coating*, (2012)
15. D. Spector, *Lockheed Martin Says This Desalination Technology Is An Industry Game-Changer*, Business Insider, (2013)
16. Y. Zhu , S. Murali , W. Cai , X. Li , J. W. Suk , J. R. Potts , and R. S. Ruoff, *Graphene and Graphene Oxide: Synthesis, Properties, and Applications*, (2010)
17. P. Blake, P. D. Brimicombe, R. R. Nair, T. J. Booth, D. Jiang, F. Schedin, L. A. Ponomarenko, S. V. Morozov, H. F. Gleeson, E. W. Hill1, A. K. Geim, K. S. Novoselov, *Graphene-Based Liquid Crystal Device* , Nano Letters , (2008)
18. B. Dumé , (2011), *Graphene bubbles in a webcam?*, nanotechweb.org
19. T. Georgiou L. Britnell, P. Blake, R. Gorbachev, A. Gholinia, A. K. Geim, C. Casiraghi, K. S. Novoselov, *Graphene bubbles with controllable curvature*, (2011)
20. K. S. Novoselov, “*Nobel Lecture: Graphene: Materials in the Flatland*,” Reviews of Modern Physics (2011).
21. J. Cartwright, *Graphene makes for better optical displays*, physicsworld.com (2008)
22. L. Gerhard, E. Moyen, T. Balashov, I. Ozerov, M. Portail, H. Sahaf, L. Masson, W. Wulfhekel, M. Hanbücken. *A graphene electron lens. Applied Physics Letters*, 2012
24. F. Torrisi, T. Hasan, W. Wu, Z. Sun, A. Lombardo, T. Kulmala, G. W. Hshieh, S. J. Jung, F. Bonaccorso, P. J. Paul, D. P. Chu, A. C. Ferrari, *Ink-Jet Printed Graphene Electronics*, arxiv, (2011)

25. D. LaGesse, *Supercapacitors Amp Up as an Alternative to Batteries*, National Geographic, August 20, (2013)

26. R. Kotz and M. Carlen, *Principles and applications of electrochemicalcapacitors*, Electrochimica Acta, (2000).