Γενικό Τμήμα Θετικών Επιστημών ,
Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών, Α.Τ.Ε.Ι.Θ.

Τμήμα Φυσικής,
Σχολή Θετικών Επιστημών, Α.Π.Θ.

ΓΡΑΦΕΝΙΟ: Ο ΑΝΘΡΑΚΑΣ ΣΤΙΣ ΔΥΟ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ

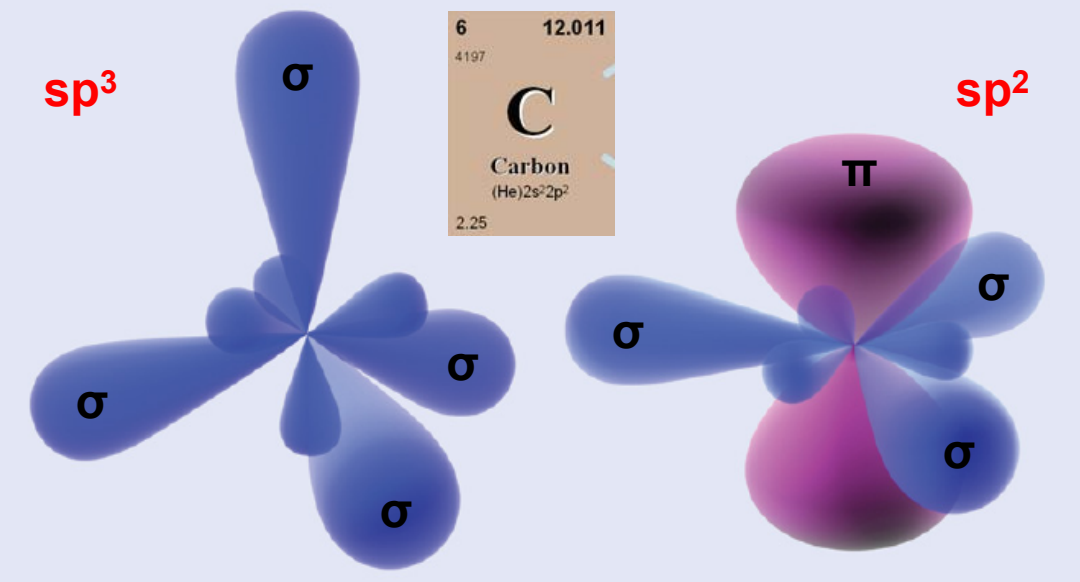
(*ΒΡΑΒΕΙΟ NOBEL ΦΥΣΙΚΗΣ 2010*)

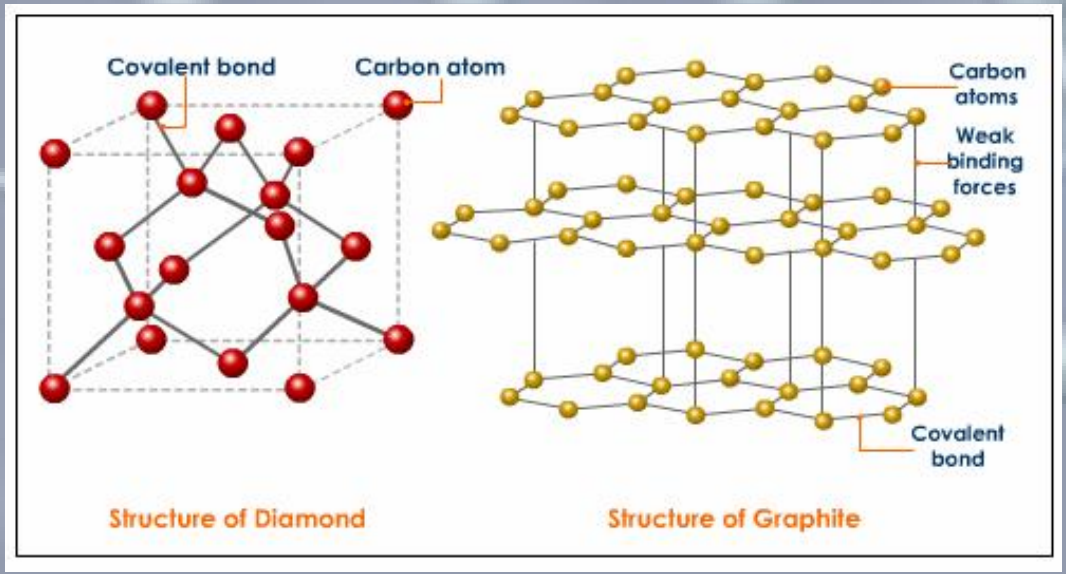
Ι. ΑΡΒΑΝΙΤΙΔΗΣ

ΜΟΡΦΕΣ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ

ΟΙ 3D ΑΛΛΟΤΡΟΠΙΚΕΣ ΜΟΡΦΕΣ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ

Διαμόρφωση των ηλεκτρονικών τροχιακών στο διαμάντι και στο γραφίτη





ΝΑΝΟΔΟΜΕΣ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ (0D ΦΟΥΛΕΡΕΝΙΑ 1985)

162 LETTERS TO NATURE NATURE VOL. 318 14 NOVEMBER 1985

C_{60}: Buckminsterfullerene

H. W. Kroto*, J. R. Heath, S. C. O'Brien, R. F. Curl & R. E. Smalley

Rice Quantum Institute and Departments of Chemistry and Electrical Engineering, Rice University, Houston, Texas 77251, USA

During experiments aimed at understanding the mechanisms by which long-chain carbon molecules are formed in interstellar space and circumstellar shells[1], graphite has been vaporized by laser irradiation, producing a remarkably stable cluster consisting of 60 carbon atoms. Concerning the question of what kind of 60-carbon atom structure might give rise to a superstable species, we suggest a truncated icosahedron, a polygon with 60 vertices and 32 faces, 12 of which are pentagonal and 20 hexagonal. This object is commonly encountered as the football shown in Fig. 1. The C_{60} molecule which results when a carbon atom is placed at each vertex of this structure has all valences satisfied by two single bonds and one double bond, has many resonance structures, and appears to be aromatic.

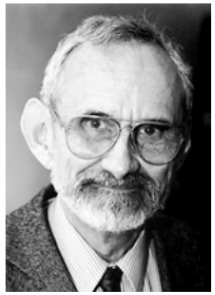
Fig. 1 A football (in the United States, a soccerball) on Texas grass. The C_{60} molecule featured in this letter is suggested to have the truncated icosahedral structure formed by replacing each vertex on the seams of such a ball by a carbon atom.

graphite fused six-membered ring structure. We believe that the distribution in Fig. 3*c* is fairly representative of the nascent distribution of larger ring fragments. When these hot ring clusters are left in contact with high-density helium, the clusters equilibrate by two- and three-body collisions towards the most stable species, which appears to be a unique cluster containing 60 atoms.

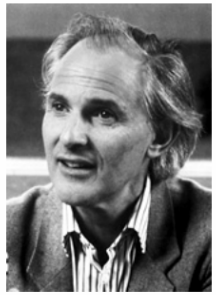
When one thinks in terms of the many fused-ring isomers with unsatisfied valences at the edges that would naturally arise

The Nobel Prize in Chemistry 1996
Robert F. Curl Jr., Sir Harold Kroto, Richard E. Smalley

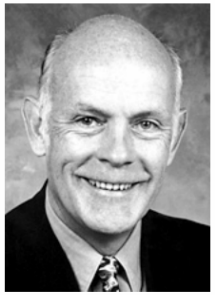
- The Nobel Prize in Chemistry 1996
- Nobel Prize Award Ceremony
- Robert F. Curl Jr.
- Sir Harold Kroto
- Richard E. Smalley



Robert F. Curl Jr.

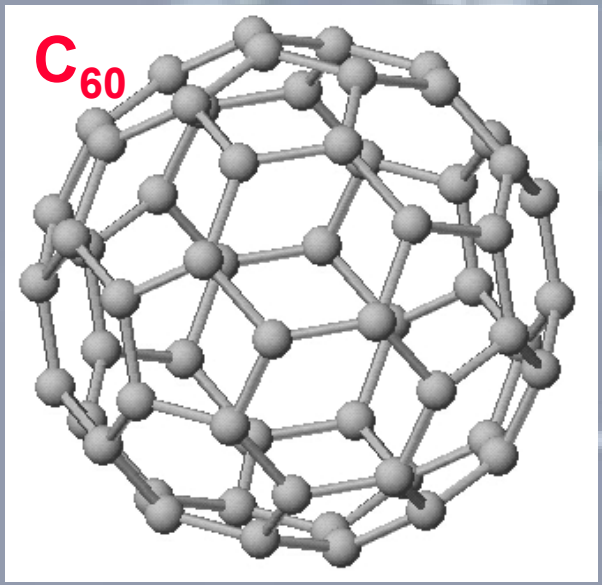


Sir Harold W. Kroto



Richard E. Smalley

The Nobel Prize in Chemistry 1996 was awarded jointly to Robert F. Curl Jr., Sir Harold W. Kroto and Richard E. Smalley *"for their discovery of fullerenes"*.



- ✓ Δομή κλειστού κλωβού
- ✓ Υψηλή συμμετρία (I_h) και ευστάθεια
- ✓ 12 πεντάγωνα (P) and 20 εξάγωνα (H)
- ✓ Απλοί ομοιοπολικοί δεσμοί (H-P), Διπλοί ομοιοπολικοί δεσμοί (H-H)
- ✓ sp^3 χαρακτήρας στα sp^2 άτομα άνθρακα

ΝΑΝΟΔΟΜΕΣ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ (1D ΝΑΝΟΣΩΛΗΝΕΣ 1991, 1993)

LETTERS TO NATURE

Helical microtubules of graphitic carbon

Sumio Iijima

NEC Corporation, Fundamental Research Laboratories, 34 Miyukigaoka, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan

THE synthesis of molecular carbon structures in the form of C_{60} and other fullerenes[1] has stimulated intense interest in the structures accessible to graphitic carbon sheets. Here I report the preparation of a new type of finite carbon structure consisting of needle-like tubes. Produced using an arc-discharge evaporation method similar to that used for fullerene synthesis, the needles grow at the negative end of the electrode used for the arc discharge. Electron microscopy reveals that each needle comprises coaxial tubes of graphitic sheets, ranging in number from 2 up to about 50. On each tube the carbon-atom hexagons are arranged in a helical fashion about the needle axis. The helical pitch varies from needle to needle and from tube to tube within a single needle. It appears that this helical structure may aid the growth process. The formation of these needles, ranging from a few to a few tens of nanometres in diameter, suggests that engineering of carbon structures should be possible on scales considerably greater than

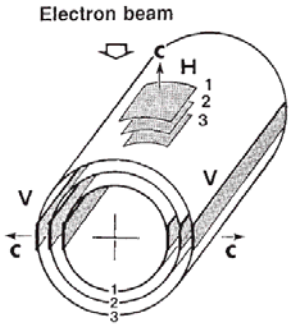
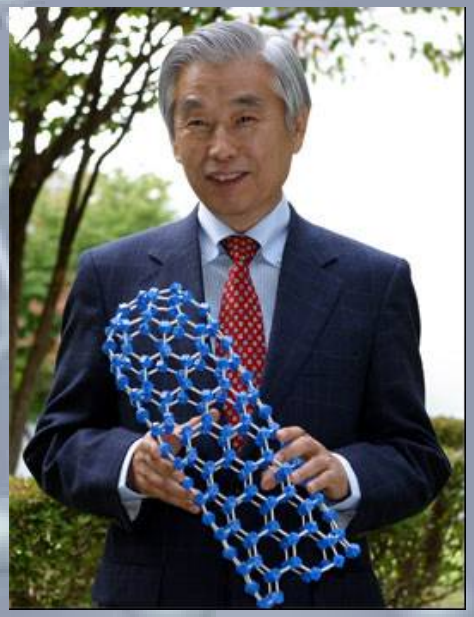


FIG. 2 Clinographic view of a possible structural model for a graphitic tubule. Each cylinder represents a coaxial closed layer of carbon hexagons. The meaning of the labels V and H is explained in the text.

graphite filaments[5]. The apparatus is very similar to that used for mass production of C_{60} (ref. 9). The needles seem to grow



Single-shell carbon nanotubes of 1-nm diameter

Sumio Iijima & Toshinari Ichihashi

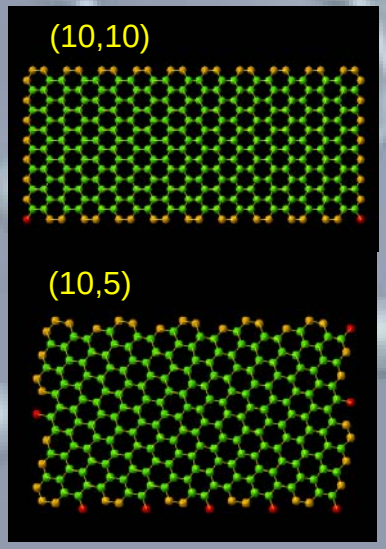
Fundamental Research Laboratories, NEC Corporation, 34 Miyukigaoka, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan

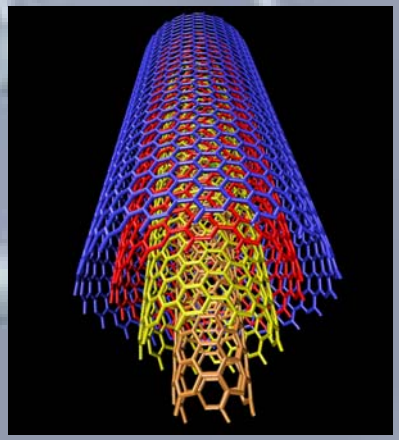
CARBON nanotubes[1] are expected to have a wide variety of interesting properties. Capillarity in open tubes has already been demonstrated[2–5], while predictions regarding their electronic structure[6–8] and mechanical strength[9] remain to be tested. To examine the properties of these structures, one needs tubes with well defined morphologies, length, thickness and a number of concentric shells; but the normal carbon-arc synthesis[10,11] yields a range of tube types. In particular, most calculations have been concerned with single-shell tubes, whereas the carbon-arc synthesis produces almost entirely multi-shell tubes. Here we report the synthesis of abundant single-shell tubes with diameters of about one nanometre. Whereas the multi-shell nanotubes are formed on the carbon cathode, these single-shell tubes grow in the gas phase. Electron diffraction from a single tube allows us to confirm the helical arrangement of carbon hexagons deduced previously for multi-shell tubes[1].

The nanotubes often form as bundles, but isolated and single tubules are also present. Three tubules which bridge two cementite particle agglomerates are seen in Fig. 1*b*. On the upper right-hand side, a graphitic layer showing an image of the basal plane with lattice spacing 0.34 nm can be recognized. From this, we calibrated the magnifications of the tubules. All micrographs were recorded at optimum focus[13], so that two dark lines in the tubule image correspond to side portions of the cylinders. The thinnest tube in this micrograph (labelled 1) is 0.75 nm in diameter, and is attached to a thicker (13-nm) tube (labelled 2). Tubules 1 and 2 are slightly curved, but tubule 3 (diameter 0.92 nm) spans straight across a 140-nm opening between two cementite particle agglomerates. The longest single-shell tubule was 700 nm long with a diameter of 0.9 nm.

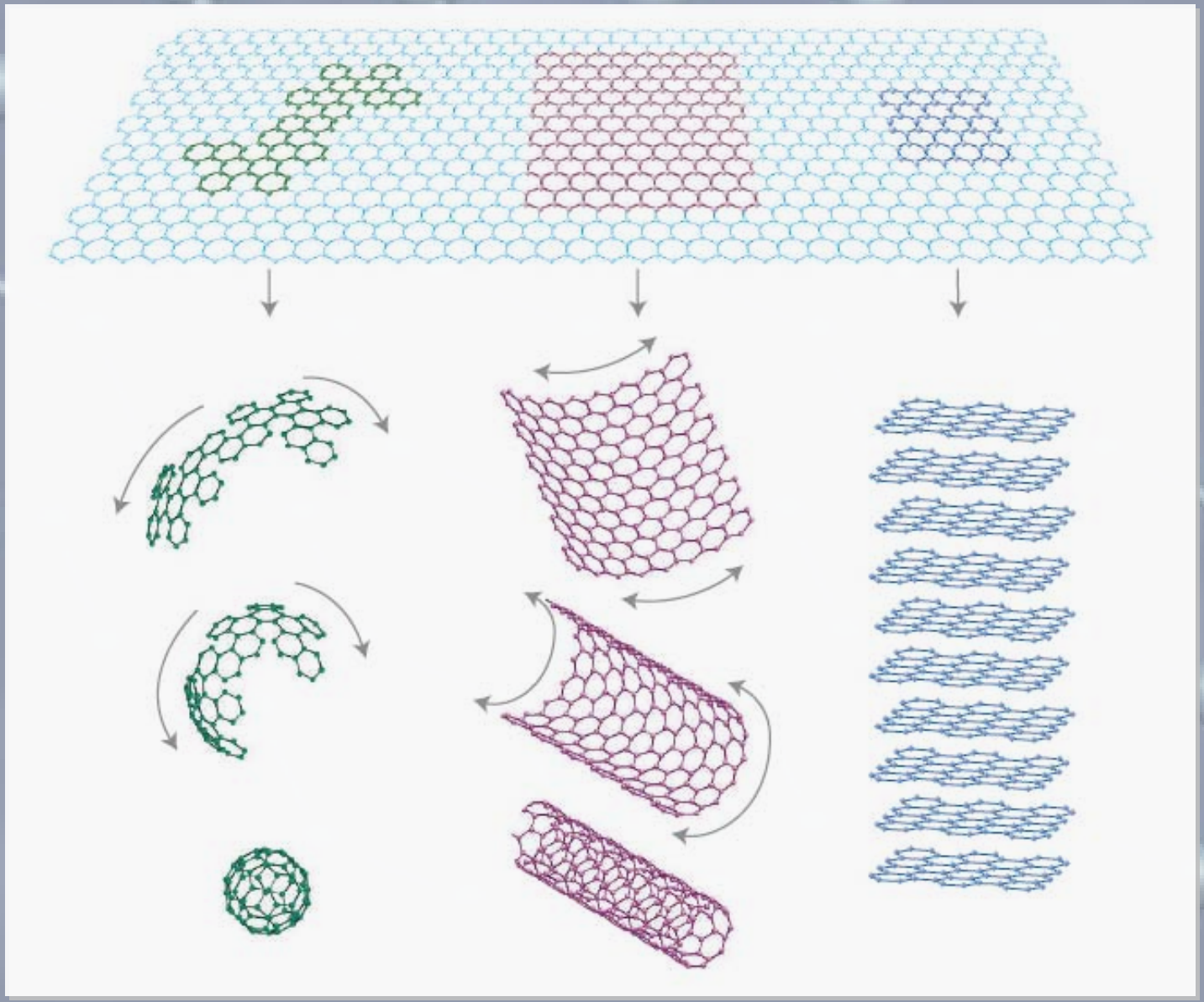
Short and terminated tubules are commonly observed (4 and 5 in Fig. 1*b*). The terminated tubule labelled 6 moved gradually during the observation so that one end appears to be fading out. No cementite particles were found on the free tips of the tubules, but they are entangled with cementite particle agglomerates. The tubules are capped in shapes that have been reported previously[14,15] (arrow 4 in Fig. 2).

We carefully measured the diameters on the electron micrographs of individual tubules. Figure 2 shows a histogram of the diameters of about 60 tubules, which range from about 0.7 nm to 1.6 nm. Two peaks are seen at tubule diameters of around 0.8 nm and 1.05 nm; we believe that these peaks are significant. The origin of the preferred tubule diameters is interesting to consider





ΓΡΑΦΕΝΙΟ: ΓΕΝΝΗΤΟΡΑΣ ΤΩΝ 0D, 1D, 3D ΓΡΑΦΙΤΙΚΩΝ ΜΟΡΦΩΝ



ΝΑΝΟΔΟΜΕΣ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ (2D ΓΡΑΦΕΝΙΟ 2004)

Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films

K. S. Novoselov,[1] A. K. Geim,[1*] S. V. Morozov,[2] D. Jiang,[1] Y. Zhang,[1] S. V. Dubonos,[2] I. V. Grigorieva,[1] A. A. Firsov[2]

We describe monocrystalline graphitic films, which are a few atoms thick but are nonetheless stable under ambient conditions, metallic, and of remarkably high quality. The films are found to be a two-dimensional semimetal with a tiny overlap between valence and conductance bands, and they exhibit a strong ambipolar electric field effect such that electrons and holes in concentrations up to 10^{13} per square centimeter and with room-temperature mobilities of ~10,000 square centimeters per volt-second can be induced by applying gate voltage.

The ability to control electronic properties of a material by externally applied voltage is at the heart of modern electronics. In many cases, it is the electric field effect that allows one to vary the carrier concentration in a semiconductor device and, consequently, change an electric current through it. As the semiconductor industry is nearing the limits of performance improvements for the current technologies dominated by silicon, there is a constant search for new, nontraditional materials whose properties can be controlled by the electric field. The most notable recent examples of such materials are organic conductors (*1*) and carbon nanotubes (*2*). It has long been tempting to extend the use of the field effect to metals [e.g., to develop all-metallic transistors that could be scaled down to much smaller sizes and would consume less energy and operate at higher frequencies than traditional semiconducting devices (*3*)]. However, this would require atomically thin metal films, because the electric field is screened at extremely short distances (<1 nm) and bulk carrier concentrations in metals are large compared to the surface charge that can be induced by the field effect. Films so thin tend to be thermodynamically unstable, becoming discontinuous at thicknesses of several nanometers; so far, this has proved to be an insurmountable obstacle to metallic electronics, and no metal or semimetal has been shown to exhibit any notable (>1%) field effect (*4*).

We report the observation of the electric field effect in a naturally occurring two-dimensional (2D) material referred to as few-layer graphene (FLG). Graphene is the name given to a single layer of carbon atoms densely packed into a benzene-ring structure, and is widely used to describe properties of many carbon-based materials, including graphite, large fullerenes, nanotubes, etc. (e.g., carbon nanotubes are usually thought of as graphene sheets rolled up into nanometer-sized cylinders) (*5–7*). Planar graphene itself has been presumed not to exist in the free state, being unstable with respect to the formation of curved structures such as soot, fullerenes, and nanotubes (*5–14*).

[1]Department of Physics, University of Manchester, Manchester M13 9PL, UK. [2]Institute for Microelectronics Technology, 142432 Chernogolovka, Russia.

*To whom correspondence should be addressed. E-mail: geim@man.ac.uk

The Nobel Prize in Physics 2010

Andre Geim, Konstantin Novoselov

- The Nobel Prize in Physics 2010
- Andre Geim
- Konstantin Novoselov

Photo: Sergeom, Wikimedia Commons

Andre Geim

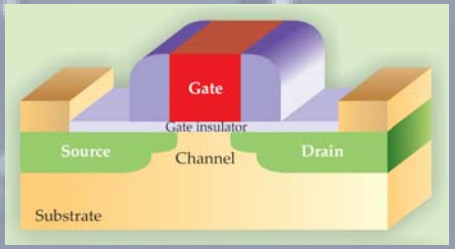
Photo: University of Manchester, UK

Konstantin Novoselov

The Nobel Prize in Physics 2010 was awarded jointly to Andre Geim and Konstantin Novoselov *"for groundbreaking experiments regarding the two-dimensional material graphene"*

- ✓ **Απομόνωση με μηχανική αποφλοίωση γραφίτη και παρατήρηση (οπτική, AFM) μονο- και ολιγοστρωματικού γραφενίου**
- ✓ **Μελέτη των ηλεκτρονικών χαρακτηριστικών του γραφενίου με την κατασκευή τρανζίστορ επίδρασης πεδίου (FET)**

(φορείς: οπές-ηλεκτρόνια, υψηλή συγκέντρωση και ευκινησία)



A. GEIM - ΣΥΝΟΠΤΙΚΑ ΒΙΟΓΡΑΦΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

MANCHESTER 1824

The University of Manchester

- ✓ >190 δημοσιεύσεις σε περιοδικά
- ✓ 14 άρθρα στα Nature και Science
- ✓ Nat. Mater., Nat. Phys., Nat. Nanotech., Phys. Rev. Lett.
- ✓ Περισσότερα από 30 άρθρα έχουν >100 αναφορές
- ✓ 3 άρθρα έχουν >2000 αναφορές

1982 MSc (Moscow Physical-Technical Institute, Russia)

1987 PhD (Institute of Solid State Physics, Chernogolovka)

1987-1990 Research Scientist (Institute for Microelectronics Technology)

1990-1994 Postdoctoral Fellow (Universities of Nottingham, Bath and Copenhagen)

1994-2000 Associate Professor (University of Nijmegen, Netherlands)

2001- Professor of Physics and Director of the Centre for Mesoscience & Nanotechnology (University of Manchester, UK)

K. NOVOSELOV - ΣΥΝΟΠΤΙΚΑ ΒΙΟΓΡΑΦΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

MANCHESTER 1824

The University of Manchester

- ✓ >90 δημοσιεύσεις σε περιοδικά
- ✓ 9 άρθρα στα Nature και Science
- ✓ >15 άρθρα Nat. Mater., Nat. Phys., Nat. Nanotech., Rev. Mod. Phys., Phys. Rev. Lett., PNAS
- ✓ 3 άρθρα έχουν >2000 αναφορές

1997 MSc (Moscow Physical-Technical Institute, Russia)

1997-1999 Researcher (Institute for Microelectronics Technology, Chernogolovka)

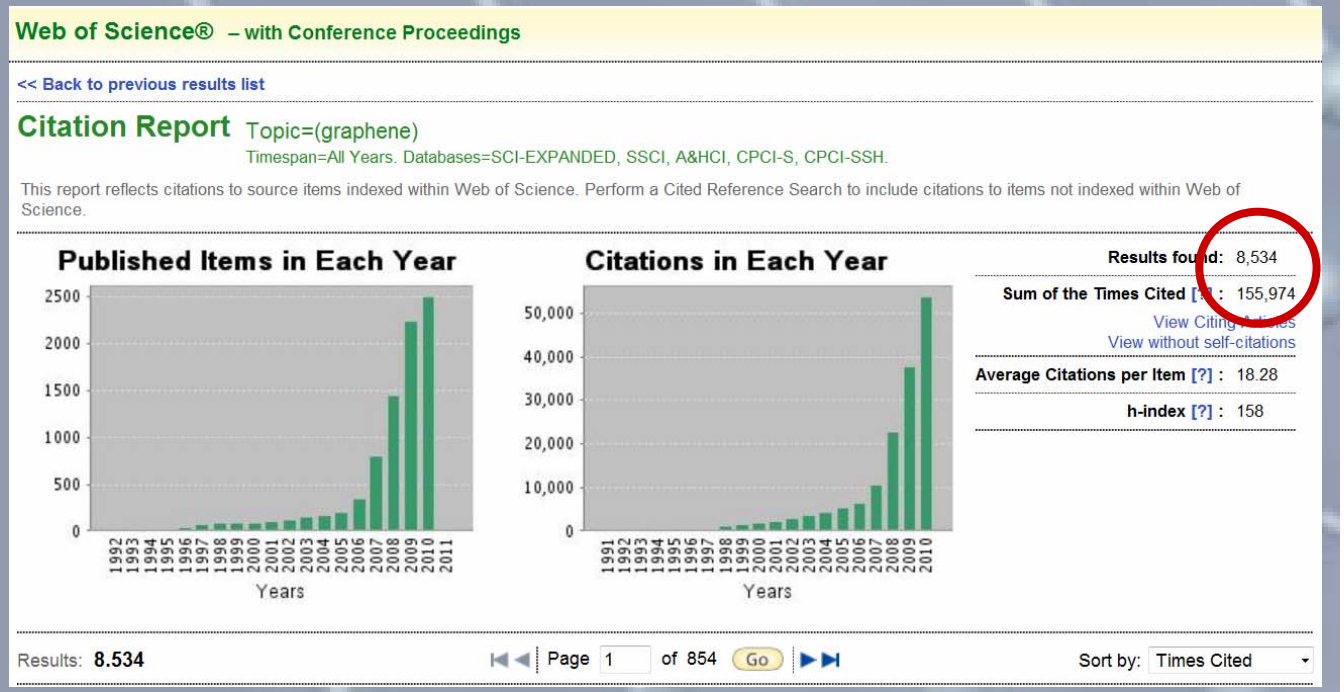
1999-2001 Researcher (University of Nijmegen, Netherlands)

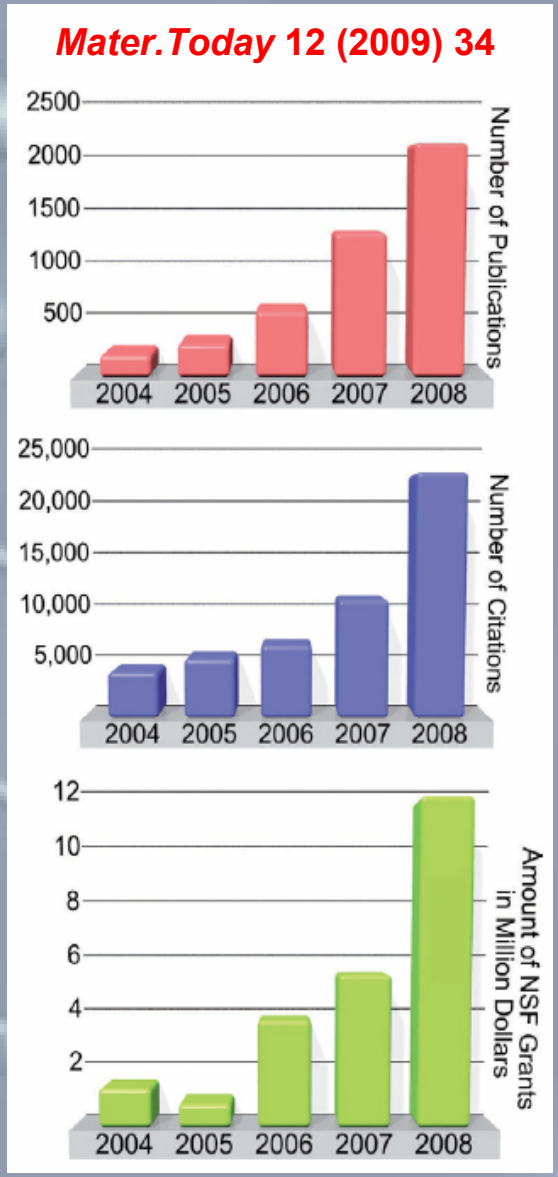
2001-2005 Researcher (University of Manchester, UK)

2004 PhD (University of Nijmegen, Netherlands)

2005- Research Fellow (University of Manchester, UK)

ΔΙΕΘΝΗΣ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΚΑΙ ΑΝΑΦΟΡΕΣ ΣΤΟ ΓΡΑΦΕΝΙΟ





- ✓ **Ραγδαία ετήσια αύξηση σχετικών δημοσιεύσεων και αναφορών, χρηματοδότησης**
- ✓ **Μοναδικές φυσικές ιδιότητες του γραφενίου και ευρύ πεδίο τεχνολογικών εφαρμογών**

Η ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΣΥΝΕΙΣΦΟΡΑ

Και Έλληνες στις έρευνες, που οδήγησαν στο Νόμπελ Φυσικής

Δημοσιεύτηκε: Παρασκευή, 8 Οκτωβρίου 2010 18:16

kathimerini.gr

ΕΛΛΑΔΑ: Τελευταία Νέα

Εκτύπωση | e-mail

Ημερομηνία : 08-10-10

Με ελληνικό χρώμα το φετινό Νόμπελ Φυσικής

Συμμετοχή ελλήνων επιστημόνων στην ανακάλυψη του γραφένιου, για το οποίο απονεμήθηκε το φετινό Νόμπελ Φυσικής.

...συμμετείχαν στις ερευνητικές προσπάθειες των δύο ρωσικής καταγωγής ...κοινού με το φετινό Νόμπελ Φυσικής 2010 που

Έντυπη Έκδοση
Ελευθεροτυπία, Πέμπτη 7 Οκτωβρίου 2010

ΓΡΑΦΕΝΙΟ

Έλληνες δούλεψαν για το Νόμπελ Φυσικής

Του ΓΙΩΡΓΟΥ ΚΙΟΥΣΗ

Έλληνες επιστήμονες από τα Πανεπιστήμια Πατρών και Ιωαννίνων συνεισέφεραν για το ατομικό... κοτετσόσυρμα, την ανακάλυψη της πιο λεπτής μεμβράνης άνθρακα, του «μαγικού» γραφένιου, που έδωσε στους δύο Ρώσους φυσικούς, τον Αντρέι Γκέιμ, 51 ετών (με ολλανδική υπηκοότητα) και τον Κονσταντίν Νοβοσέλοφ, 36 ετών (με ρωσική και βρετανική υπηκοότητα), καθηγητές στο Πανεπιστήμιο του Μάντσεστερ, το φετινό Νόμπελ Φυσικής.

small

Graphene

Subjecting a Graphene Monolayer to Tension and Compression**

*Georgia Tsoukleri, John Parthenios, Konstantinos Papagelis, Rashid Jalil, Andrea C. Ferrari, Andre K. Geim, Kostya S. Novoselov, and Costas Galiotis**

Compression Behavior of Single-Layer Graphenes

Otakar Frank,[†,∇] Georgia Tsoukleri,[†,*] John Parthenios,[†,*] Konstantinos Papagelis,[§] Ibtsam Riaz,[⊥] Rashid Jalil,[⊥] Kostya S. Novoselov,[⊥] and Costas Galiotis[†,§,*]

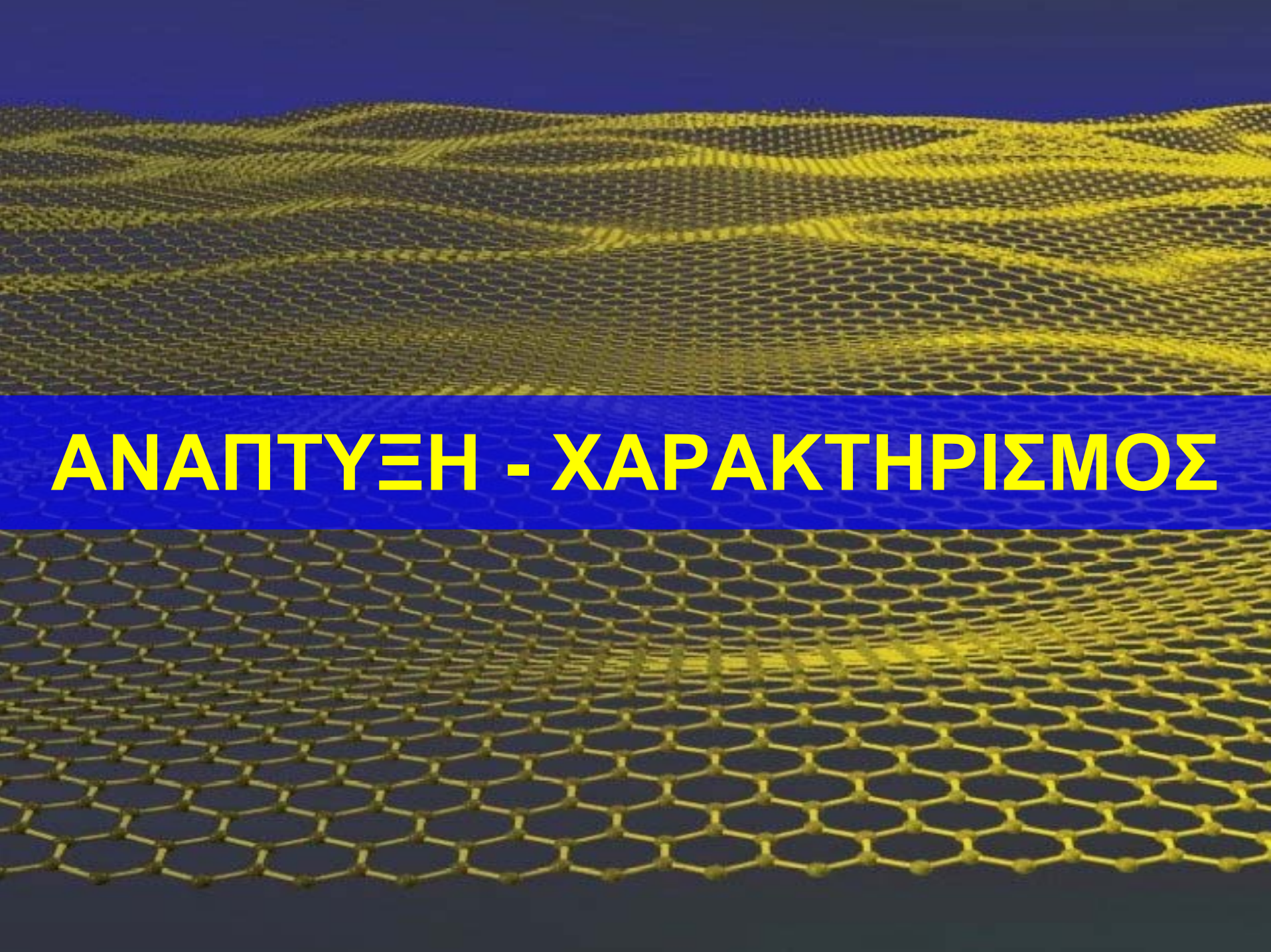
ARTI

NANO LETTERS
2007
Vol. 7, No. 9
2711−2717

Rayleigh Imaging of Graphene and Graphene Layers

C. Casiraghi,[†] A. Hartschuh,[‡] E. Lidorikis,[§] H. Qian,[‡] H. Harutyunyan,[‡] T. Gokus,[‡] K. S. Novoselov,[||] and A. C. Ferrari*,[†]

Cambridge University, Engineering Department, Cambridge, United Kingdom, Chemistry and Biochemistry Department and CeNS, Ludwig-Maximilians-



ΑΝΑΠΤΥΞΗ - ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ

Η ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ ΤΟΥ ΓΡΑΦΕΝΙΟΥ

					Low	Pristine	>50 μm	Yes	Silicon carbide
					Low	Pristine	>100 μm (can be wafer-size)	Yes	Hydrocarbons
Solvothermal synthesis	13	Not available	Low	Single and multiple	High	Chemically modified	Tens of μm to much smaller fragments	No	Ethanol
Unzipping carbon nanotubes	14	Inferior compared to Ref. 1.	Low	Single and multiple	High	Chemically modified	Nano ribbon with length of 4 μm	No	Multi-walled carbon nanotubes

- **<u>Μικρομηχανικός σχισμός</u>**

  “Γράφοντας” με γραφίτη πάνω σε SiO_2/Si

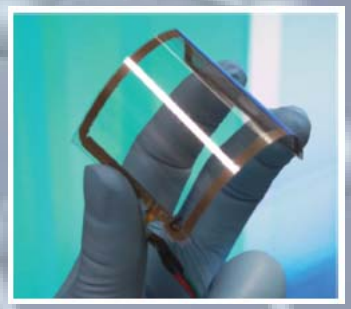
  “Ξεφλουδίζοντας” με κολλητική ταινία ένα κομμάτι γραφίτη

ΆΛΛΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ ΤΟΥ ΓΡΑΦΕΝΙΟΥ

- **Επιταξιακή ανάπτυξη (ηλεκτρονικές εφαρμογές)**

✓ **Επιταξιακή ανάπτυξη σε SiC (θέρμανση SiC, *T*> 1100 ^{o}C)**
Οι ασθενικές αλληλεπιδράσεις van der Waals που παρέχουν συνοχή με το υπόστρωμα δεν επηρεάζουν σημαντικά τις ηλεκτρονικές ιδιότητες

✓ **Επιταξιακή ανάπτυξη σε μεταλλικά υποστρώματα (Ru, Cu, Ni, Ir)**
Χρησιμοποιείται η ατομική δομή του μεταλλικού υποστρώματος για την πυρηνοποίηση του γραφενίου



- **Αναγωγή οξειδίου του γραφενίου με υδραζίνη**
Πυρόλυση αιθοξειδίου

- **Κοπή και άνοιγμα νανοσωλήνων άνθρακα με υπερμαγγανικό κάλιο και θειϊκό οξύ ή με εγχάραξη με πλάσμα μερικώς ενσωματωμένων νανοσωλήνων σε πολυμερές υμένιο**

http://en.wikipedia.org/wiki/Graphene

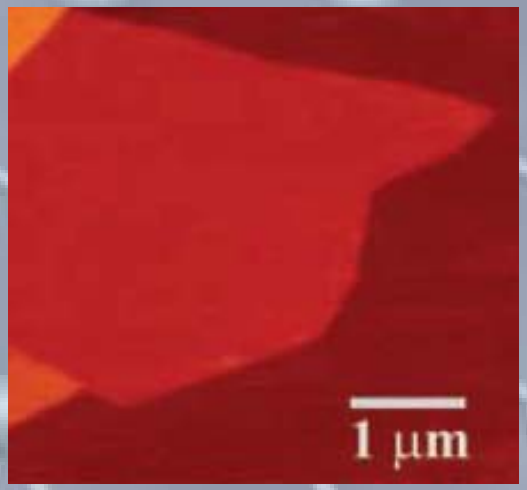
ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ ΜΟΝΟ- ΚΑΙ ΟΛΙΓΟΣΤΡΩΜΑΤΙΚΟΥ ΓΡΑΦΕΝΙΟΥ

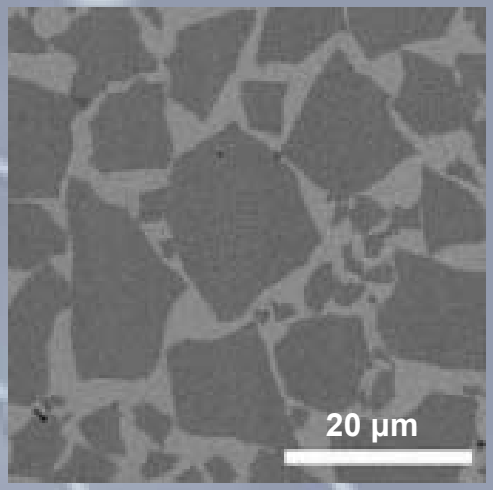
✓ **Παρασκευή γραφενίου (μικρομηχανικός σχισμός) → μικρός αριθμός κρυσταλλιτών ανάμεσα σε χιλιάδες νιφάδες γραφίτη (~1 cm²)**

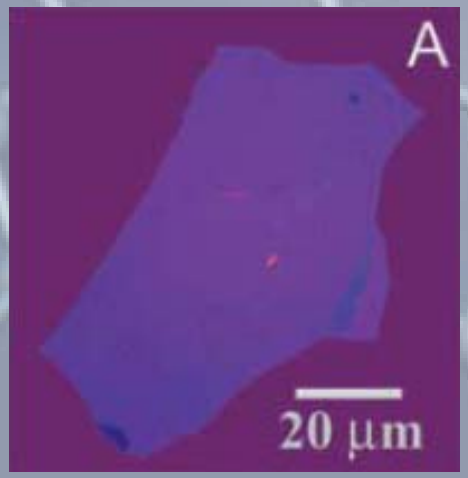
- **AFM, TEM:**
  Πρακτικά αδύνατη η εύρεση μεμονωμένων κρυσταλλιτών σε τόσο μεγάλη επιφάνεια και με τόσα πολλά αντικείμενα…

- **SEM:**
  Ταχύτερη διαδικασία, αδύνατη η εκτίμηση του αριθμού των στρώσεων

- **Οπτική μικροσκοπία**
  Το γραφένιο καθίσταται ορατό επάνω σε στρώμα SiO_2 πάχους 300±10 nm με υπόστρωμα Si!!!

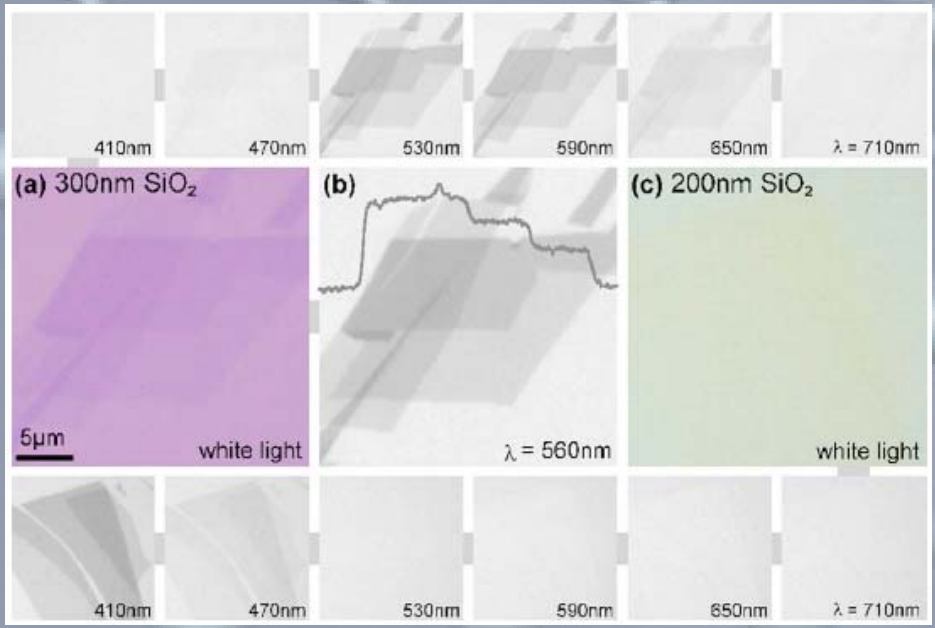


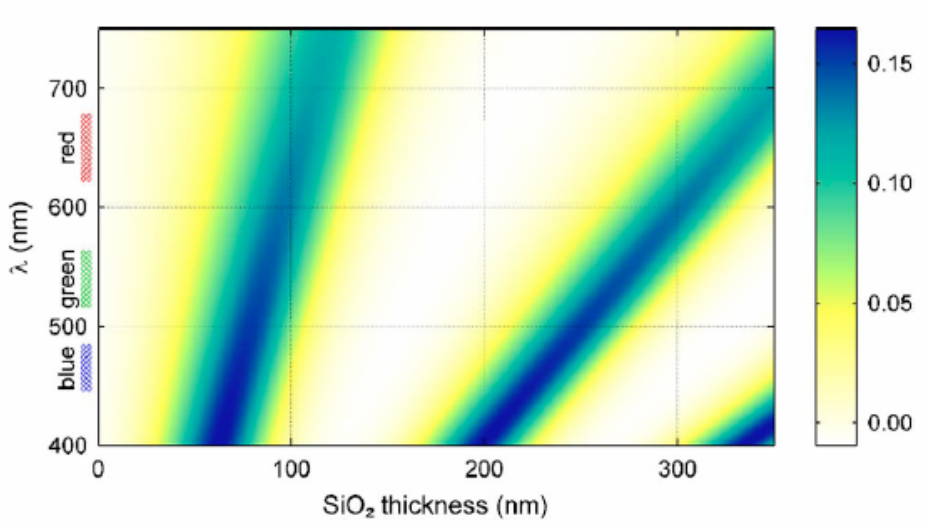


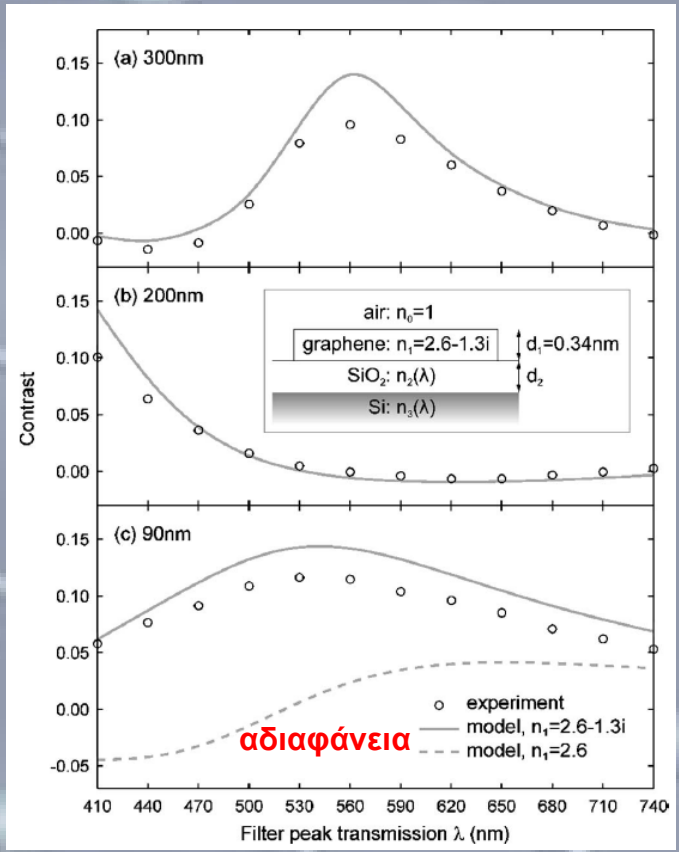


Mater.Today 13 (2010) 28

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΟΠΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗΣ ΤΟΥ ΓΡΑΦΕΝΙΟΥ







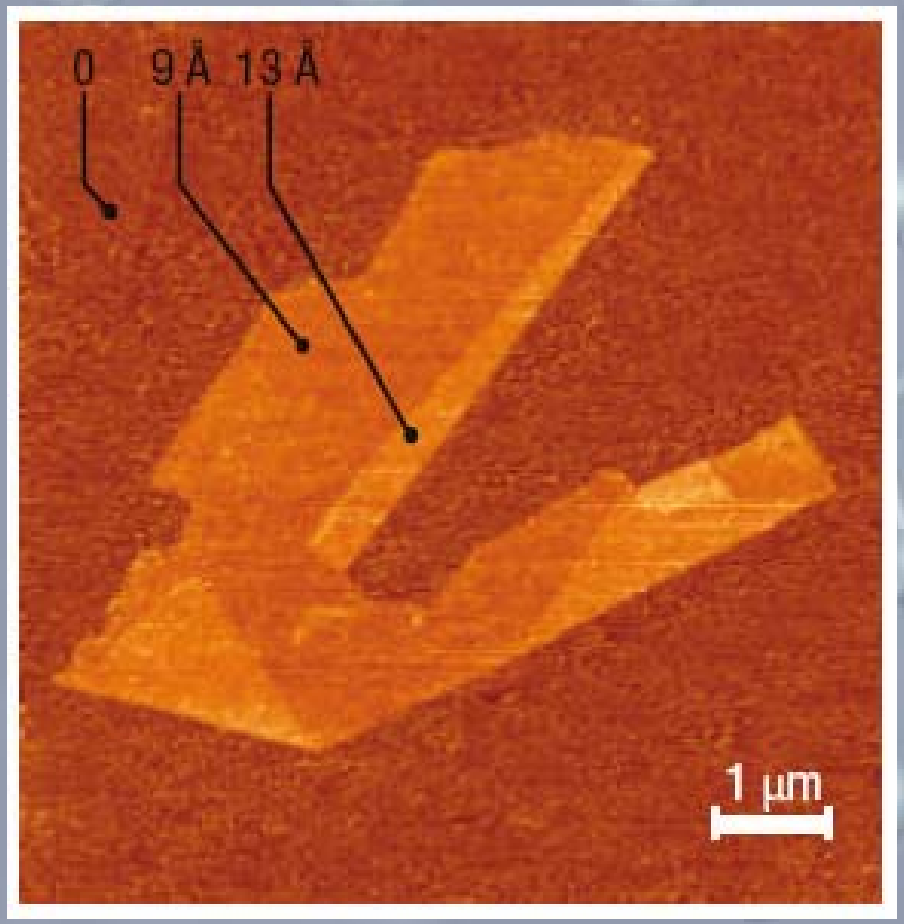
Δοκιμή σε άλλους μονωτές:

- ✓ 50 nm Si_3N_4 (μπλε φως)
- ✓ 90 nm PMMA (λευκό φως)

APL 91 (2007) 063124

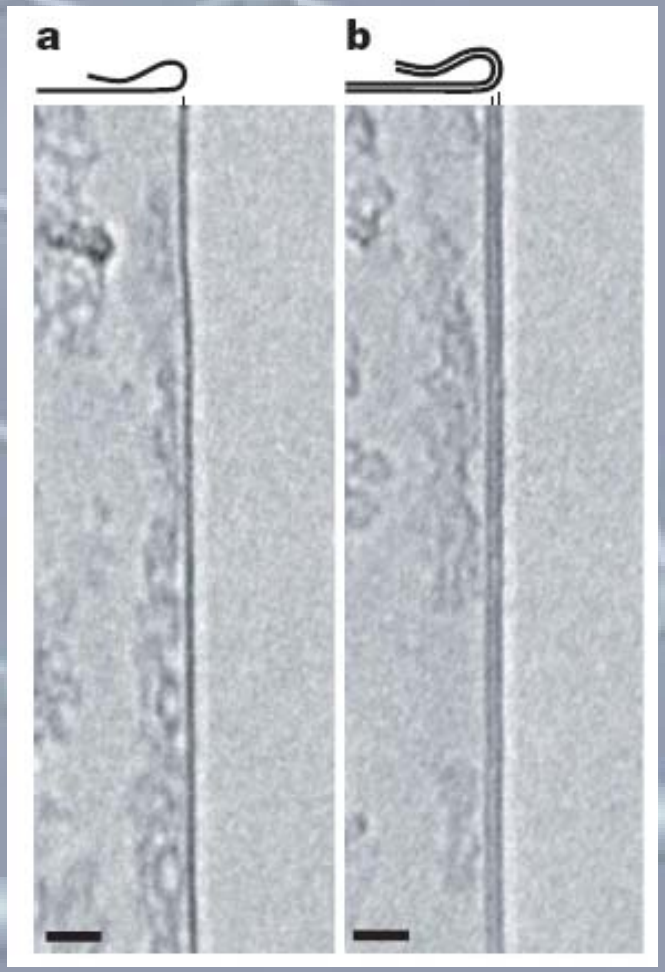
ΕΥΡΕΣΗ ΤΟΥ ΑΡΙΘΜΟΥ ΤΩΝ ΣΤΡΩΣΕΩΝ (AFM, TEM)

AFM: Ακριβής αποτίμηση μόνο του σχετικού ύψους (διπλώσεις ή μερική επικάλυψη)



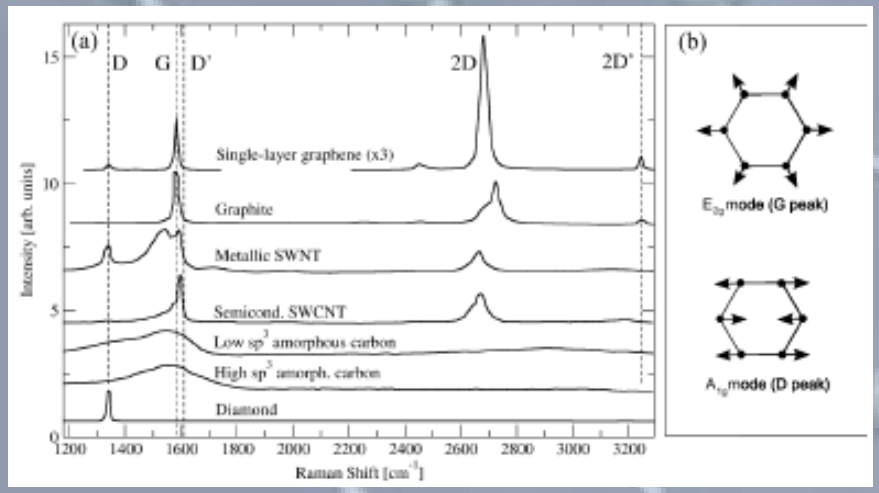
PNAS 102 (2005) 10451

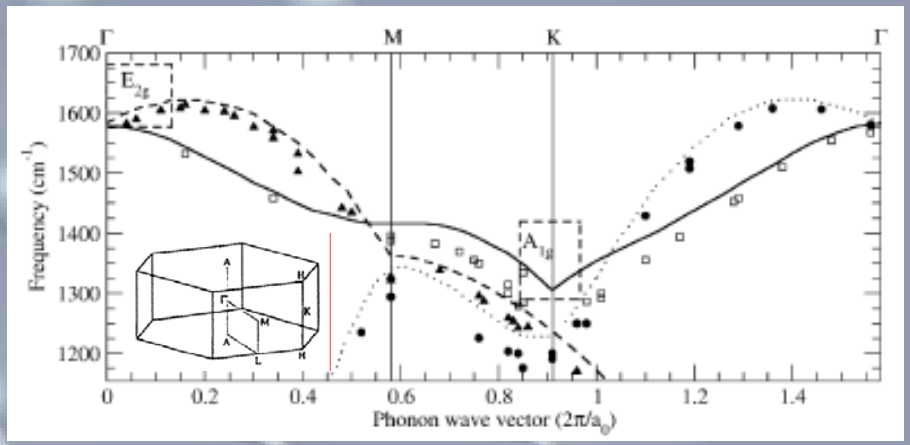
TEM: Εκτίμηση του αριθμού στρώσεων σε διπλώσεις και πτυχώσεις



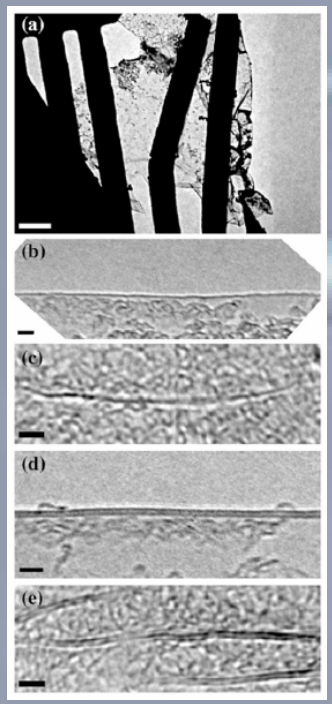
Nature 446 (2007) 60

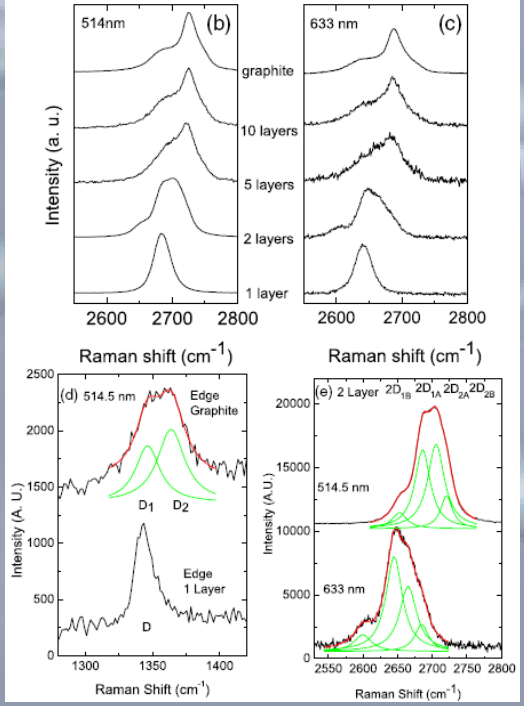
ΕΥΡΕΣΗ ΤΟΥ ΑΡΙΘΜΟΥ ΤΩΝ ΣΤΡΩΣΕΩΝ (RAMAN)

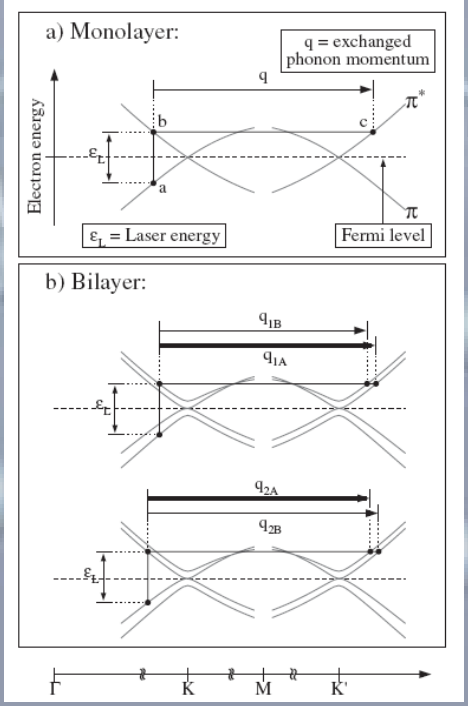




cond-mat/1005.4900 (2010)

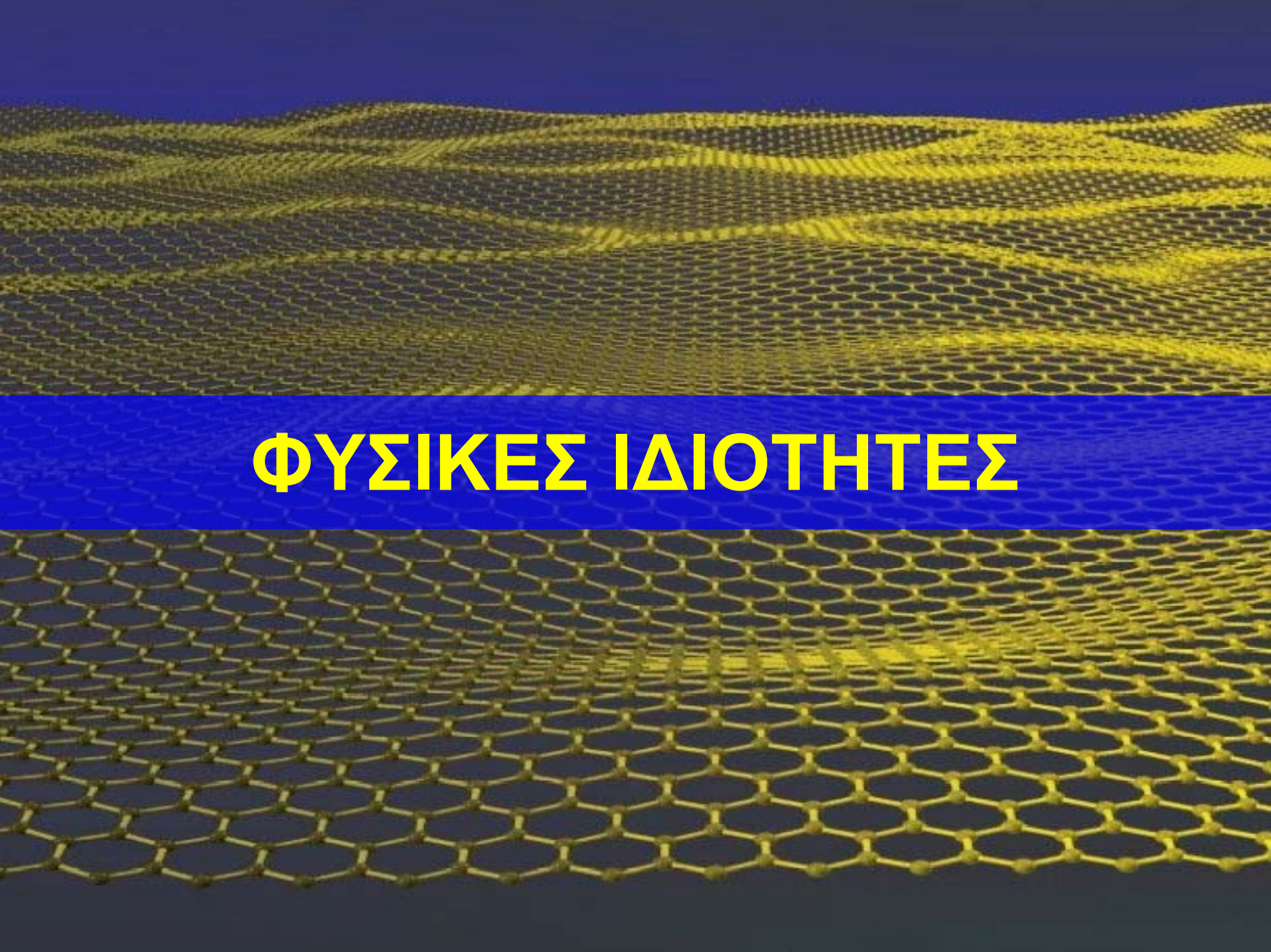






Διπλός συντονισμός για την κορυφή 2D

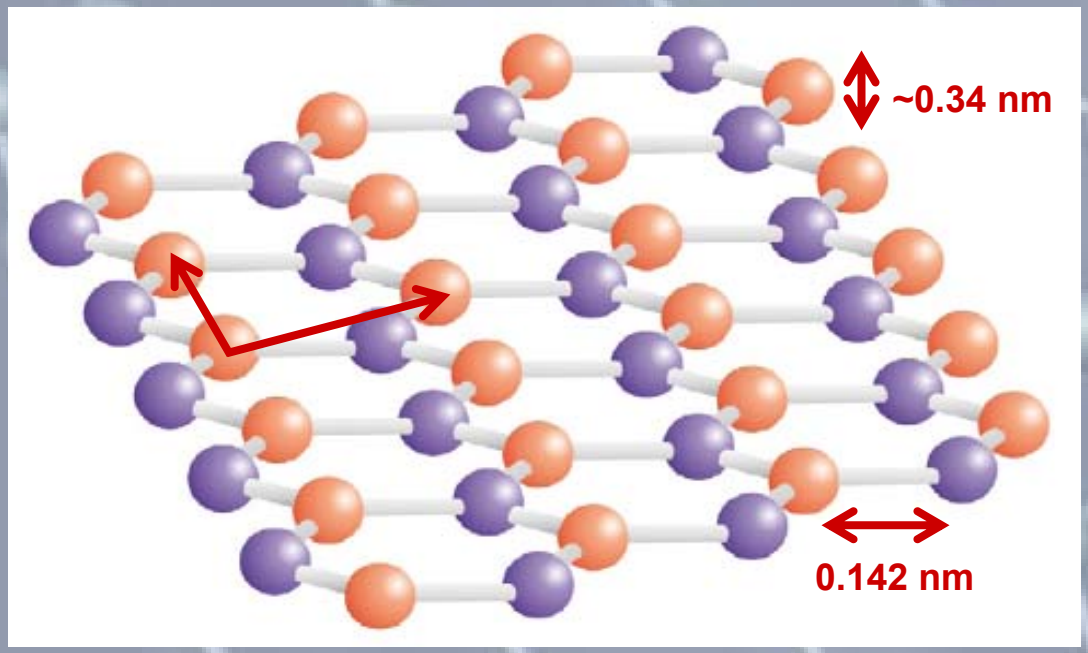
PRL 97 (2006) 187401

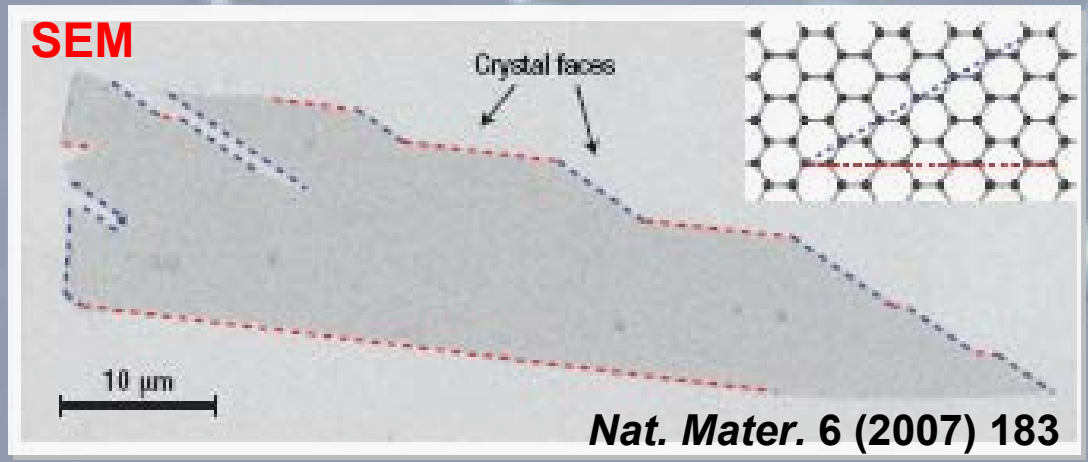


ΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

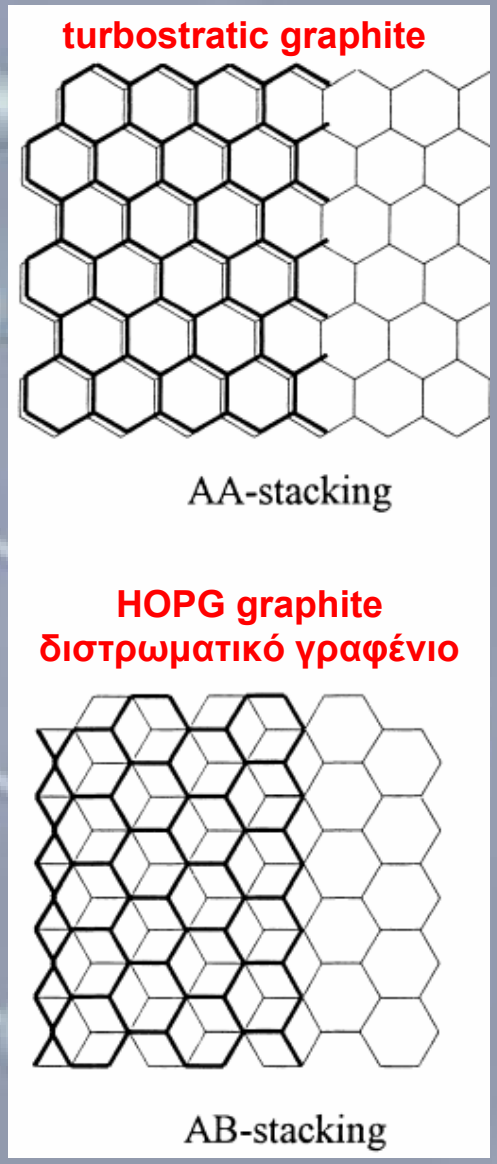
ΔΟΜΗ ΜΟΝΟ- ΚΑΙ ΔΙΣΤΡΩΜΑΤΙΚΟΥ ΓΡΑΦΕΝΙΟΥ

Η δομή αποτελείται από δύο ισοδύναμα υποπλέγματα





Nat. Mater. 6 (2007) 183

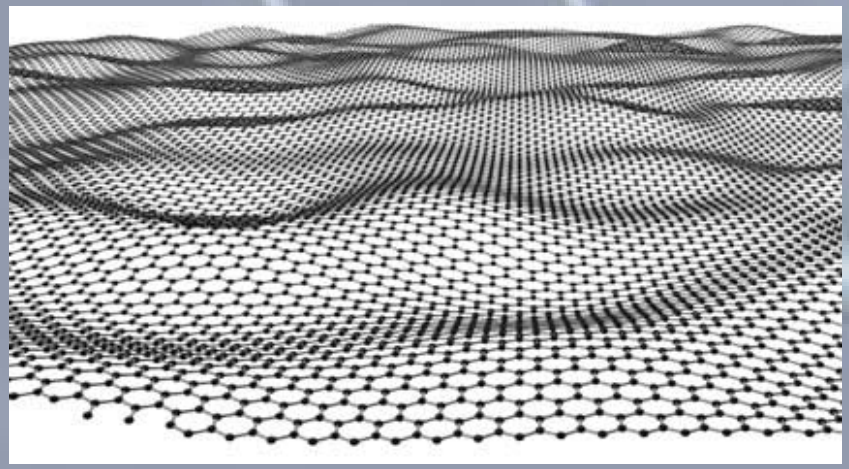


2D OR NOT 2D

- Τέλειοι δισδιάστατοι κρύσταλλοι δεν υπάρχουν σε ελεύθερη κατάσταση {θεωρητικές (Peierls, Landau) και πειραματικές μελέτες (λεπτά υμένια)}
- Το γραφένιο είναι ένα δισδιάστατο υλικό υψηλής κρυσταλλικής ποιότητας (τα ηλεκτρόνια ταξιδεύουν χωρίς σκέδαση αποστάσεις ~1 μm)
- ✓ Το γραφένιο είτε υποστηρίζεται από υποστρώματα όγκου είτε ενσωματώνεται σε τρισδιάστατες μήτρες

Μελέτη TEM αιωρούμενου μονοστρωματικού γραφενίου για διάφορες γωνίες πρόσπτωσης

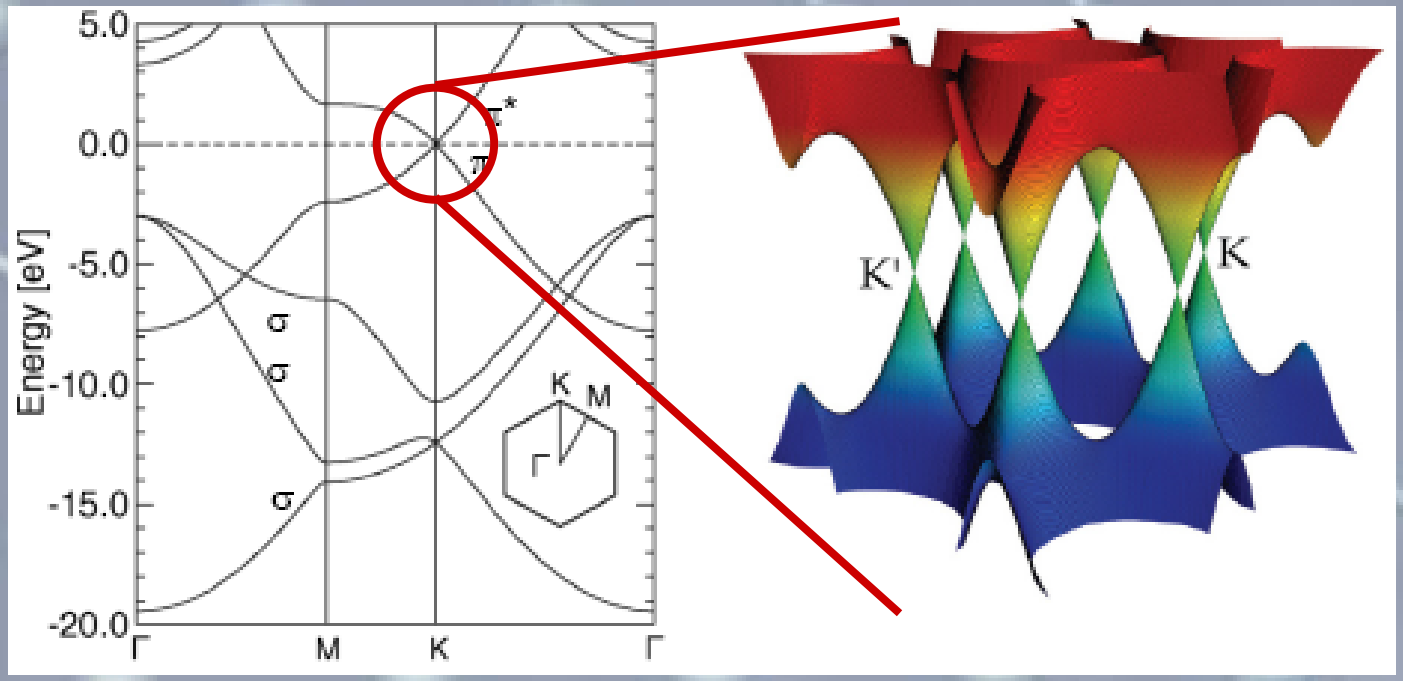
Nature 446 (2007) 60



- Εμφάνιση στατικών πτυχώσεων ύψους ~1 nm
- Σημαντική ελάττωση στο διστρωματικό γραφένιο και εξάλειψη για περισσότερες στρώσεις

ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΔΟΜΗ ΤΟΥ ΓΡΑΦΕΝΙΟΥ

❖ **Το γραφένιο είναι ένα ημιμέταλλο (ημιαγωγός μηδενικού χάσματος)**



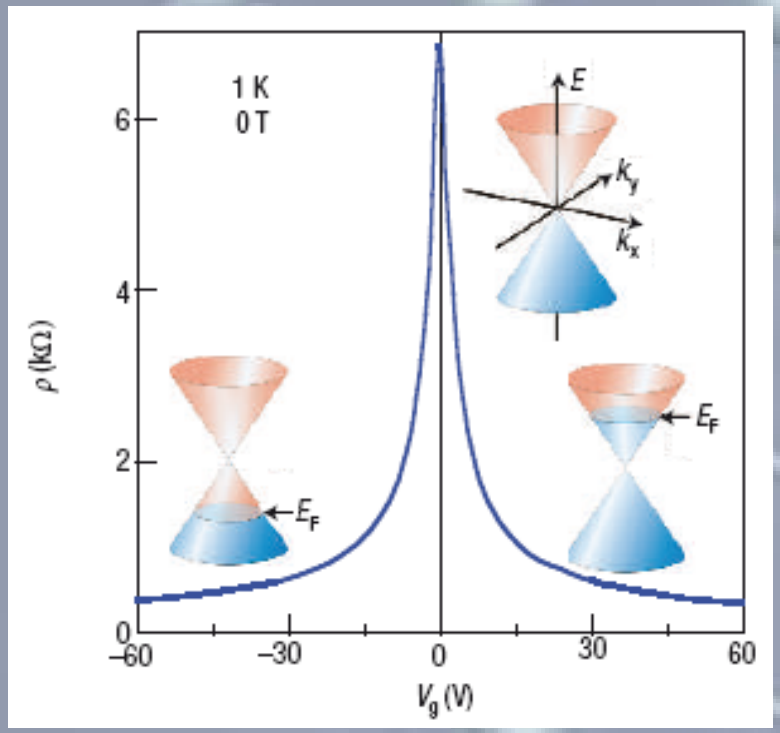
✓ **Τα δύο υποπλέγματα άνθρακα του γραφενίου σχηματίζουν δύο ενεργειακές ταινίες που διασταυρώνονται στα όρια της BZ δημιουργώντας την κωνική διασπορά στα σημεία K, K'**

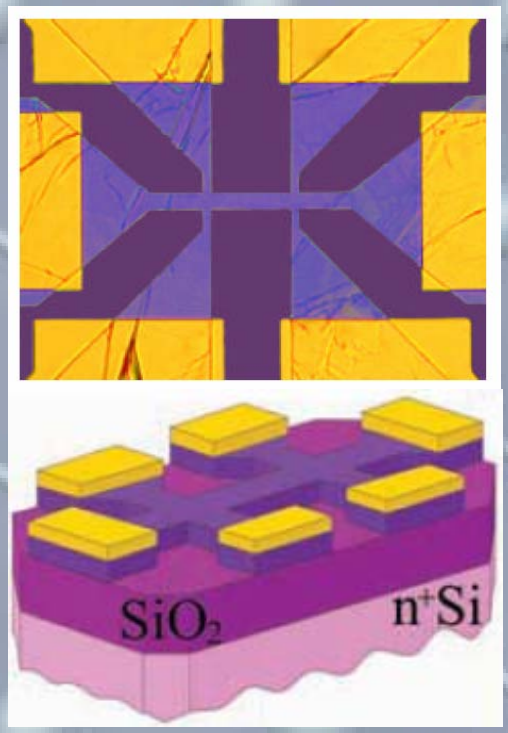
✓ **Γραμμική διασπορά των φορέων → σχετικιστικά σωμάτια μηδενικής μάζας (όπως τα φωτόνια), φερμιόνια Dirac (ταχύτητα Fermi, $\upsilon_F \approx c/300$)**

Nat. Mater. 6 (2007) 183 / *Mater.Today* 10 (2007) 20

ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

❖ **Αμφιπολικό φαινόμενο επίδρασης πεδίου (φορείς: οπές-ηλεκτρόνια)**





n_{max}~ 10^{13} cm^{-2}

μ~ 20000 $cm^2V^{-1}s^{-1}$
(100000 $cm^2V^{-1}s^{-1}$ RT,
200000 $cm^2V^{-1}s^{-1}$ LT)

Si: μ_e= 1400 $cm^2V^{-1}s^{-1}$

Ουσιαστικά ανεξάρτητη της n

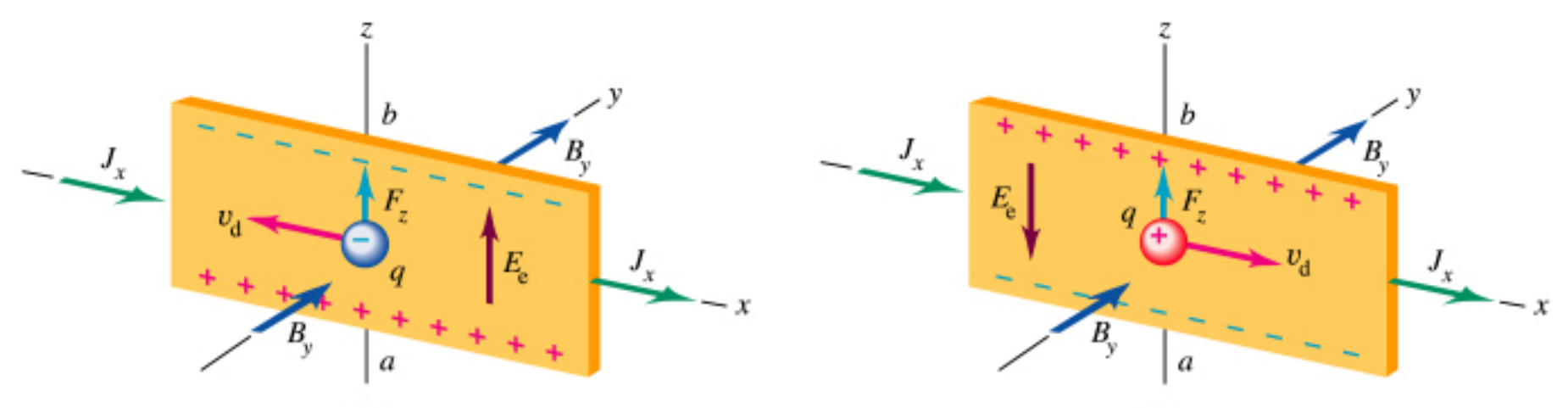
✓ **ΒΑΛΛΙΣΤΙΚΗ ΔΙΑΔΟΣΗ των φορέων στην μικρομετρική κλίμακα (μέση ελεύθερη διαδρομή ~0.3 μm, *T*= 300 K)**

✓ **Εξαιρετική ηλεκτρονική ποιότητα του γραφενίου**

Science 306 (2004) 666
Nat. Mater. 6 (2007) 183

ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ HALL ΚΑΙ ΚΒΑΝΤΙΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ HALL

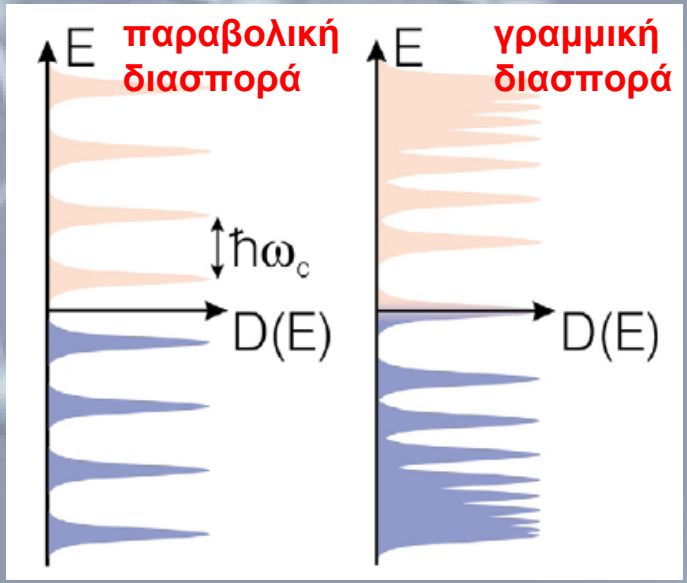
➢ **Ανάπτυξη διαφοράς δυναμικού κάθετα στο ρεύμα και το μαγνητικό πεδίο**



✓ **Κβαντομηχανικά οι τροχιές των φορέων είναι διάκριτες (κβάντωση Landau)**

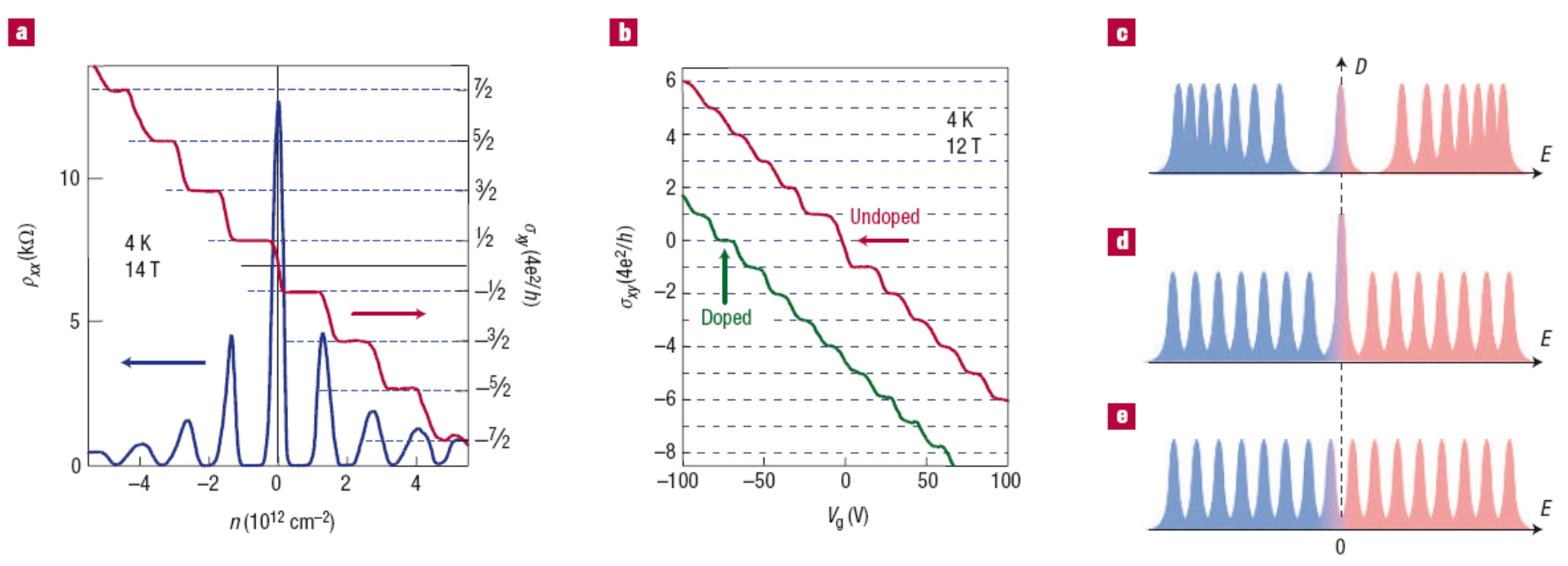
✓ **Σε υψηλά πεδία οι στάθμες Landau είναι πολλαπλά εκφυλισμένες**

✓ **Η αγωγιμότητα Hall παίρνει διάκριτες τιμές $\sigma = \nu e^2/h$ (ν= 1, 2,…, παράγοντας πλήρωσης)**



ΑΝΩΜΑΛΟ ΚΒΑΝΤΙΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ HALL ΣΤΟ ΓΡΑΦΕΝΙΟ

❖ **Στο μονοστρωματικό γραφένιο η ύπαρξη στάθμης Landau μηδενικής ενέργειας μετατοπίζει την ακολουθία των πλατώ κατά ½**



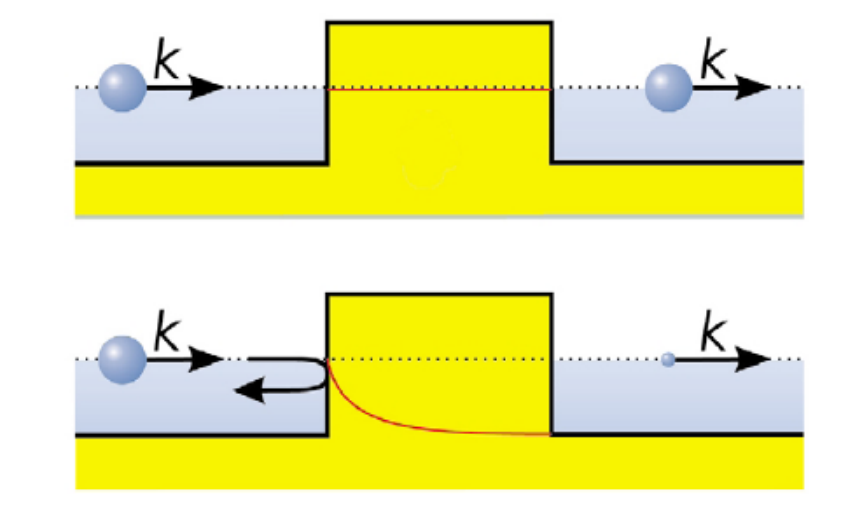
✓ **Στο γραφένιο το κβαντικό φαινόμενο Hall παρατηρείται ακόμη και σε θερμοκρασία δωματίου (*B*= 29 T)** Science 315 (2007) 1379

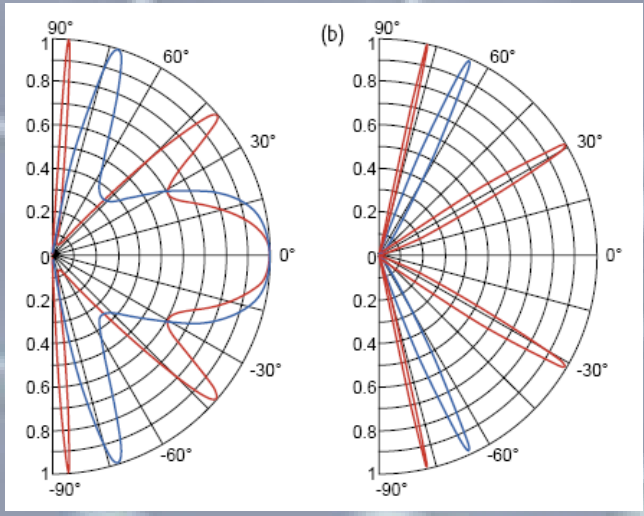
✓ **Στο διστρωματικό γραφένιο λείπει το πλατώ στο σημείο Dirac (V_g= 0) λόγω του ότι οι φορείς είναι φερμιόνια Dirac αλλά με μάζα (m≈ 0.05 m_0)**

✓ **Η χημική προσθήκη φορέων αποκαθιστά την κανονική ακολουθία**

ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΣΗΡΑΓΓΟΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΔΟΞΟ KLEIN

- Ένα κλασσικό σωμάτιο δεν μπορεί να διαδοθεί σε μια περιοχή όπου η δυναμική ενέργεια είναι μεγαλύτερη από την ενέργεια του (φράγμα δυναμικού)
- Στην κβαντομηχανική η διάδοση είναι πιθανή (φαινόμενο σήραγγος) και η πιθανότητα αυτή μειώνεται εκθετικά με το ύψος του φράγματος
- Στο γραφένιο, η πιθανότητα είναι 1, ανεξάρτητα με το ύψος και το εύρος του φράγματος (παράδοξο Klein - δεν μπορούμε να μετρήσουμε ούτε τη θέση)





✓ Ένα τρανζίστορ γραφενίου δεν θα μπορούσε να κλείσει για καμία τάση V_g, στο διστρωματικό γραφένιο το φαινόμενο αυτό εξαλείφεται εκτός από κάποιες “μαγικές” γωνίες

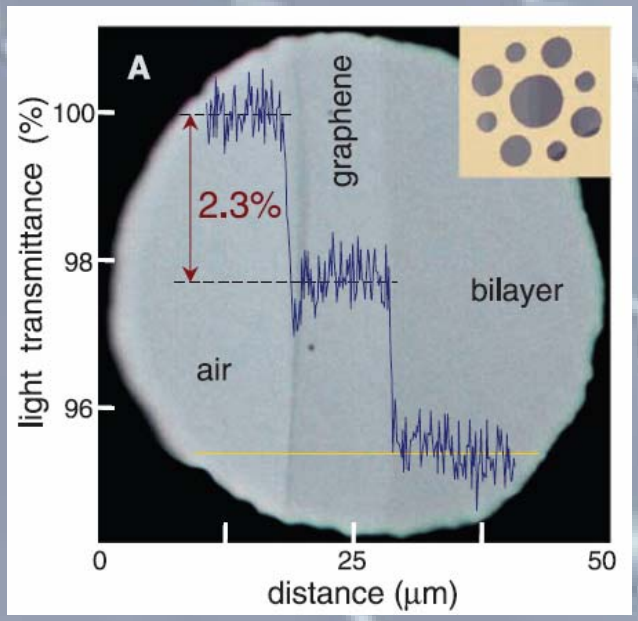
Nat. Phys. 2 (2006) 620

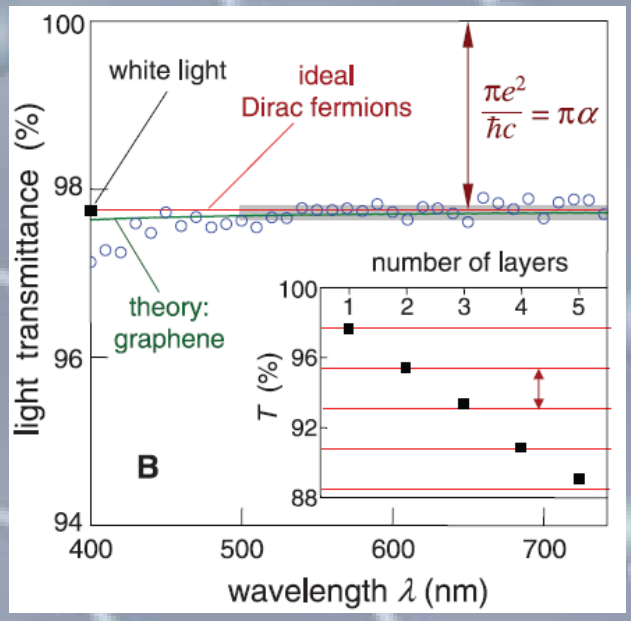
ΟΠΤΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ - ΑΔΙΑΦΑΝΕΙΑ ΤΟΥ ΓΡΑΦΕΝΙΟΥ

- **Το μονοστρωματικό γραφένιο απορροφά ένα σημαντικό ποσοστό του προσπίπτοντος λευκού φωτός (πα≈ 2.3%), ανακλαστικότητα <0.1%**

  (α≈ 1/137: σταθερά λεπτής υφής, καθορίζει την αλληλεπίδραση ταχέως κινούμενων φορτίων-ΗΜ ακτινοβολίας)

***Science* 320 (2008) 1308**

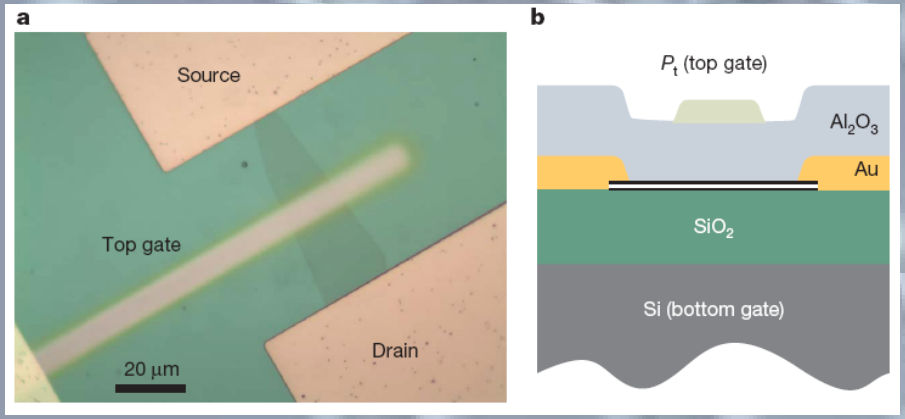


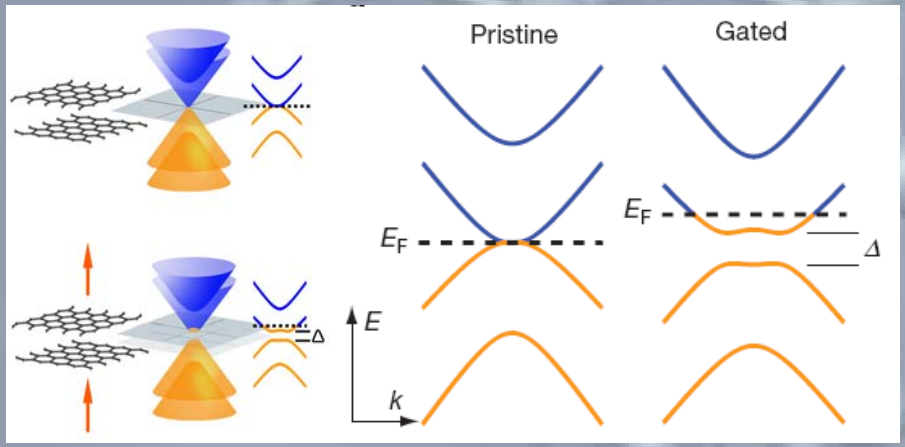


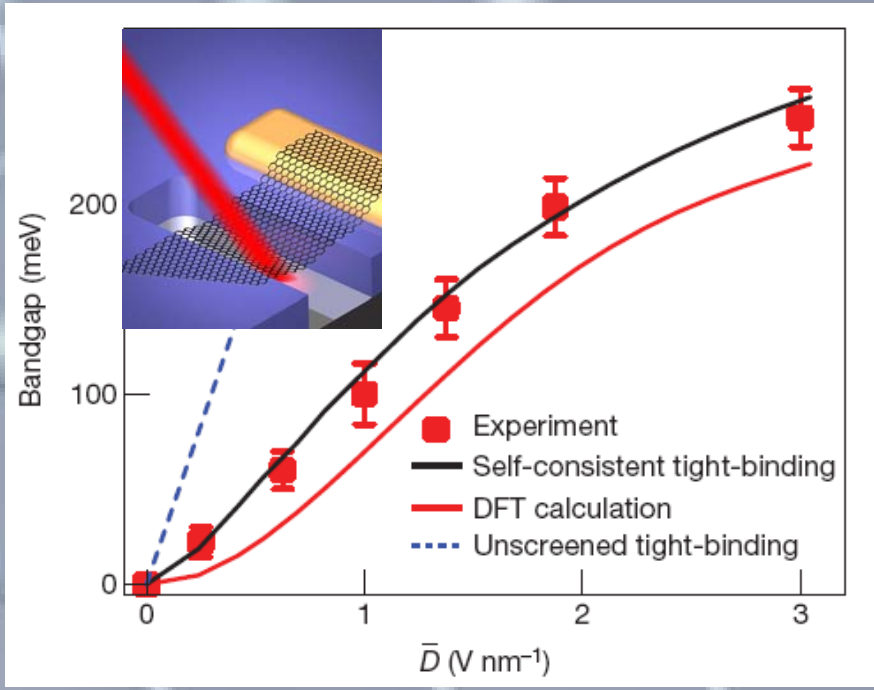
- ➢ **Η αδιαφάνεια του γραφενίου (1-T) είναι ανεξάρτητη του μήκους κύματος και αυξάνει κατά 2.3% με κάθε επιπλέον φύλλο**
- ✓ **Η σταθερά λεπτής υφής μπορεί να καθοριστεί με την μέτρηση της αδιαφάνειας ενός φύλλου γραφενίου**

ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΧΑΣΜΑ ΤΟΥ ΔΙΣΤΡΩΜΑΤΙΚΟΥ ΓΡΑΦΕΝΙΟΥ

❖ **Συνεχώς μεταβαλλόμενο ενεργειακό χάσμα 0-250 meV με την εφαρμογή κατάλληλης τάσης στο διστρωματικό γραφένιο**





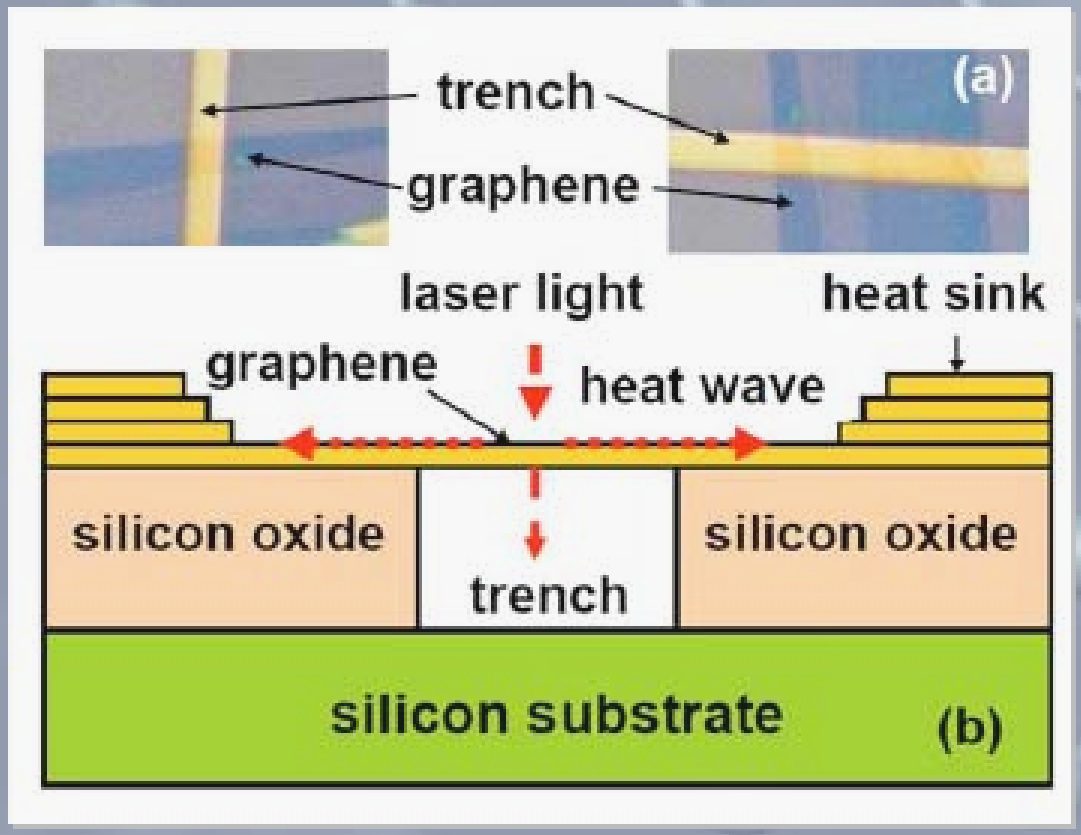


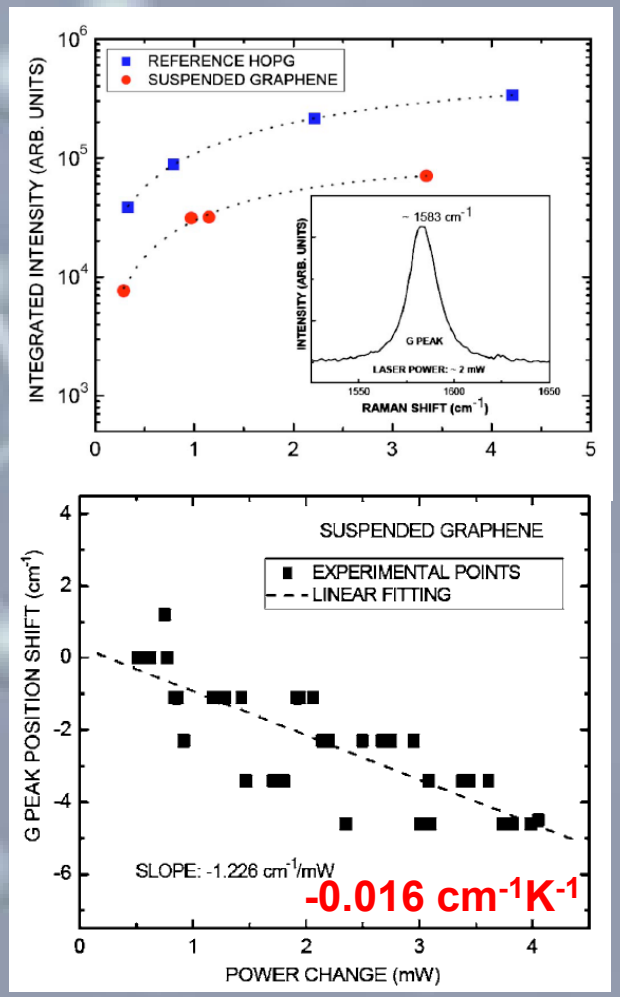
Nature 459 (2009) 820

✓ **Ανάπτυξη καινοτόμων νανοφωτονικών διατάξεων για την παραγωγή, ενίσχυση και ανίχνευση υπερύθρου φωτός**

ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ

- ***K*= 3080-5150 $Wm^{-1}K^{-1}$ / *K*= 4840(440)-5300(480) $Wm^{-1}K^{-1}$ (Raman)**
  {*APL* 92 (2008) 151911 / *Nano Lett.* 8 (2008) 902}
  Si: 149, Al: 237, Au: 318, Cu: 401 $Wm^{-1}K^{-1}$
  Diamond: 900-2320, CNTs: ~3000 $Wm^{-1}K^{-1}$





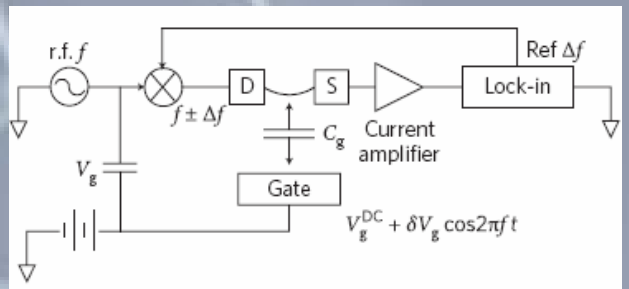
✓ **Διαχείριση θερμότητας σε κυκλώματα νανοηλεκτρονικής**

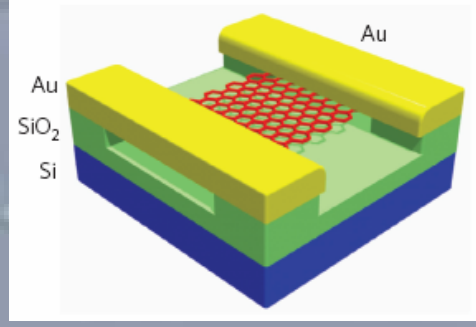
ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΔΙΑΣΤΟΛΗΣ

- ✓ Το γραφένιο εμφανίζει αρνητική θερμική διαστολή λόγω της χαλάρωσης που εμφανίζει ο ακουστικός τρόπος δόνησης ZA με την ελάττωση της απόστασης C-C

❖ α= -7x10^{-6} K^{-1} (R.T.), a= -1x10^{-6} K^{-1} (30 K)

{Nat. Nanotech. 4 (2009) 562, *Nanotech.* 21 (2010) 165204}





Graphite: -1.28x10^{-6}K^{-1} (in-plane)
(anisotropic) 2.72x10^{-5}K^{-1} (along *c*-axis)

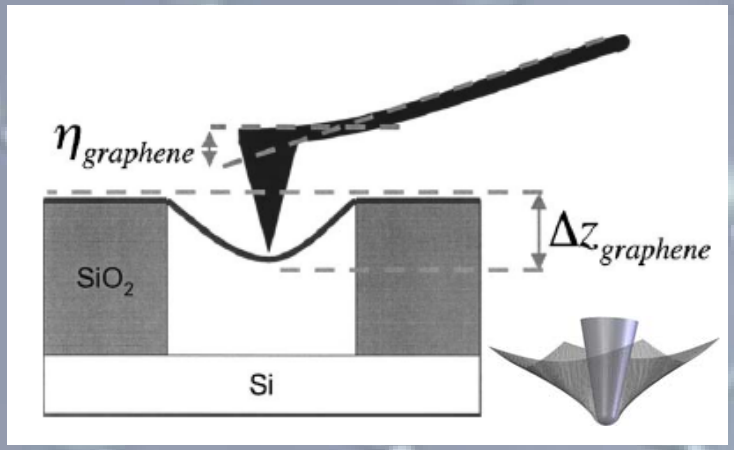
SWCNTs: -1.5 $\pm$ 2x10^{-6}K^{-1} (radial)
0 $\pm$ 1x10^{-6}K^{-1} (axial)

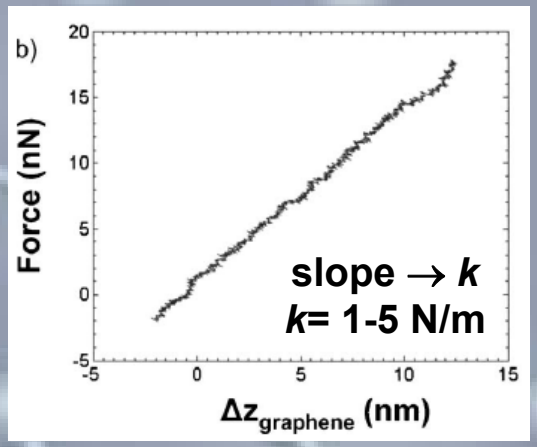
Diamond: 3x10^{-6} K^{-1}

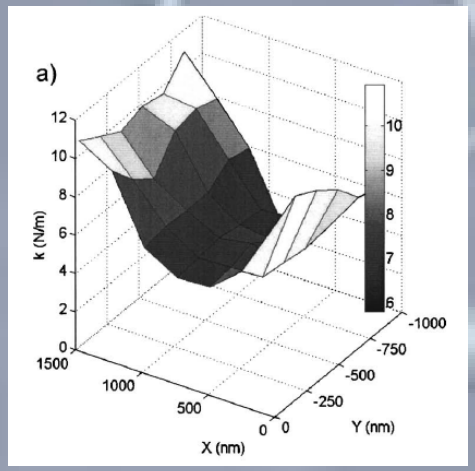
- ✓ Έλεγχος της παραμόρφωσης νανοδιατάξεων με τη θερμοκρασία

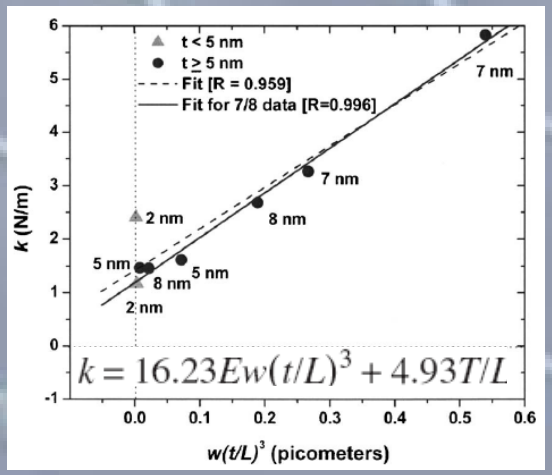
ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

- **Μέτρο ελαστικότητας Young (ακαμψία), *E*= 0.5-1 TPa νανοεντυπώσεις με ακίδα AFM αιωρούμενου γραφενίου**
  {*J. Vac. Sci. Tech.* 25 (2007) 2558 / *Science* 321 (2008) 385}





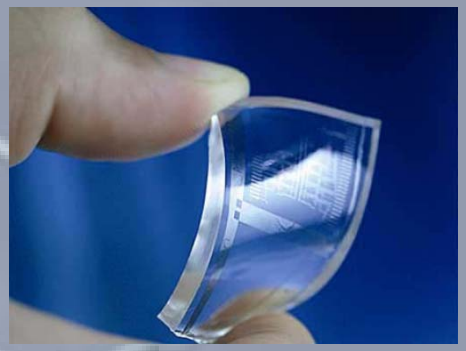


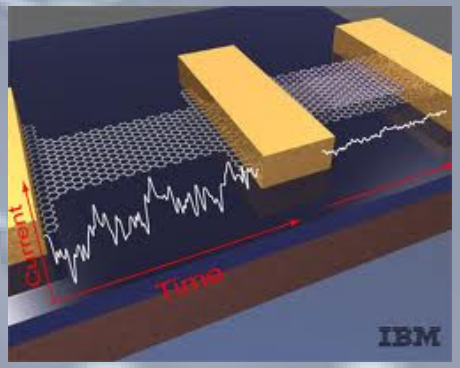


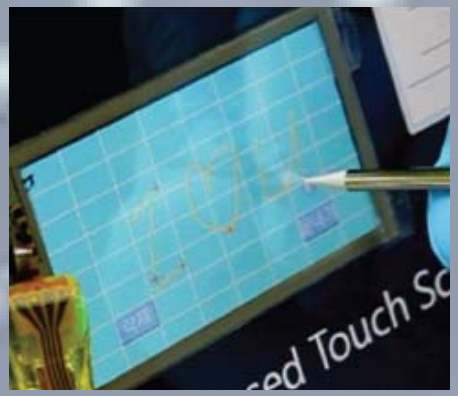
✓ **Νανοηλεκτρομηχανικά συστήματα (ανίχνευση μάζας, δύναμης)**

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

- ✓ **Εύκαμπτες ηλεκτρονικές διατάξεις**
  ταχύτερα και μικρότερα τρανζίστορς με μικρότερη κατανάλωση ενέργειας και απώλεια θερμότητας από το Si, διακόπτες, μόνιμες μνήμες
- ✓ **Ελπιδοφόρο υλικό για διαχείριση σημάτων στην συχνοτική περιοχή των THz**
- ✓ **Διαφανή αγώγιμα ηλεκτρόδια και υμένια για φωτοβολταϊκά και διατάξεις υγρών κρυστάλλων**
- ✓ **Πυκνωτές μεγάλης χωρητικότητας και μπαταρίες (υψηλός λόγος επιφάνεια/μάζα)**
- ✓ **Κατασκευή σύνθετων υλικών υψηλής αντοχής**
- ✓ **Χημικοί αισθητήρες, ανίχνευση μεμονωμένων μορίων αερίων (NO_2, NH_3) ή ατόμων (10^{-21} g)**
- ✓ **Κατασκευή βιοδιατάξεων ανίχνευσης βακτηρίων και ως αισθητήρες DNA, αντιβακτηριδιακή δράση**

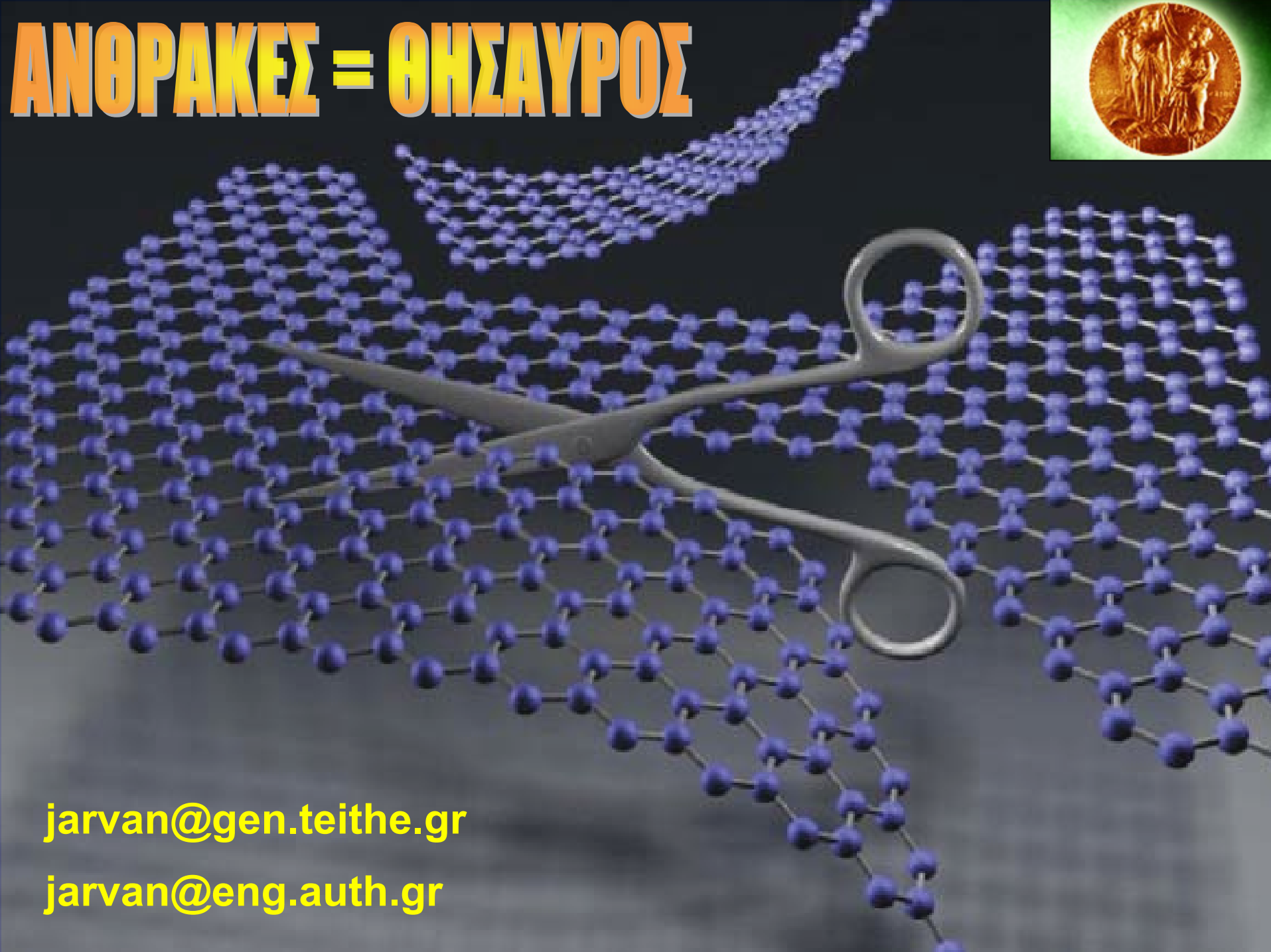






Mater.Today 12 (2009) 34

ΑΝΘΡΑΚΕΣ = ΘΗΣΑΥΡΟΣ



jarvan@gen.teithe.gr

jarvan@eng.auth.gr