

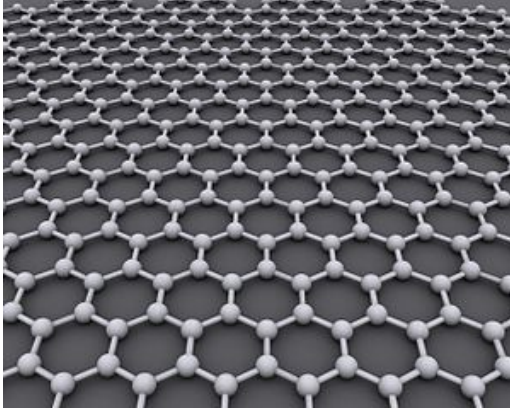
# Топлопроводимост и електропроводимост на графен

---

Антон Димитров Зяпков- Физика №60206

# Графен

---



Графена е двуизмерна алотропна форма на въглерода. Той се състои от единичен слой  $sp^2$  хибридизирани въглеродни атоми в хексагонална решетка. Изучаването му е интересно поради физичните свойства които проявява, а именно огромната му здравина за лекотата му и добрите топло и елктропроводящи свойства, на които ще обърне внимание по- долу.

Макар, че теоретично свойствата му са предсказани доста по- рано 1947г. за първи път през 2004 г. е изолиран единичен слой атоми по Scotch tape метода, откривателите на който получават Нобелова награда през 2010г.

Особените свойства на графена са отговорни за множеството и разнообразните му приложения на премиер като транзистор, прозрачен проводник за слънчеви панели, материал за суперкондензатори и др.

# Топлопроводимост

---

$$\vec{q} = -k\vec{\nabla}T$$

Където:

$\vec{q}$  е количеството топлина, протичащо за единица време през единица площ

$k$  е коефициента на топлопроводност измерван в  $Wm^{-1}K^{-1}$

$\vec{\nabla}T$  е градиента на температурата

# Електропроводимост

---

$$\vec{j} = \sigma \vec{E}$$

Където:

$\vec{j}$  е плътността на тока

$\sigma$  е коефициента на електропроводност

$\vec{E}$  е приложеното електрично поле

# Подвижност на зарядите

---

$$v_d = \mu E$$

Където:

$v_d$  е дрейфовата скорост на зарядите

$\mu$  е тяхната подвижност

$E$  е приложеното електрично поле

Връзка с проводимостта:

$$\sigma = ne\mu$$

Където:

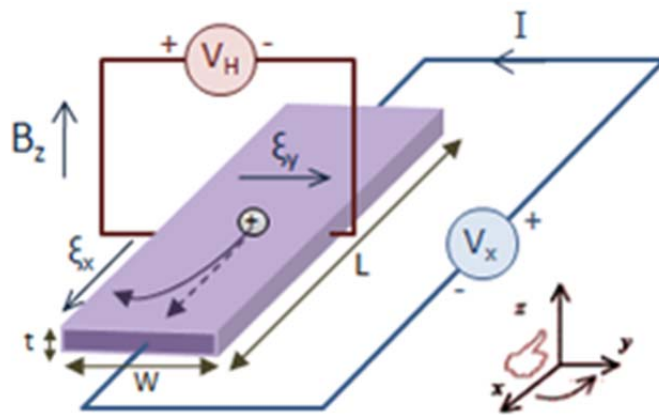
$n$  е плътността на зарядите

$e$  е заряда на електрона

# Методи за измерване

---

- 1) Измерване на електропроводимостта- волт- амперна характеристика за графена трудността е осигуряването на електрически контакти към изследваните обекти поради малкия им размер
- 2) Измерване на подвижността на зарядите
  - a) Ефект на хол



Базира се на ефекта на Хол и съответно се нарича Холова подвижност за да намерим подвижността използваме:

$$\mu = \frac{\sigma V_H t}{IB}$$

- b) Полеви транзистор

Използва FET и измерената подвижност се нарича полева. Можем да работим в режим на насищане и в линеен режим.

При насищане т.е. при фиксирана напрежение на гейта увеличаваме напрежението на дрейна докато не получим насищане на тока. Тогава транзистора се описва от уравнението:

$$I_D = \frac{\mu C_i W}{2 L} (V_{GS} - V_{th})^2$$

В линейната част (омов режим) имаме:

$$I_D = \mu C_i \frac{W}{L} \left( (V_{GS} - V_{th}) V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right)$$

### 3) Измерване на топлопроводимостта

#### а) Преходно- планарен източник



Обикновено две половинки от пробата образуват сандвич с планарния детектор/нагревател. Като отчитаме зависимостта на температурата от времето в сензора можем да определим коефициентите на топлопредаване и дифузия

б) Лазерен „фалш“ метод- тънка проба нагряваме бързо и силно локално с помощта на лазер за да измерим коефициента на дифузия

# Експериментални данни

---

Източник: High-Field Electrical and Thermal Transport in Suspended Graphene

Vincent E. Dorgan,<sup>1,2</sup> Ashkan Behnam,<sup>1,2</sup> Hiram J. Conley,<sup>3</sup> Kirill I. Bolotin,<sup>3</sup> and Eric Pop<sup>1,2,4</sup>

<sup>1</sup>Micro and Nanotechnology Lab, Univ. Illinois at Urbana-Champaign, IL 61801, USA

<sup>2</sup>Dept. Electrical & Computer Eng., Univ. Illinois at Urbana-Champaign, IL 61801, USA

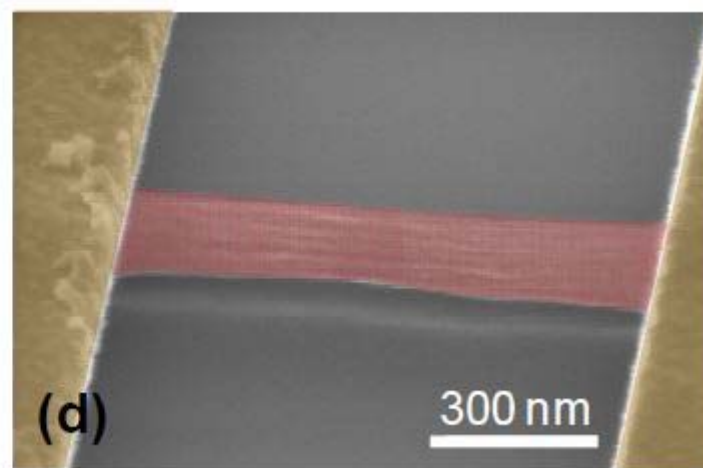
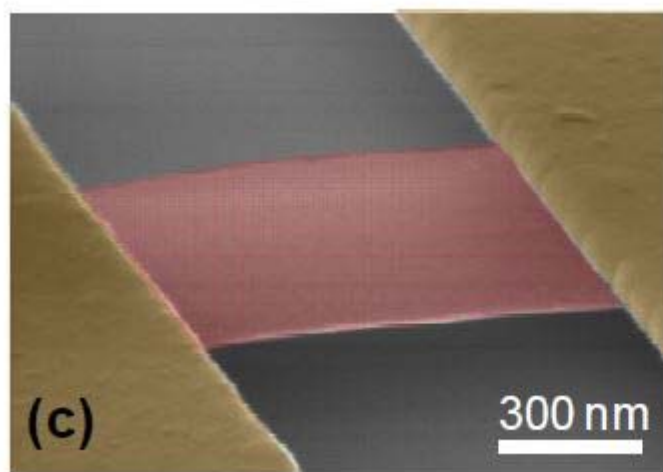
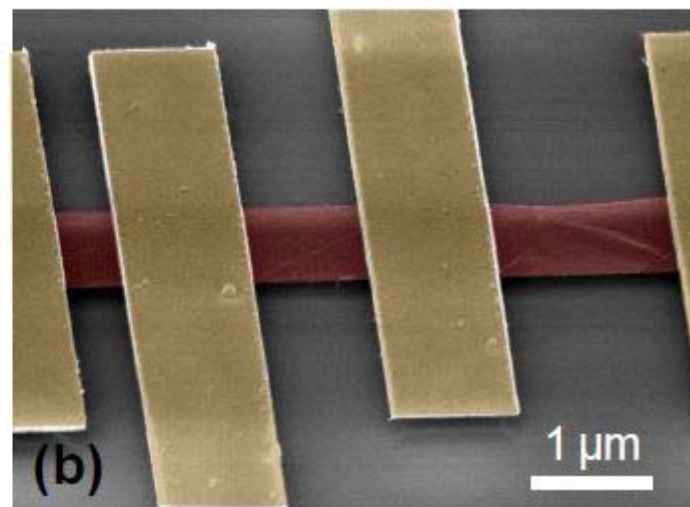
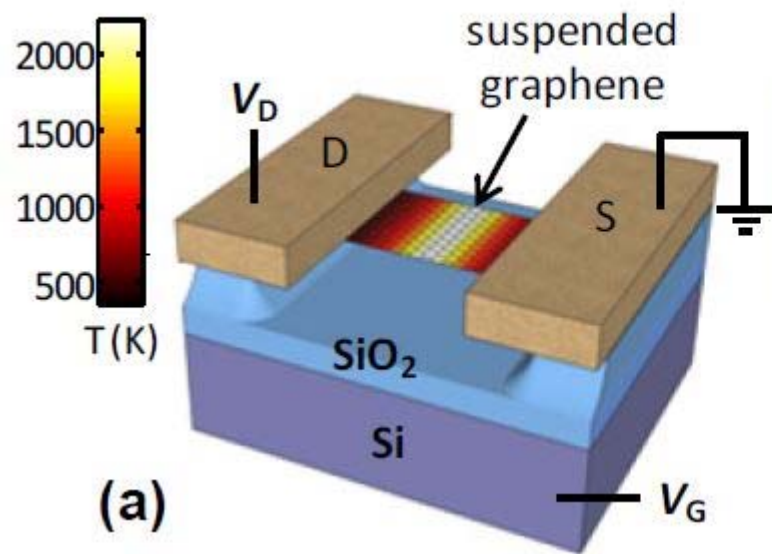
<sup>3</sup>Dept. Physics & Astronomy, Vanderbilt University, Nashville, TN 37235, USA

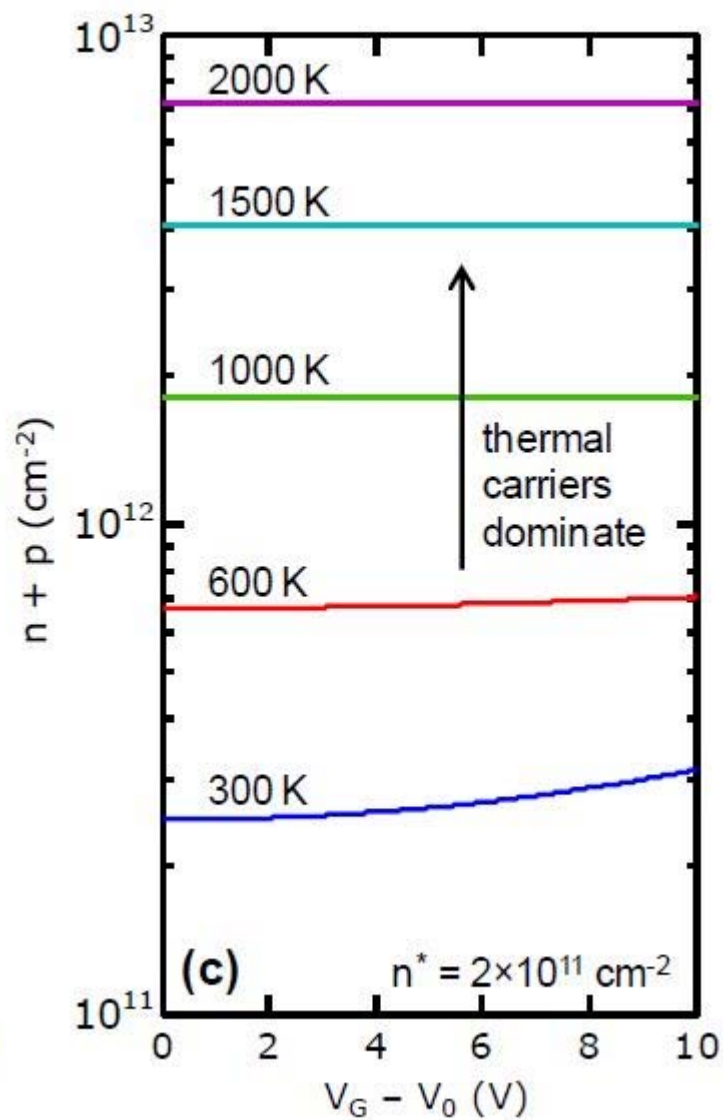
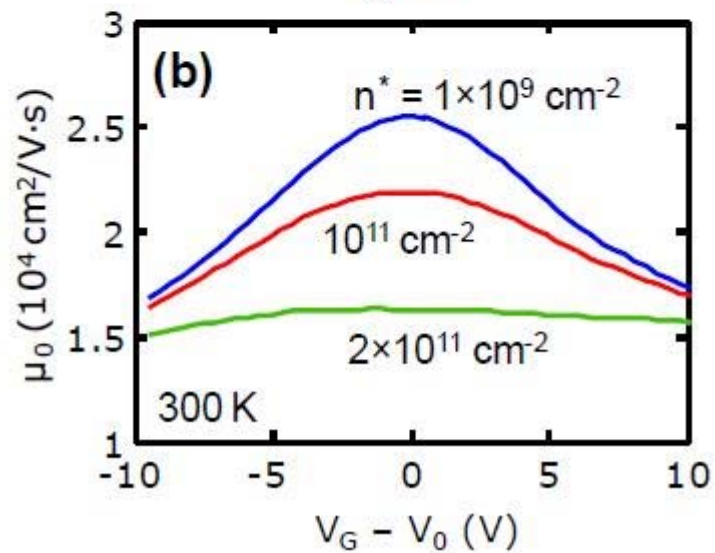
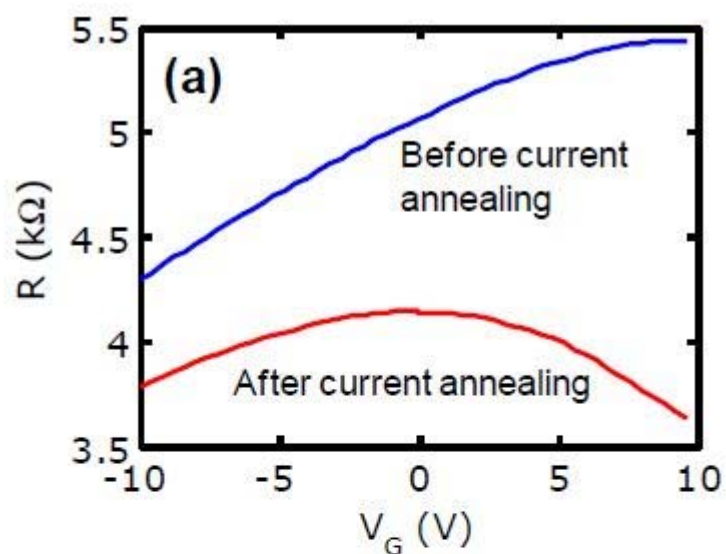
<sup>4</sup>Beckman Institute, Univ. Illinois at Urbana-Champaign, IL 61801, USA

<http://arxiv.org/pdf/1302.5440>

Изследване на транспортните свойства на „окачен“ графен при големи полета ( $\geq 1 \text{ V}/\mu\text{m}$ ) и високи температури ( $\geq 1000 \text{ K}$ ).



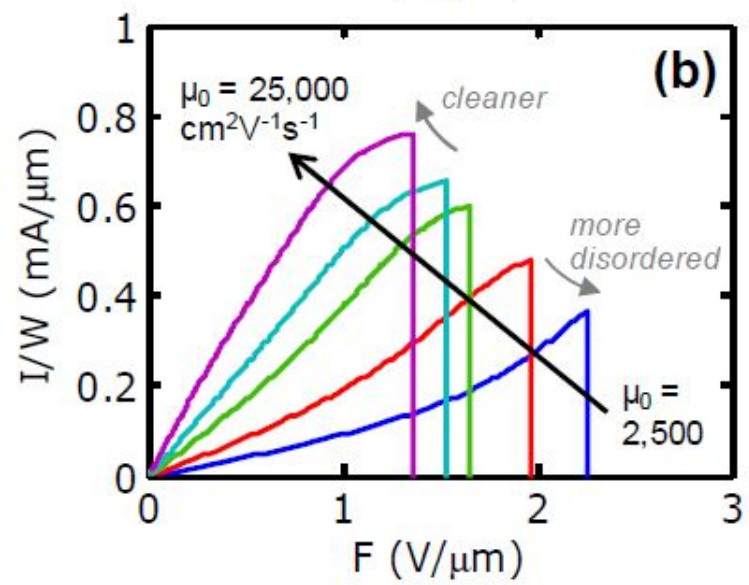
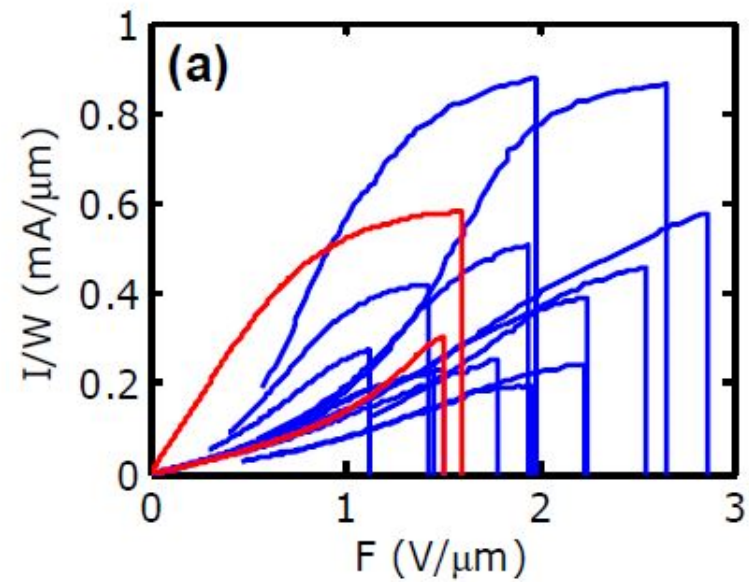




(a) Измерено съпротивление спрямо напрежение на гейта  $V_G$  при стайна температура за проба от окачен екслолиран графен ( $L = 1.5 \mu m, W = 0.85 \mu m, V_{DS} = 50 mV$ )

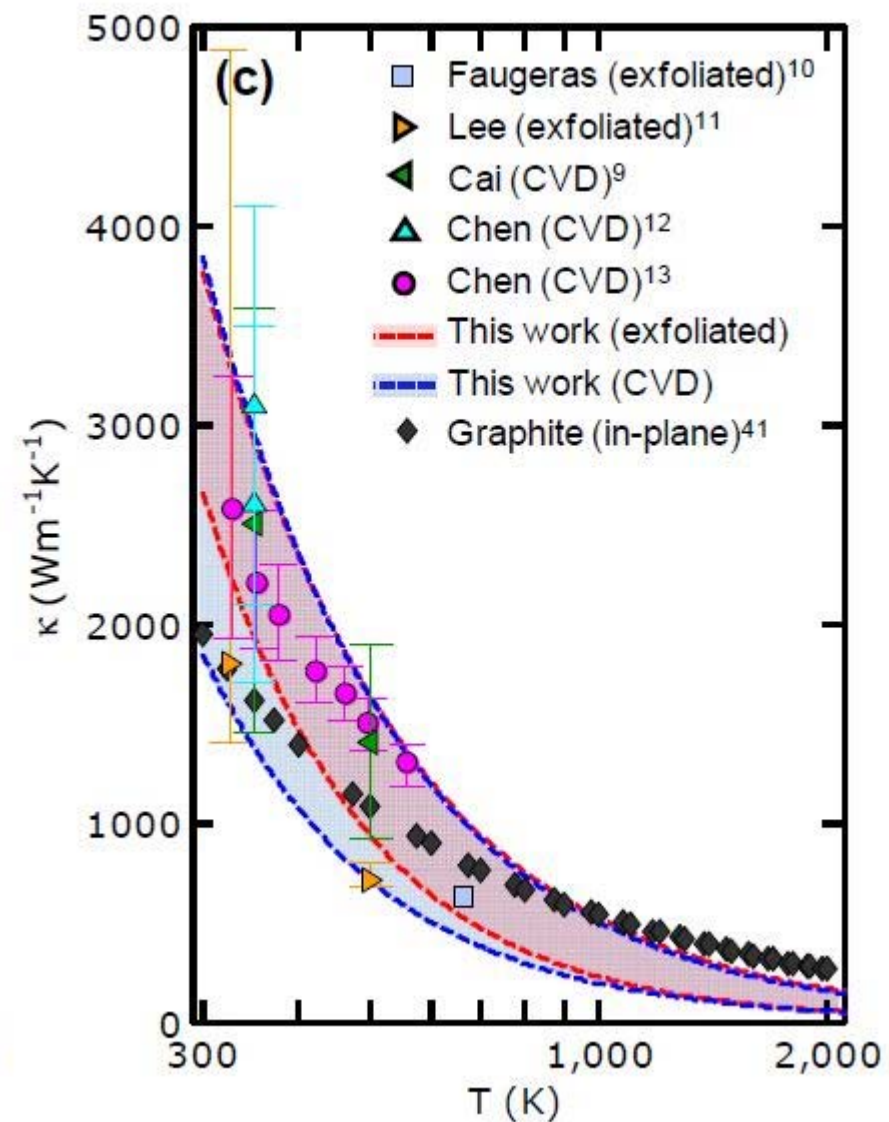
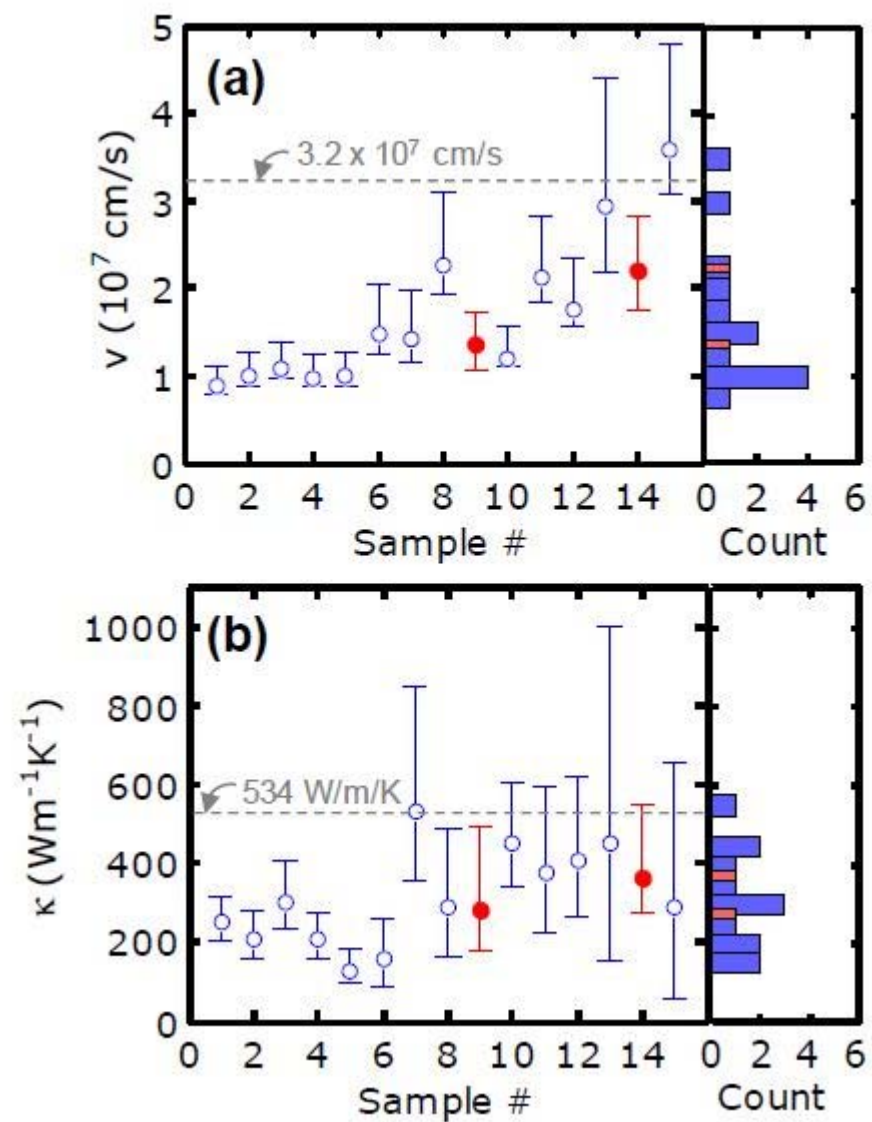
(b) Ефективна подвижност за пробата в (a) при три различни концентрации на зарядите.

(c) Теоретично изчислена плътност на дупките и електроните ( $n + p$ ) при различни температури. С нарастване на температурата концентрацията на зарядите престава да зависи от напрежението на гейта



(a) Измерена плътност на тока ( $I/W$ ) спрямо средното поле до критично унищожаване на обекта за екслолиран- червен и пароводепозизиран- син графен

(b) Симулация на горната зависимост при подвижност на зарядите в пробите от порядъка  $2,500-25,000 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ . Проби, които достигат по- високи критични токове са по- чисти и проби с по- голяма подреденост на плоскостта.



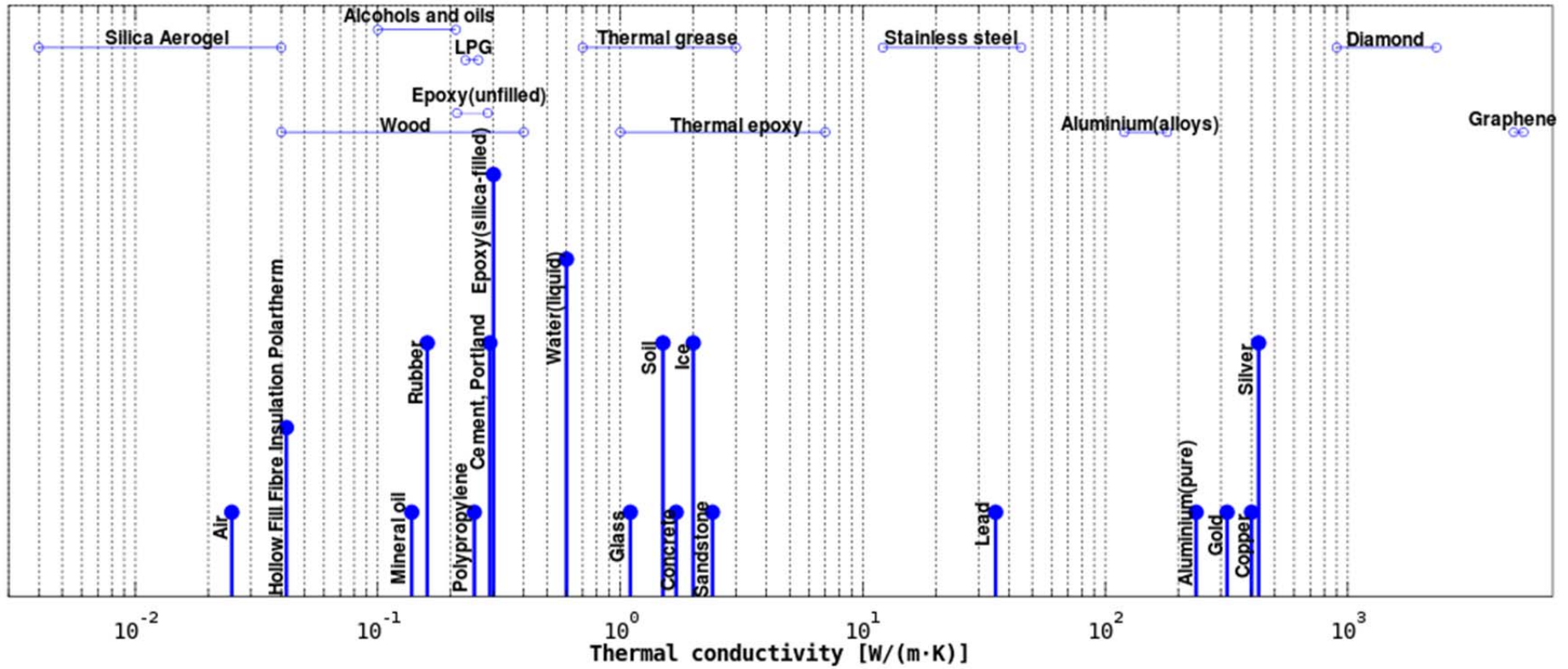
(a) Дрейфова скорост на насищане при висока температура ( $T_{avg} \approx 1200 K$ )

(b) Съответстващия коефициент на топлопроводност при  $T_{avg} \sim 1000 K$  като пробите са подредени по нарастваща „чистота“

(c) Коефициент на топлопроводност при различни температури



## Experimental values of thermal conductivity



Сравнение на коефициента на топлопроводност за различни материали



## Електропроводимост за различни материали

| Material  | $\rho$ ( $\Omega \cdot m$ ) at 20 °C | $\sigma$ (S/m) at 20 °C | Temperature coefficient <sup>[note 1]</sup> ( $K^{-1}$ ) |
|---|--------------------------------------|-------------------------|--|
| <a href="#">Carbon (graphene)</a>                   | $1 \times 10^{-8}$                   | -                       | -0.0002  |
| <a href="#">Silver</a>                              | $1.59 \times 10^{-8}$                | $6.30 \times 10^7$      | 0.0038   |
| <a href="#">Copper</a>                              | $1.68 \times 10^{-8}$                | $5.96 \times 10^7$      | 0.003862   |
| <a href="#">Annealed copper</a> <sup>[note 2]</sup> | $1.72 \times 10^{-8}$                | $5.80 \times 10^7$      | 0.00393  |
| <a href="#">Gold</a> <sup>[note 3]</sup>            | $2.44 \times 10^{-8}$                | $4.10 \times 10^7$      | 0.0034   |
| <a href="#">Aluminium</a> <sup>[note 4]</sup>       | $2.82 \times 10^{-8}$                | $3.5 \times 10^7$       | 0.0039   |
| <a href="#">Calcium</a>                             | $3.36 \times 10^{-8}$                | $2.98 \times 10^7$      | 0.0041   |
| <a href="#">Tungsten</a>                            | $5.60 \times 10^{-8}$                | $1.79 \times 10^7$      | 0.0045   |
| <a href="#">Zinc</a>                                | $5.90 \times 10^{-8}$                | $1.69 \times 10^7$      | 0.0037   |
| <a href="#">Nickel</a>                              | $6.99 \times 10^{-8}$                | $1.43 \times 10^7$      | 0.006  |
| <a href="#">Lithium</a>                             | $9.28 \times 10^{-8}$                | $1.08 \times 10^7$      | 0.006  |
| <a href="#">Iron</a>                                | $1.0 \times 10^{-7}$                 | $1.00 \times 10^7$      | 0.005  |

| Material  | $\rho$ ( $\Omega \cdot m$ ) at 20 °C     | $\sigma$ (S/m) at 20 °C               | Temperature coefficient <sup>[note 1]</sup> ( $K^{-1}$ ) |
|---|--|---------------------------------------|--|
| <a href="#">Platinum</a>                            | $1.06 \times 10^{-7}$                    | $9.43 \times 10^6$                    | 0.00392  |
| <a href="#">Tin</a>                                 | $1.09 \times 10^{-7}$                    | $9.17 \times 10^6$                    | 0.0045   |
| <a href="#">Carbon steel</a> (1010)                 | $1.43 \times 10^{-7}$                    | $6.99 \times 10^6$                    |  |
| <a href="#">Lead</a>                                | $2.2 \times 10^{-7}$                     | $4.55 \times 10^6$                    | 0.0039   |
| <a href="#">Titanium</a>                            | $4.20 \times 10^{-7}$                    | $2.38 \times 10^6$                    | X  |
| Grain oriented <a href="#">electrical steel</a>     | $4.60 \times 10^{-7}$                    | $2.17 \times 10^6$                    |  |
| <a href="#">Manganin</a>                            | $4.82 \times 10^{-7}$                    | $2.07 \times 10^6$                    | 0.000002   |
| <a href="#">Constantan</a>                          | $4.9 \times 10^{-7}$                     | $2.04 \times 10^6$                    | 0.000008   |
| <a href="#">Stainless steel</a> <sup>[note 5]</sup> | $6.9 \times 10^{-7}$                     | $1.45 \times 10^6$                    |  |
| <a href="#">Mercury</a>                             | $9.8 \times 10^{-7}$                     | $1.02 \times 10^6$                    | 0.0009   |
| <a href="#">Nichrome</a> <sup>[note 6]</sup>        | $1.10 \times 10^{-6}$                    | $9.09 \times 10^5$                    | 0.0004   |
| <a href="#">GaAs</a>                                | $1 \times 10^{-3}$ to $1 \times 10^8$    | $1 \times 10^{-8}$ to $10^3$          |  |
| <a href="#">Carbon (amorphous)</a>                  | $5 \times 10^{-4}$ to $8 \times 10^{-4}$ | $1.25 \times 10^3$ to $2 \times 10^3$ | -0.0005  |

| Material  | $\rho$ ( $\Omega \cdot m$ ) at 20 °C  | $\sigma$ (S/m) at 20 °C  | Temperature coefficient <sup>[note 1]</sup> ( $K^{-1}$ ) |
|---|---|--|--|
| <a href="#">Carbon (graphite)</a> <sup>[note 7]</sup> | $2.5 \times 10^{-6}$ to $5.0 \times 10^{-6}$ // <a href="#">basal plane</a><br>$3.0 \times 10^{-3}$ $\perp$ basal plane | $2 \times 10^5$ to $3 \times 10^5$ // basal plane<br>$3.3 \times 10^2$ $\perp$ basal plane |  |
| <a href="#">Carbon (diamond)</a>                      | $1 \times 10^{12}$  | $\sim 10^{-13}$  |  |
| <a href="#">Germanium</a> <sup>[note 8]</sup>         | $4.6 \times 10^{-1}$  | 2.17   | -0.048   |
| <a href="#">Sea water</a> <sup>[note 9]</sup>         | $2 \times 10^{-1}$  | 4.8  |  |
| <a href="#">Drinking water</a> <sup>[note 10]</sup>   | $2 \times 10^1$ to $2 \times 10^3$  | $5 \times 10^{-4}$ to $5 \times 10^{-2}$   |  |
| <a href="#">Silicon</a> <sup>[note 8]</sup>           | $6.40 \times 10^2$  | $1.56 \times 10^{-3}$  | -0.075   |
| <a href="#">Wood (damp)</a>                           | $1 \times 10^3$ to $1 \times 10^4$  | $10^{-4}$ to $10^{-3}$   |  |
| <a href="#">Deionized water</a> <sup>[note 11]</sup>  | $1.8 \times 10^5$   | $5.5 \times 10^{-6}$   |  |
| <a href="#">Glass</a>                                 | $10 \times 10^{10}$ to $10 \times 10^{14}$  | $10^{-11}$ to $10^{-15}$   | ?  |
| <a href="#">Hard rubber</a>                           | $1 \times 10^{13}$  | $10^{-14}$   | ?  |
| <a href="#">Wood (oven dry)</a>                       | $1 \times 10^{14}$ to $1 \times 10^{16}$  | $10^{-16}$ to $10^{-14}$   |  |
| <a href="#">Sulfur</a>                                | $1 \times 10^{15}$  | $10^{-16}$   | ?  |

| Material                     | $\rho$ ( $\Omega\cdot\text{m}$ ) at 20 °C    | $\sigma$ (S/m) at 20 °C                    | Temperature coefficient <sup>[note 1]</sup> ( $\text{K}^{-1}$ ) |
|------------------------------|--|--|---|
| <a href="#">Air</a>          | $1.3 \times 10^{16}$ to $3.3 \times 10^{16}$ | $3 \times 10^{-15}$ to $8 \times 10^{-15}$ |   |
| <a href="#">PEDOT:PSS</a>    | $1 \times 10^{-3}$ to $1 \times 10^{-1}$     | $1 \times 10^1$ to $1 \times 10^3$         | ?   |
| <a href="#">Fused quartz</a> | $7.5 \times 10^{17}$                         | $1.3 \times 10^{-18}$                      | ?   |
| <a href="#">PET</a>          | $10 \times 10^{20}$                          | $10^{-21}$                                 | ?   |
| <a href="#">Teflon</a>       | $10 \times 10^{22}$ to $10 \times 10^{24}$   | $10^{-25}$ to $10^{-23}$                   | ?   |