

## СТРУКТУРНІ, ЕЛЕКТРИЧНІ І ОПТИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ПЛІВОК ГРАФІТУ НАРИСОВАНИХ ОЛІВЦЯМИ РІЗНОЇ ТВЕРДОСТІ<sup>†</sup>

✉Сergій І. Курищук<sup>a,\*</sup>, ✉Тарас Т. Ковалюк<sup>a,b,‡</sup>, ✉Іван П. Козярьський<sup>a,#</sup>,  
✉Михайло М. Солован<sup>a,##</sup>

<sup>a</sup>Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича  
вул. Коцюбинського 2, 58012 Чернівці, Україна

<sup>b</sup>Карловий університет, факультет математики та фізики  
Ke Karlovu 5, 121 16 Прага 2, Чехія

\*Corresponding Author: [kuryshchuk.serhii@chnu.edu.ua](mailto:kuryshchuk.serhii@chnu.edu.ua)

<sup>‡</sup>E-mail: [t.kovaliuk@mag.mff.cuni.cz](mailto:t.kovaliuk@mag.mff.cuni.cz), <sup>#</sup>E-mail: [i.koziarskyi@chnu.edu.ua](mailto:i.koziarskyi@chnu.edu.ua) <sup>##</sup>E-mail: [m.solovan@chnu.edu.ua](mailto:m.solovan@chnu.edu.ua)

Received August 15, 2022; revised August 17, 2022; accepted August 20, 2022

В роботі представлено результати дослідження структурних, оптичних та електричних властивостей тонких плівок графіту в залежності від твердості стержнів (2Н, Н, НВ, В та 2В) отриманих методом «Олівець-на-напівпровіднику». Такі дослідження мають велике значення для подальшої розробки високоефективних приладів на основі гетеропереходів для електроніки і оптоелектроніки. За допомогою скануючого електронного мікроскопа було одержано типові зображення поверхні утворені відбитими електронами (BSE) і показано при трьох збільшеннях (100x, 500x і 1000x). Оскільки стержні досліджуваних олівців складаються з сумішей глини та графіту було проведено більш детальний аналіз елементів з яких складаються стержні. EDS аналіз показав, що основними складниками досліджуваних стержнів є очищений графітовий порошок, а також О, Al і Si що входять до складу каоліну формула якого  $H_4Al_2Si_2O_9$ , або  $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$  - головна складова частина звичайної глини. Також було визначено елементний склад мікрооб'єму досліджуваних зразків. Не зважаючи на похибку, яка виникає при визначенні складу С і О (~ 12%) можна стверджувати, що все ж таки зберігається закономірність між вмістом графіту і твердістю олівця. Тобто чим більший вміст графіту — тим м'якший стержень. Вимірювання товщини плівок графіту проведено з використанням інтерферометра МІІІ-4 за стандартною методикою. Середня товщина всіх досліджуваних плівок становила ~ 150 нм, оскільки товщина плівок отриманих таким методом в основному визначається шорховатістю поверхні соляної підкладки. Нарисовані плівки графіту володіють вищим питомим опором ніж об'ємні зразки (стержні олівців) з яких вони були виготовлені. Опір плівок зростає при зростанні твердості олівців, що обумовлено зростанням кількості домішки глини в графіті, яка є діелектриком. Встановлено, що зростання твердості олівця призводить до зростання пропускання.

**Ключові слова:** «олівець-на-напівпровіднику», графіт, провідність, пропускання, тонкі плівки.

**PACS:** 68.55.Ln, 71.55.Ak, 68.37.Hk, 68.37.-d, 78.20.Ci, 72.20. -i

У графіту є багато переваг в порівнянні з традиційними металами. Графіт володіє стійкістю до термічної дії, завдяки міцним зв'язкам атомів вуглецю, тому бар'єри Шоттки на основі плівок графіту зберігають випрямляючі властивості при достатньо високих температурах. Крім цього, графіт можна легувати акцепторними домішками, що призводить до зниження рівня Фермі та збільшує висоту бар'єру Шоттки, тоді як в металах робота виходу завжди незмінна та не може бути змінена легуванням [1,2].

Методи виготовлення тонких плівок графіту представляють великий науковий та практичний інтерес, обумовлений їх унікальними фізичними властивостями, високою електричною провідністю, хорошою прозорістю, високими механічними властивостями, високою рухливістю електронів при температурі +20°C [3]. Технологія графену (одноатомного шару вуглецю), який представляє собою двовимірний напівпровідник [4,5] отримала широке практичне застосування.

Недавно тонкі плівки графіту було використано для виготовлення новітніх, екологічно чистих і дешевих наноструктурованих тонкоплівкових електронних приладів нового покоління [6-9]. Крім того, нещодавні дослідження поверхні та структурних властивостей нарисованих графітових тонких плівок показують, що вони складаються з розупорядкованих зв'язаних графітових мікро- та наночасток, а також з нанопластівців моно- або декілька шарового графену [10,11]. Тому такі тонкі плівки являються двох-вимірними наноструктурованими об'єктами.

Отже, метою роботи є дослідження впливу на структурні, електричні і оптичні властивості тонких плівок графіту твердості стержнів (2Н, Н, НВ, В та 2В), обраних для створення даних плівок.

### ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

Перед початком нанесення плівок графіту, (слідуючи за технологією – «олівець-на-напівпровіднику» [12-17]), одну з поверхонь свіжосколеної монокристалічної соляної підкладки (NaCl) механічно шліфували до шорсткості  $R_a=0,2$  мкм,  $R_z=0,23$  мкм і  $R_{max}=1,1$  мкм. Якісна графітова плівка малювалася на попередньо

<sup>†</sup> Cite as: S.I. Kuryshchuk, T.T. Kovaliuk, I.P. Koziarskyi, and M.M. Solovan, East Eur. J. Phys. 3, 91 (2022), (in Ukrainian). <https://doi.org/10.26565/2312-4334-2022-3-12>

© S.I. Kuryshchuk, T.T. Kovaliuk, I.P. Koziarskyi, M.M. Solovan, 2022

підготовленій поверхні соляної підкладки за допомогою чистого графітового стержня 1 мм у діаметрі та олівців з різною твердістю 2H, H, HB, B та 2B при постійній силі притиснення в 1 Н. Далі зразки обережно розміщуються на поверхні дистильованої води плівкою графіту вгору. Соляна підкладка повністю розчиняється у дистильованій воді. Варто відмітити, що таким чином отримується нарисована графітова плівка, яка не зв'язана з підкладкою, на якій вона була нарисована. Зв'язок між наночастками графіту, які формують нарисовану графітову тонку плівку, є достатнім аби компенсувати силу поверхневого натягу води. Отже, немає необхідності у використанні додаткового захисного шару на плівці для підвищення її механічної міцності. Плаваючу намальовану плівку графіту можна легко перенести на будь-яку іншу підкладку з гладкою або наноструктурованою поверхнею. У нашому випадку плівки графіту переносили на підкладки ситалу розмірами  $5 \times 10 \times 0,5$  мм для дослідження електричних властивостей та на скляні підкладки розмірами  $18 \times 18 \times 0,5$  мм для дослідження оптичних властивостей. Після перенесення плівки висушували у потоці гарячого повітря  $80^\circ\text{C}$  для видалення залишків води та формувався якісний оптичний контакт з гладкою поверхнею підкладки.

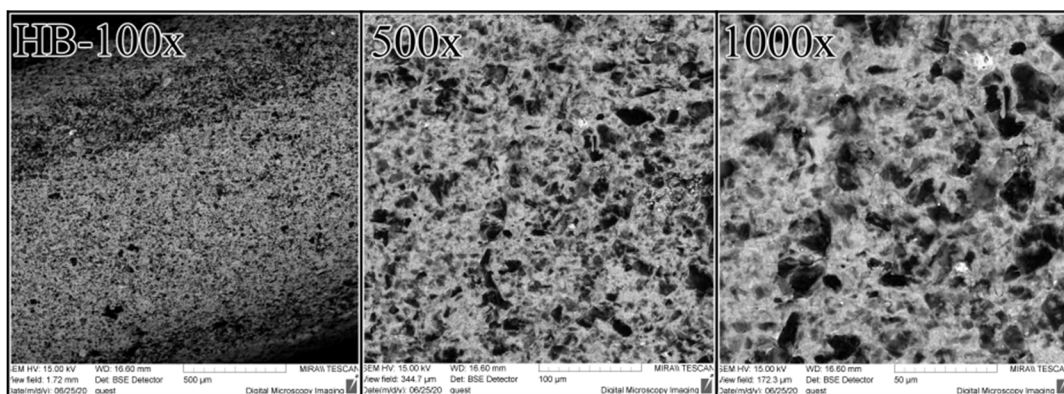
Дослідження оптичних властивостей тонких плівок графіту проводились за допомогою спектрофотометра СФ-2000, в області довжин хвиль 200-1200 нм.

Дослідження морфології поверхні і визначення елементного складу олівців різної твердості (2H, H, HB, B та 2B) було проведено за допомогою скануючого електронного мікроскопа (MIRA3 FEG, Tescan) оснащеного детектором відбитих електронів (BSE) і енергодисперсним рентгівівським детектором (EDX). Для забезпечення електричного контакту з предметним столиком і для фіксації стержнів олівців (2H, H, HB, B та 2B) були відламані і зафіксовані за допомогою провідного вуглецевого скотчу. Відносна похибка при вимірюванні атомних часток хімічних елементів, які входять до складу не перевищує 2% для Al і Si та не більше 12% для C і O.

## РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

### Структурні властивості тонких плівок $\text{CuO}$

З допомогою скануючого електронного мікроскопа було одержано типові зображення поверхні утворені відбитими електронами (BSE) (рис. 1) які показано при трьох збільшеннях (100x, 500x і 1000x).



**Рисунок 1.** Зображення поверхні утворені відбитими електронами (BSE) при різному збільшенні (100x, 500x і 1000x) для олівця твердістю HB.

Контраст зображення утвореного відбитими електронів несе інформацію про розподіл електронної густини (області, збагачені елементом з великим атомним номером виглядають яскравіше: темна область – графіт, яскраві області O, Al, Si). Тому відбиті електрони, які генеруються одночасно з вторинними, окрім інформації про морфологію поверхні містять додаткову інформацію і про склад зразка.

На рис. 2 представлено зображення поверхні утворені відбитими електронами (BSE) для олівців різної твердості (2H, H, 2B, B та HB) при збільшенні в 1000x, а також розподіл елементів, які входять до складу стержнів для прикладу їх показано для олівця твердістю HB.

З рис. 2 також можна зробити висновок, що зразок 2B володіє найбільшим вмістом графіту (підтверджено елементним аналізом табл. 1) утворений контраст зображення є темнішим в порівнянні з іншими зразками, що свідчить про збагачення дослідженої області елементом з малим атомним номером.

**Таблиця 1.** Елементний склад зразків

Назва	Атомна частка хімічного елемента, який входять до складу зразка, %			
	C	Al	Si	O
2H	44	5.39	6.73	43.88
H	53.97	4.67	6.3	35.06
HB	54.47	5.83	6.97	32.74
B	57.09	4.85	6.41	31.65
2B	62.68	3.61	4.76	28.96

Опромінення зразків пучком електронів призвело не тільки до утворення вторинних і відбитих електронів, а також викликало появу характеристичного X-хвильового випромінювання (типові залежності представлено на рис. 3 для олівця твердістю HB).

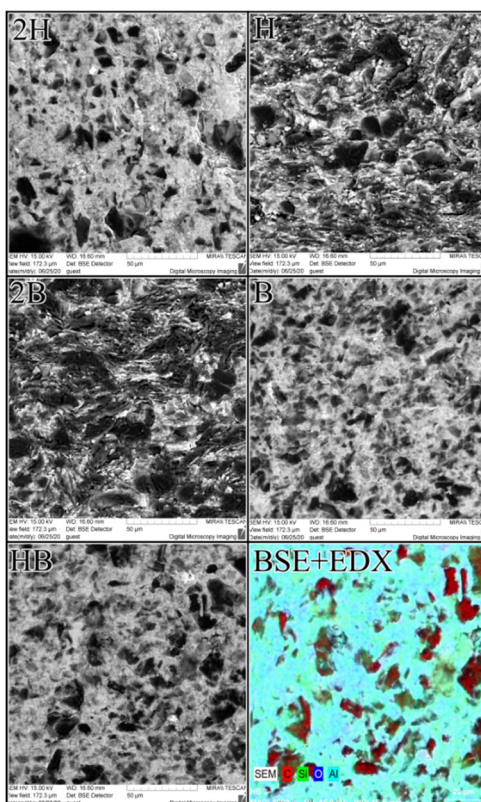


Рисунок 2. Зображення поверхні утворені відбитими електронами (BSE) для 2H, H, 2B, B та HB при збільшенні в 1000х.

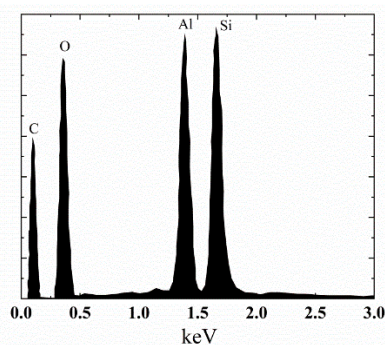


Рисунок 3. EDS-спектр стержня олівця з твердістю HB

Оскільки стержні досліджуваних олівців складається з сумішей глини та графіту було вирішено провести більш детальний аналіз елементів з яких складаються стержні. EDS аналіз показав, що основними складниками досліджуваних стержнів є очищений графітовий порошок, а також O, Al і Si що входять до складу каоліну формула якого  $H_4Al_2Si_2O_9$ , або  $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$  - головна складова частина звичайної глини.

Аналіз характеристичного X-хвильового випромінювання дозволив визначити елементний склад мікрооб'єму досліджуваних зразків (для прикладу частина даних представлена в табл. 1).

Не зважаючи на похибку, яка виникає при визначенні складу C і O (~ 12%) можна стверджувати, що все ж таки зберігається закономірність між вмістом графіту і твердістю олівця. Тобто чим більший вміст графіту – тим м'якший стержень, що в свою чергу буде впливати на фізичні властивості плівок, як показано нижче.

На рис. 4. показано розподіл елементів (C, Si, O, Al), які входять до складу олівця з твердістю HB.

Питомий опір в тонких плівках (коли товщина зразка набагато менша від відстані між контактами) характеризується "питомим опором на квадрат", ( $R_S$ ). У цьому випадку питомий опір не залежить від лінійних розмірів зразка якщо він має форму прямокутника, а тільки від відношення (довжини до ширини). Опір частини тонкої плівки прямокутного перерізу можна задати виразом

$$R = \rho l / db \quad (1)$$

Якщо  $l = b$ , тоді

$$R = \rho l / db = R_s \quad (2)$$

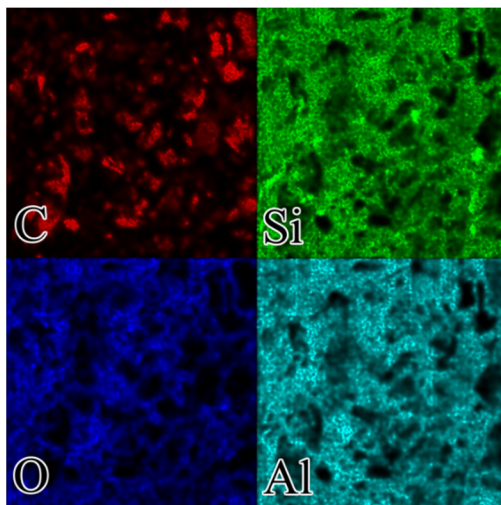


Рисунок 4. EDX елементний розподіл (C, Si, O, Al).

тому опір  $R_s$  одного квадрату тонкої плівки залежить не від розмірів квадрату, а лише від питомого опору і товщини. Величина  $R_s$  називається поверхневим опором плівки і виражається в омах на квадрат [17]. Ця величина має велике значення і широко використовується для порівняння плівок, зокрема плівок з одного матеріалу, осаджених при ідентичних умовах.

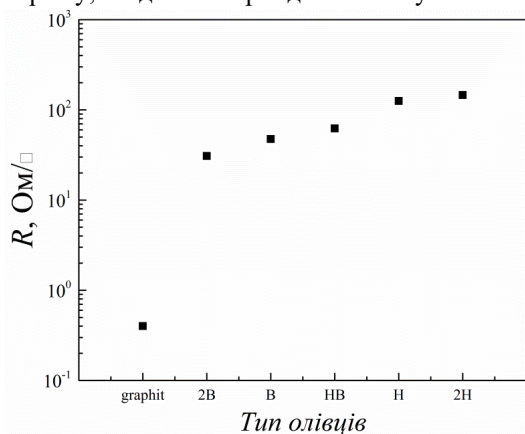


Рисунок 5. Поверхневий опір плівок графіту виготовлених за допомогою різних олівців.

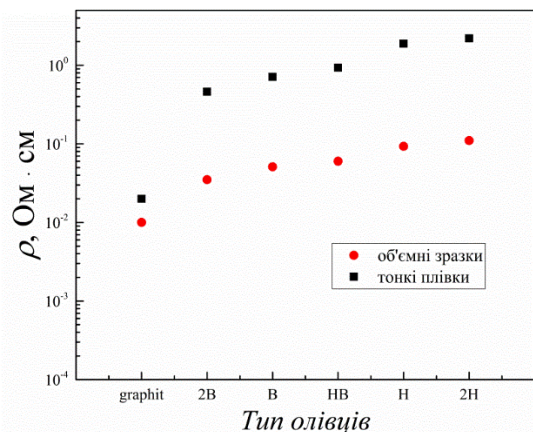


Рисунок 6. Залежність питомого опору плівок графіту від твердості олівців

На рисунку 5, приведено виміряні значення поверхневого опору чотирьохзондовим методом для плівок графіту виготовлених олівцями різної твердості.

З рисунка 5 видно, що опір плівок зростає при зростанні твердості олівців, що пов'язано із зростанням кількості домішки глини в графіті, яка є діелектриком. Відомо, що у полікристалічних вуглецевих матеріалах загальна провідність визначається двома складовими: електропровідністю кристалітів (металевою за своїм типом) і провідністю аморфного вуглецю-напівпровідника і тому вона залежить від вмісту домішки діелектрика.

Якщо відома товщина досліджуваних тонких плівок, то їх питомий опір легко визначити з виразу:

$$\rho = dR_s \quad (3)$$

де  $d$ - товщина тонкої плівки.

Вимірювання товщини плівок графіту проводилося з використанням інтерферометра МІІ-4 за стандартною методикою. Середня товщина всіх досліджуваних плівок становила ~ 150 нм, оскільки товщина плівок отриманих таким методом в основному визначається шорховатістю поверхні соляної підкладки.

На рисунку 6 приведено значення питомого опору всіх досліджуваних тонких плівок розрахованого за допомогою співвідношення (3) та значення питомого опору стержнів олівців за допомогою, яких були виготовлені досліджувані тонкі плівки.

З рисунка 6 видно, що нарисовані плівки графіту володіють вищим питомим опором ніж об'ємні зразки (стержні олівців), з яких вони були виготовлені, що обумовлено розмірними ефектами. Як тільки товщина плівки стає співмірною по величині з довжиною вільного



пробігу носіїв заряду, межі півки накладають геометричне обмеження на рух електронів провідності  $i$ , отже, на їх ефективну величину довжини вільного пробігу. Фізичні ефекти, що виникають із-за такого геометричного обмеження довжини вільного пробігу, називають ефектами «довжини вільного пробігу» або «розмірними» ефектами.

У провідність півки створюють вклад тільки ті електрони, які рухаються майже паралельно поверхні, внаслідок чого довжина їх вільного пробігу залишається величиною порядку довжини пробігу в об'ємному матеріалі. Електрони провідності розсіюються в півці не тільки її поверхнями і ґраткою, але і домішками, а також багатьма структурними дефектами, що збереглися.

Границі зерен у графіті та графітоподібних матеріалах сильно впливають на фізичні властивості матеріалу. Електричне поле зарядів на межі зерен утворює енергетичні бар'єри  $E_b$  для руху носіїв заряду. Між цими кристалітами створюються області певною товщиною  $\delta$ , які є збіднені на основні носії заряду [19,20].

Сумарний струм через полікристалічний матеріал складається як з провідності зерен, так і механізмом переходу носіїв заряду з одного зерна в інше, тобто провідністю границь зерен. Провідність зерен багато більша за провідність границь зерен і в першу чергу залежить від питомого опору матеріалу. Оскільки в нас суміш провідного і діелектричного матеріалу, то провідність зерен визначається  $\sigma = en\mu$ . Через це при дослідженні руху носіїв заряду у полікристалічних тонких півках в першу чергу треба розглядати провідність областей між кристалітами. Провідність полікристалічних тонких півок  $\sigma$  з врахуванням енергетичних бар'єрів на межі зерен, описується виразом [21]:

$$\sigma = \frac{Le^2n}{\sqrt{2\pi m^*kT}} \exp\left(-\frac{eV_b}{kT}\right), \quad (4)$$

де  $L$  – середній розмір кристалітів;  $m^*$  – ефективна маса носіїв заряду;  $n$  – концентрація носіїв заряду всередині кристаліта;  $eV_b = E_b$  – висота бар'єра на границі зерен.

На рис. 7 зображено спектри пропускання тонких півок графіту для п'ятих графітових півок, які були виготовлені олівцями різної твердості.

З рисунка бачимо, що зростання твердості олівця призводить до зростання пропускання півок. Це може бути обумовлено збільшенням вмісту оксидних матеріалів в нарисованих півках (які мають велику ширину забороненої зони, а отже і більше пропускання), внаслідок зростання кількості домішки глини в графіті більшої твердості.

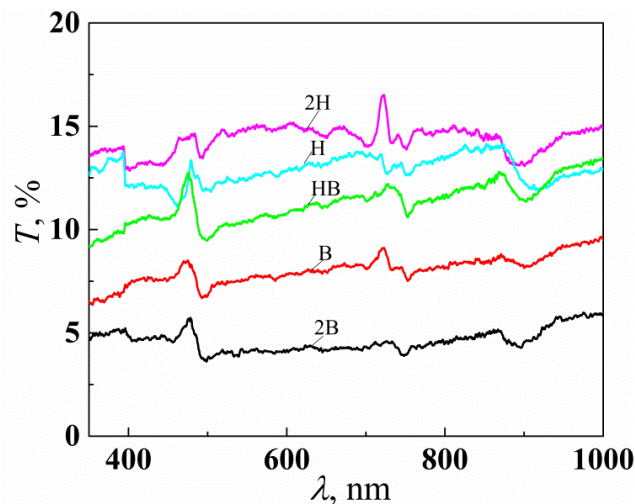


Рисунок 7. Спектри пропускання тонких півок графіту, виготовлених різними олівцями

### ВИСНОВКИ

1. Отримано тонкі півки графіту методом “Олівець-на-напівпровіднику” та досліджено їх структурні, оптичні та електричні властивості.
2. Показано, що нарисовані півки графіту володіють вищим питомим опором ніж об'ємні зразки (стержні олівців) з, яких вони були виготовлені, що обумовлено розмірними ефектами.
3. Встановлено, що опір півок зростає при зростанні твердості використаних олівців, що обумовлено зростанням кількості домішки глини в графіті, яка є діелектриком.
4. Встановлено, що зростання твердості олівця призводить до зростання пропускання. Це може бути обумовлено збільшенням вмісту оксидних матеріалів в нарисованих півках (які мають велику ширину забороненої зони, а отже і більше пропускання), внаслідок зростання кількості домішки глини в графіті більшої твердості.

## ORCID IDs

©Serhii I. Kuryshchuk, <https://orcid.org/0000-0002-5937-2701>; ©Taras T. Kovalyuk, <https://orcid.org/0000-0002-7712-6758>  
©Ivan P. Koziarskyi, <https://orcid.org/0000-0002-4984-4349>; ©Mykhailo M. Solovan, <https://orcid.org/0000-0002-1077-5702>

## REFERENCES

- [1] V.V. Brus, M.A. Gluba, X. Zhang, K. Hinrichs, J. Rappich, and N.H. Nickel, *Solar energy*, **107**, 74 (2014), <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.05.021>
- [2] H. Parkhomenko, M. Solovan, V.V. Brus, E. Maystruk, and P.D. Maryanchuk, *Optical Engineering*, **57**(1), 017116 (2018), <https://doi.org/10.1117/1.OE.57.1.017116>
- [3] K. Kostarelos, and K.S. Novoselov, *Nature nanotechnology*, **9**(10), 744 (2014), <https://doi.org/10.1038/nnano.2014.224>
- [4] A.C. Neto, F. Guinea, N.M. Peres, K.S. Novoselov, and A.K. Geim, *Reviews of modern physics*, **81**(1), 109 (2009), <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.81.109>
- [5] M.D. Stoller, S. Park, Y. Zhu, J. An, and R.S. Ruoff, *Nano letters*, **8**(10), 3498 (2008), <https://doi.org/10.1021/nl802558y>
- [6] M.M. Solovan, H.P. Parkhomenko, and P.D. Maryanchuk, *Journal of Physical Studies*, **23**(4), (2019), <https://doi.org/10.30970/jps.23.4801>
- [7] D. Neumaier, S. Pindl, and M.C. Lemme, *Nature Materials*, **18**(6), 525 (2019), <https://doi.org/10.1038/s41563-019-0359-7>
- [8] M. Jung, P. Rickhaus, S. Zihlmann, A. Eichler, P. Makk, C. Schöenberger, *Nanoscale*, **11**(10), 4355 (2019), <https://doi.org/10.1039/C8NR09963D>
- [9] R. You, Y.Q. Liu, Y.L. Hao, D.D. Han, Y.L. Zhang, and Z. You, *Advanced Materials*, **32**(15), 1901981 (2020), <https://doi.org/10.1002/adma.201901981>
- [10] Y. Miyasaka, A. Nakamura, and J. Temmyo, *Japanese Journal of Applied Physics*, **50**(4S), 04DH12 (2011), <https://doi.org/10.1143/JJAP.50.04DH12>
- [11] M. Yankowitz, Q. Ma, P. Jarillo-Herrero, and B.J. LeRoy, *Nature Reviews Physics*, **1**(2), 112 (2019), <https://doi.org/10.1038/s42254-018-0016-0>
- [12] V.V. Brus, O.L. Maslyanchuk, M.M. Solovan, P.D. Maryanchuk, I. Fodchuk, V.A. Gnatyuk, and T. Aoki, *Scientific reports*, **9**(1), 1 (2019), <https://doi.org/10.1038/s41598-018-37637-w>
- [13] V.V. Brus, M. Gluba, J. Rappich, F. Lang, P.D. Maryanchuk, and N.H. Nickel, *ACS applied materials & interfaces*, **10**(5), 4737 (2018), <https://doi.org/10.1021/acsami.7b17491>
- [14] M.N. Solovan, G.O. Andrushchak, A.I. Mostovyi, T.T. Kovaliuk, V.V. Brus, and P.D. Maryanchuk, *Semiconductors*, **52**(2), 236 (2018), <https://doi.org/10.1134/S1063782618020185>
- [15] V.V. Brus, and P.D. Maryanchuk, *Carbon*, **78**, 613 (2014), <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2014.07.021>
- [16] V.V. Brus, P.D. Maryanchuk, M.I. Ilashchuk, J. Rappich, I.S. Babichuk, and Z.D. Kovalyuk, *Solar Energy*, **112**, 78 (2015), <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.11.023>
- [17] V.V. Brus, and P.D. Maryanchuk, *Applied Physics Letters*, **104**(17), 173501 (2014), <https://doi.org/10.1063/1.4872467>
- [18] K. Chopra, and S. Das, *Thin-film solar cells (Vol. 450)*, (Mir, Moscow, 1986).
- [19] N.F. Mott, and E.A. Davis, *Electronic Processes in Non-Crystalline Materials*, (Oxford University Press, Oxford, New York, 2012).
- [20] J.Y.W. Seto, *Journal of Applied Physics*, **46**, 5247 (1975). <https://doi.org/10.1063/1.321593>
- [21] V.V. Brus, M.I. Ilashchuk, I.G. Orletskyi, M.M. Solovan, G.P. Parkhomenko, I.S. Babichuk, and P.D. Maryanchuk. *Nanotechnology*, **31**(50), 505706 (2020), <https://doi.org/10.1088/1361-6528/abce55>

**STRUCTURAL, ELECTRICAL AND OPTICAL PROPERTIES OF GRAPHITE FILMS ARE DRAWN WITH PENCILS OF DIFFERENT HARDNESS**

Serhii I. Kuryshchuk<sup>a</sup>, Taras T. Kovaliuk<sup>a,b</sup>, Ivan P. Koziarskyi<sup>a</sup>, Mykhailo M. Solovan<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, st. Kotsyubyns'kogo 2, 58012, Chernivtsi, Ukraine*

<sup>b</sup>*Charles University in Prague, Faculty of Mathematics and Physics, Ke Karlovu 5, 121 16 Prague 2, Czech Republic*

The paper presents the results of studying the structural, optical and electrical properties of thin films of graphite depending on the hardness of the rods (2H, H, HB, B and 2B) obtained by the "Pencil-on-semiconductor" method. Such studies are of great importance for the further development of highly efficient devices based on heterojunctions for electronics and optoelectronics. Typical images of the surface formed by reflected electrons (BSE) were obtained using a scanning electron microscope and shown at three magnifications (100x, 500x and 1000x). Since the cores of the studied pencils consist of mixtures of clay and graphite, a more detailed analysis of the elements that make up the cores was conducted. EDS analysis showed that the main components of the studied rods are purified graphite powder, as well as O, Al and Si, which are part of kaolin whose formula is  $H_4Al_2Si_2O_9$ , or  $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$  - the main component of ordinary clay. The elemental composition of the microvolume of the studied samples was also determined. Regardless of the error that occurs when determining the composition of C and O (~ 12%), it can be argued that there is still a regularity between the graphite content and the hardness of the pencil. That is, the higher the graphite content, the softer the rod. The thickness of the graphite films was measured using the MII-4 interferometer according to the standard method. The average thickness of all investigated films was ~ 150 nm since the thickness of the films obtained by this method is mainly determined by the roughness of the surface of the salt substrate. Drawn graphite films have a higher resistivity than bulk samples (pencil rods) from which they were made. The resistance of the films increases with an increase in the hardness of pencils, due to an increase in the number of clay impurities in graphite, which is a dielectric. It was found that an increase in stick hardness leads to an increase in transmission.

**Keywords:** "Pencil-on-semiconductor", graphite, conductivity, transmission, thin films.