

10: Conducting lines Kudlankográl GCHD



Název družstva: Kudlankográl GCHD

Škola: Gymnázium Christiana Dopplera

Adresa: Zborovská 621/45, Praha 5 - Malá Strana, 150 00

Obsah

1. Úvod
 - a. Abstrakt
 - b. Podklady
2. Průzkum chování čar
 - a. Tvrdosti tužek
 - b. Chování grafitové stopy
 - c. Chování grafitu
 - d. Chování odporu při vysokých teplotách
 - e. Efektu působení tlaku na tuhu
 - f. Čáry pod napětím
 - g. Hledání spojitosti
3. Obraz a odpor
 - a. Koncept
 - b. Předpoklady
 - c. Proměnné
 - d. Postup
 - e. Zpracování dat
 - i. Model průměrné vzdálenosti
 - ii. Model náhodných cest
 - f. Analýza
 - g. Průběh odporu
4. Závěr a evaluace
 - a. Možný další postup
 - b. Využití

Abstrakt

Cílem experimentu bylo najít model odpovídající chování grafitu pomocí programu hledajícího spojitosti, “cesty” kterými by mohl téct elektrický proud a napětí, a tím určit odpor grafitové čáry. Hlavnímu experimentu předcházely dílčí experimenty, které se zabývaly chováním čáry; jak s ní souvisí tvrdost tužky; jak se chová grafit na papíře; jak výsledná čára závisí na přítlaku, který byl vyvinut na tuhu; tvar špičky tuhy. Jedním z dílčích experimentů bylo zkoumání chování čáry pod vysokým napětím.

Podklady

[1] Queensland Studies Authority, „Extended experimental investigation: Electrical conductivity of graphite“, st. 3, Červen 2013, dostupné na:

https://www.qcaa.qld.edu.au/downloads/senior/snr_physics_07_sai_electric_conduct_graphite.pdf

POCO GRAPHITE INC., „Properties and characteristics of graphite“, Leden 2015, dostupné na: <http://poco.com/Portals/0/Literature/Semiconductor/IND-109441-0115.pdf>

[2] Park, Jun-Ho; Park, Myung-Joo; Lee, Jang-Sik, „Dry writing of highly conductive electrodes on papers by using silver nanoparticle–graphene hybrid pencils“, 2. prosince 2016, dostupné na: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2017/nr/c6nr07616e>

Ineyeo, C.; Wattanakasiwich, P., „Pencil on paper as low cost alternative resistors“, 2018, dostupné na: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1144/1/012165/pdf>

Průzkum chování čar

Tvrdosti tužek

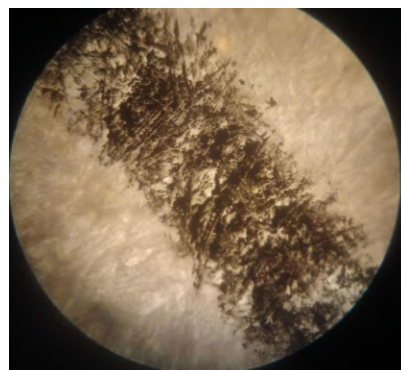
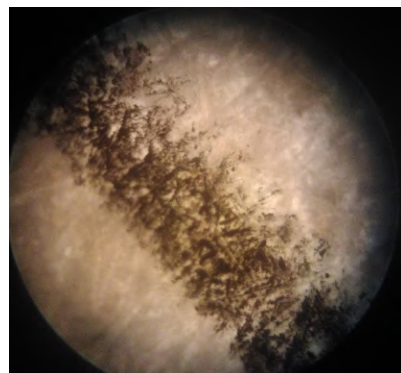
Tužky se dělí na škálu různých tvrdostí, čím měkčí, tím je obsah grafitu v tuze větší. Nejtvrdší tužky (9H) obsahují zhruba 40% grafitu, 55% hlinky a 5% vosku [1]; tužky 8B a 9B obsahují až 95% grafitu a podobné množství vosku [1] – mají tedy lepší vodivost. Měkčí tužky navíc nanášejí na papír víc hmoty grafitu, čímž dále snižují odpor vyprodukovaných čar.

Aby byly získány co nejvíce použitelné výsledky, měly by být odpory čar co nejnižší, tj. používali jsme tuhy o měkkosti 8B.

Chování grafitové stopy

Pro pochopení způsobu, kterým se nanáší grafit na papír, byly použity mikroskopové snímky ($Z=200$) různých čar o různých tloušťkách a silách přítlaku.

Při bližším pozorování jsou rozeznatelná vlákna, tvořící papír, a grafit, hromadící se v mezerách před nimi. Při silnějším přítlaku však tvary vláken zanikají v grafitové stopě, a zbývá jen vrstva grafitu.



Byly vyzkoušeny různé povrchy papírů, které dopadly s podobnými výsledky.

Chování grafitu

Parametry ovlivňující odpor stopy pro 8B tuhu:

- přítlak - větší tlak při nanášení způsobí uvolnění více hmoty tuhy, ale také deformuje papír.
- tvar špičky - špičatější tuha víc tlačí na papír uprostřed, širší tvoří rovnoměrnější rozložení tuhy
- plocha průřezu

Všechny tyto parametry tvoření čáry lze popsat dvěma údaji: množství a spojitost grafitu. Oba jsou úměrné k odporu. Větší tlak na tuhu zajistí víc uvolněného grafitu i víc spojitosti; naopak přetáhnutí tuhy několikrát přes stejnou stopu, ale s nižším tlakem způsobí, že je spojitost naneseného grafitu velká, ale jeho množství nestačí na spolehlivé vedení proudu.

Umělým navýšením nebo snížením spojitosti lze také docílit změny v odporu stopy, bez změny množství grafitu, např.

- ohnutím papíru se trvale zvýší odpor, jelikož se grafit nahromadí do záhybů
- při pokojové teplotě se odpor stopy samovolně snižuje v řádu procent denně. To je způsobeno voskem v tuze, která se do papíru pomalu vpíjí.

Chování odporu při vysokých teplotách

Při vyšší teplotě se vosk v čáře rozplývá do papíru, tím pomáhá rovnoměrnému rozložení grafitu. Díky tomuto jevu působí vyšší teploty na stopu snížením odporu; po vychladnutí materiálu se odpor zase navýší, ale pořád si ponechá nižší hodnotu odporu než původní stopa.

Tento jev jsme experimentálně ověřili: ohřátím papíru na 90°C se odpor snížil v řádu jednotek až desítek procent; po ochlazení se opět o menší část navýšil. V nespojitých čarách nedošlo k zmizení zlomu.

Efekty působení tlaku na tuhu

Pro získání objektivních dat byla použita tuha o tvrdosti 8B, seřízlá naplocho a přichycená kolmo na podložku pod ní. Přitlačování tuhy bylo provedeno přes páku pomocí závaží. Kvůli nesrovnalostem vzniklých při seříznutí tuhy byl odpor stopy tužky zpočátku větší; po několika centimetrech je již tuha vyhlazená. "Hrot" měl průměr 1.6mm, tedy plochu asi 8.04 mm²

č.	F (N)	P (MPa)	Odpor úseků od prvního po poslední (kΩ)					
1	24.4	2.56	678	529	594	374	256	154
2	29.4	3.66	1520	212	128	149	141	109
3	34.4	4.28	178	129	88	121	66	74
4	39.4	4.90	9.88	15.6	21.5	24.5	16.5	13.07
5	44.4	5.52	29.9	22	19.1	11.2	22.3	24.7

Tab. 1: odpory stop pro sílu zatížení od 24.4N po 44.4N. 1. usek je z nevyhlazené, kolmo seřízlé tuhy; už v 5. úseku je ale vidět nižší hodnoty, indikující placatý povrch tuhy. Velký rozptyl hodnot v 1. části, oproti relativní konzistenci v posledních úsecích ukazuje, jak moc je povrch a tvar tužky kritický pro rovnoměrné nanášení grafitu, a tím pro získání menšího odporu – zato nižší hodnoty pro vyšší tlaky potvrzují předpoklad, že se při nich nanáší víc grafitu.

Vyšší zatížení se ukázaly jako nespolehlivé z důvodu lámavosti tuhy.

Čáry pod napětím

Grafit mění odpor s teplotou; navíc není prozkoumané, co se děje s grafitem na čáře, pokud je pod velkým napětím.

Různé čáry byly napojeny na zdroj o napětí od 1000 po 5000 V. Odpor byl stále stejný, nezávisel na výšce napětí, ani se výbojem nezměnil. Při zkratu došlo k propálení podkladového materiálu, papíru. Tento jev měl vliv na výsledný odpor (teplo mění odpor). Větší napětí nemělo smysl zkoumat kvůli přehřívání grafitu na papíře. Střídavý proud taktéž nemá žádný efekt.

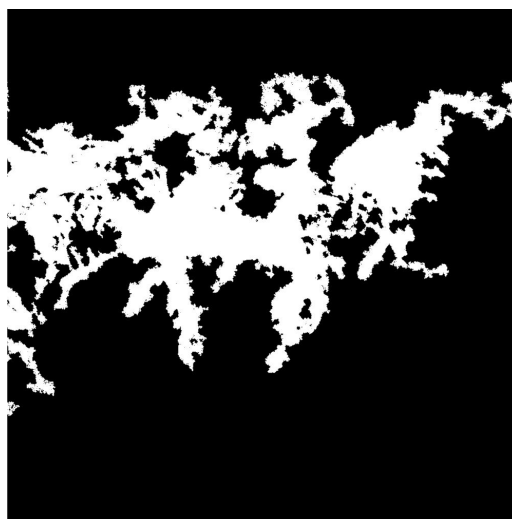
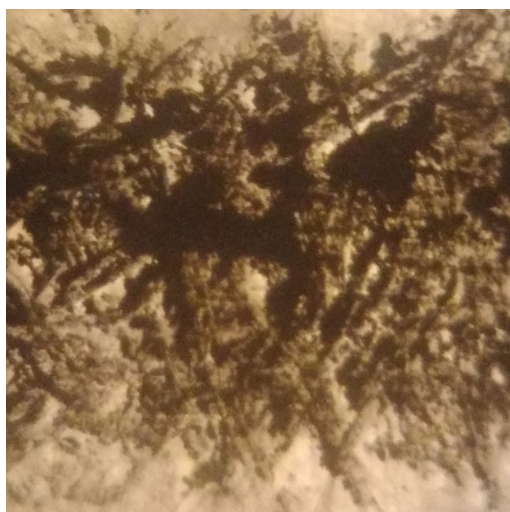
U tužkové čáry tedy platí Ohmův zákon.

Hledání spojitosti

Při měření úseků grafitu se občas objevila čára, která měla řádově větší odpor než ostatní, přestože podmínky při jejím tvoření byly stejné. Zkoumání odporu úseku po milimetrových částech ukázalo, že odpor skokově narůstá pouze v jednom bodě. Pod mikroskopem bylo často vidět zlom či nespojitou část, v některých případech tomu tak nebylo. Místa, kde byla spojitá část tuhy užší také měla znatelně větší odpor.

Z této úvahy vychází myšlenka, vytvořit model čáry jako oblast, kde je více než dané množství grafitu, a zkoumat, jestli je spojitá. Množství grafitu odpovídá tmavosti na obrázku. Pro experiment nebyly použity upravené tuhy: nejde o měření konkrétních hodnot, ale pouze o zkoumání korelace spojitosti na obrázku a spojitosti odporu.

Příklad na obrázku:



Algoritmus postupuje vždy zleva doprava a vybírá pixely, které mají tmavost nad 70% a zároveň jsou blízko již vybraných pixelů. Tím vybere vždy spojitou oblast – nespojitě části nejsou vybrány.

Ačkoli v určitých případech odhaduje algoritmus dobře, kde je odpor velký a kde malý (na obrázku např. v tmavé oblasti uprostřed), neukazuje spolehlivě, kde lze očekávat skokový nárůst odporu. Často narůstal odpor skokově i v místech s větší tmavostí, jindy byl konzistentní i v světlejších místech.

Model spojitosti je tedy nedostatečný pro předpovídání odporu.

Obraz a odpor

Koncept

Základ této části výzkumu tkví v tom, nalézt jakoukoli korelaci mezi vizuální podobou čáry a jejím odporem. K obdržení dat o čáře byla využita kamera, rozlišující až 300px po šířce čáry. Tmavosti pixelů čáry byly přepočítány na bodové “odpory”, a pak zapojeny do mapy odporů o velikosti obrázku. Z této soustavy odporů se pak vypočítá celkový odpor měřeného úseku. Cílem bude navrhnout takový model, který co nejlépe predikuje měřené odpory, nebo naopak ukázat, že to s danými prostředky není možné.

Předpoklady

K zjednodušení prováděných výpočtů bude využito několika předpokladů:

- Všechna tuha na papíře je shora viditelná, žádná není skrytá pod vlákna papíru.
- Pixely se stejnou tmavostí mají podobný odpor; odpor narůstá se světlostí pixelu.
- Papír nevede proud; každý bod, kde není vidět tuha, nevede proud. To umožní počítat pouze s tmavými body.

Proměnné

Vstupní proměnné jsou tmavosti všech pixelů obrázku čáry, výstupní proměnnou je odhadovaný odpor, a jeho korelace s měřeným odporem.

Ustálené proměnné	Hodnota	Důvod
Šířka čáry	6mm	Širší čára znamená, že se nanáší více tuhy na papír, ale zároveň se tlak tuhy více rozkládá, čímž bude získána značně jiná stopa.
Složení tuhy	odpovídá měkkosti 8B	Stejně množství grafitu ve všech částech zaručuje konzistentnost měření.
Tmavost papíru a grafitu	-	Papír bude po zhotovení čar vyfocen s podsvícením zespoda, proměnlivá měřená tmavost stejných bodů by narušila výpočty.
Povrch papíru	odpovídá standardnímu papíru 80g/m ²	Přestože si jsou skoro všechny standardní papíry podobné, pro konzistenci měření (hl. pro stejnou tmavost papíru) bude použit jen jeden druh. Speciální druhy papíru nebudou zkoumány - cílem je najít model chování grafitu, ne papíru.

Rozlišení čáry	300px na šířku	
----------------	----------------	--

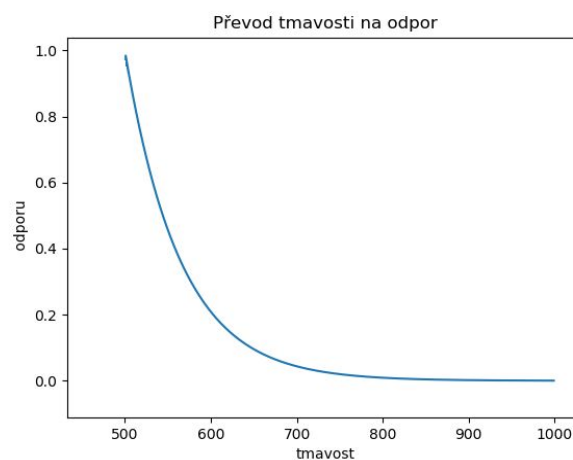
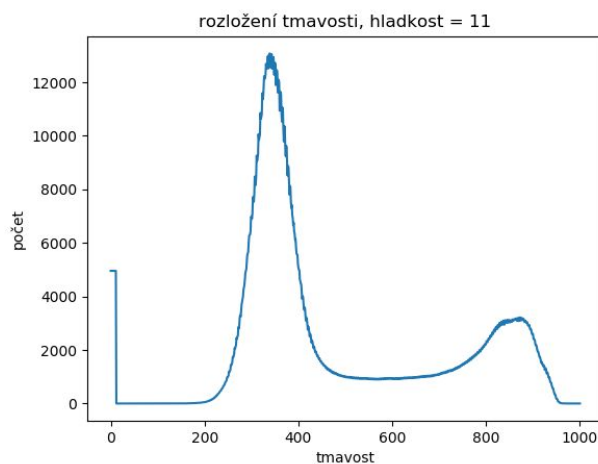
Postup

1. Pomocí tužky, seřízlé a vyhlazené vodorovně s podložkou a stabilně uchycené se nanese na papír stopa. Zatížení tužky je 24.4N. Podložka je z hladkého skla.
2. Oblast s nanesenou tuhou se prosvítí zespoda tak, aby bylo zřetelně vidět, kde se zachytil grafit a kde je jen papír. Osvětlení je vždy stejné, aby neměly obrázky různé tmavosti.
3. Oblast se vyfotí (zpravidla na několik částí) a needitovaný výstup se poskládá do bitmapy (.png).

Příklad:



4. U každého pixelu je vypočítána tmavost. Tmavost menší než určitá hranice odpovídá papíru, má tedy nekonečný odpor. Pixely tmavší než tato hranice jsou považovány za vodivé. Pro příklad nahoře je vidět, že papír má tmavosti zhruba 20%-50% (tj. 200-500 na grafu vlevo). Hranice byla tedy určena na 50%, odpor pro tmavosti 50%-100% je pak dopočítán pro každý pixel (graf vpravo):



5. Obraz je rozdělen na části, a pro každou je vypočítán odhadovaný odpor pomocí všech bodových odporů (a jejich pozic). Byly vyzkoušeny různé algoritmy, jejich rozbor je v části Zpracování dat.
6. Sečtením dílčích odporů vznikne číslo, které by mělo přímo korelovat s měřeným odporem.

Zpracování dat

Pro výpočet odporu byly vyzkoušeny různé algoritmy; jelikož obrázek obsahuje řádově miliony pixelů, není možné z časového hlediska počítat odpor jako odporovou síť tvořenou všemi pixely jako jednotlivými odpory. Je nutno tedy počítat pomocí zjednodušeného modelu.

Model průměrných vzdáleností

Tento model rozděluje obrázek na podlouhlé, 50-100px široké části. V každé části, pro každé dva sousední pixely spočítá jejich “vzdálenost” jako součet jejich odporů. “Vzdálenost” každých dvou pixelů je pak nejmenší součet všech cest, které dohromady dávají spojitou cestu mezi nimi. Odpor dané části pak je v tomto modelu roven průměrné “vzdálenosti” každé cesty mezi dvěma pixely.

Celkově, promítá nejen hodnoty odporu, ale i nerovnoměrné či nespojité rozložení do výsledného odporu: nespojitost způsobuje, že nejkratší cesta vede “oklikou”; nerovnoměrné rozložení se zase promítá do vysoké vzdálenosti jen v jedné oblasti.

Model náhodných cest

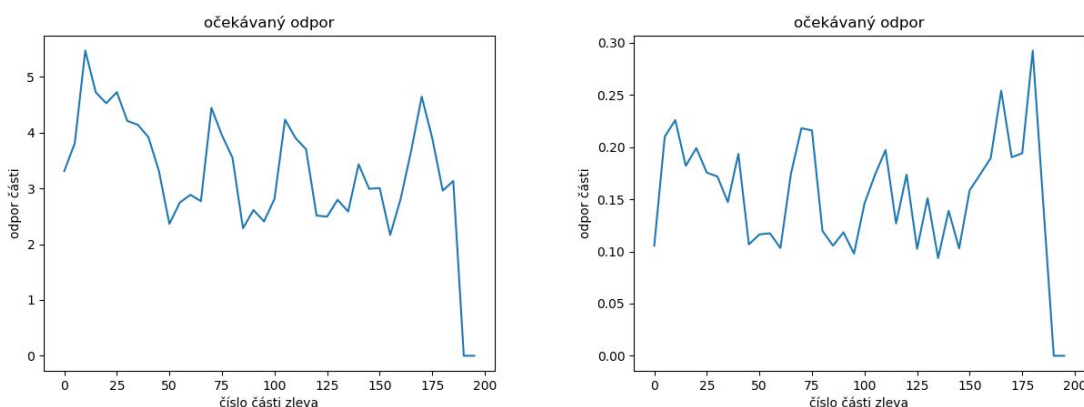
Tento model počítá s podobnou koncepcí cest i segmentů obrázku jako předchozí, místo nejkratších cest však bere náhodné: čím menší odpor, tím větší šance, že ji vybere. Cesty vedou vždy od pixelů na jednom kraji k pixelům na druhém kraji segmentu.

Tímto v podstatě simuluje pohyb proudu: daný elektron pravděpodobněji projde místem s nižším odporem. V případě, že by bodové odpory opravdu odpovídaly reálným odporům, měl by tento model být přesný při výpočtu většího množství náhodných cest.

Omezený je pouze tím, že je dělený na části; méně částí je časově náročnější na výpočet (je potřeba miliony náhodných cest).

Analýza

Přehled vypočítaných průběhů odporů čáry (viz výše) rozdělené na 200 částí po zhruba 50px. Vlevo průměrné vzdálenosti, vpravo náhodné cesty.



Obě metody ukazují jiné čísla, jejich poměrné hodnoty jsou ale podobné. Místa s nižším odhadovaným odporem měly z větší části také nižší měřený odpor; obdobně u opačných extrémů

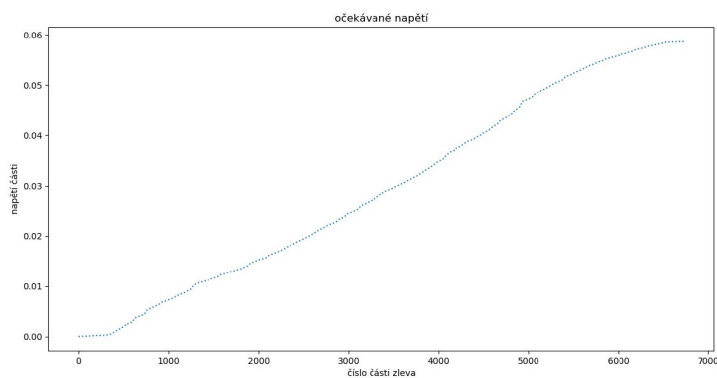
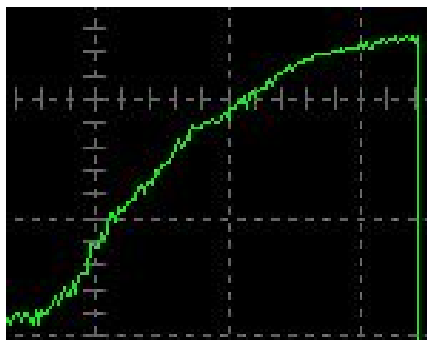
Přesto, výsledné hodnoty odporů korelovaly jen málo s opravdovým odporem (nezáleží na hodnotách, ale jejich poměrech):

Čára č.	Skutečný odpor (MΩ)	Model průměrné vzdálenosti	Model náhodných cest
1	2.9	0.43	0.35
2	0.98	0.44	0.38
3	0.417	0.34	0.27
4	0.851	0.47	0.35
5	0.286	0.30	0.20
6	0.235	0.28	0.23
7	0.521	0.54	0.28
8	0.533	0.59	0.33
Koeficient korelace		0.18	0.58

Přesnost výpočtů je různá, výchylku na čáře č. 1 však žádný nezaznamenal. Nižší koeficient korelace u metody průměrné vzdálenosti je způsoben tím, že jsou hodnoty předpovězené touto metodou málo navzájem rozdílné. Lépe však předpovídá lokální výkyvy.

Průběh napětí

Jelikož se ukázaly obě metody vhodné spíše pro pozorování průběhu odporu než pro odhadování celkového odporu, lze ještě zkoumat přímo průběh. Na grafu je napětí naměřené osciloskopem vpravo a integrovaná křivka vypočítaného odporu vlevo (pro čáru výše).



Je vidět, že místy jsou si křivky podobné. Opět však algoritmus nepoznal místa se zvýšeným odporem.

Závěr a evaluace

I přes všechny předběžné výzkumy a pozorování se nepodařilo vytvořit spolehlivý model pro výpočet odporu. Odpor čáry samotný je závislý na mnoha parametrech a i s konstantními podmínkami pro nanášení grafitu je nepředvídatelně proměnlivý.

Příčiny nepřesnosti lze rozebrat na několik základních:

- Špatný převod tmavosti na odpor. Je možné, že relace mezi tmavostí bodu a jeho odporem měla být zcela jiná. To by měnilo úplně každý výpočet jiným způsobem.
- Málo dat. Pixelů bylo dost na většinu výpočtů, skryté nespojivosti v grafitu ale nebyly odhaleny výpočtem. To nasvědčuje tomu, že tyto jevy ani nebyly odhalitelné pomocí dostupných dat.
- Nutnost zjednodušovat výpočty. Důsledkem nedostatečné výpočetní kapacity bylo omezení množství dat (lepší fotografie by ale vyžadovaly lepší výpočetní kapacitu) i počtu experimentů, a taky zjednodušování modelů - což se projevilo hlavně v nutnosti dělit obraz na části.

Náhodné nespojivosti a skokově zvyšující se odpory byly často nedetekovatelné s daným rozlišením. U čar nakreslených s pomocí menšího tlaku bylo zaznamenáno více takových jevů.

Závěrem je, že pomocí použitých nástrojů není možné spolehlivě předvídat odpor. Lepší předvídatelnost by mohla být získána pomocí lepších vstupů, více dat a přesnějších výpočtů; alternativně, je možné, že je chování grafitu tak chaotické, že není možné rozumně získat přesné výpočty, že kvantum dat k tomu potřebných je daleko za úrovní tady předvedenou.

Možný další postup

- Další výzkum by mohl navazovat a zkoušet takto analyzovat větší množství čar, pro širěji použitelný model.
- Naopak, je možné postupovat víc do hloubky a zkoumat čáry více zblízka, pod větším rozlišením, ale zato na jen velmi krátkých úsecích.
- Je tu možnost rozšířit teoretický podklad a zkusit ho provázat s experimentálními modely.

Využití

Možnost doslova kreslit obvody na papír se původně jevila jako široce využitelná, její použitelnost (obzvlášť ve větším měřítku) ale klesá díky zcela náhodně proměnlivému odporu. Navíc se odpor vždy pohybuje v řádu desítek a stovek tisíc ohmů.

- Možnost tvořit levně jednoduché “integrované” obvody a logické obvody.
- Hodí se na menší projekty např. jako učební pomůcka

Grafitové čáry by se daly využít ve větším měřítku za předpokladu zlepšení jejich vodivých vlastností. Těchto vlastností se dosahuje pomocí přidávání nanočástic stříbra [2], které má vysokou vodivost. Toto vylepšení by mohlo vést k tzv. papírové elektronice. Mohlo by se ušetřit místo a finance na výrobu elektroniky. Dalším problémem je hořlavost papíru. Takže by se grafitové čáry musely nanášet na jiný materiál, který by byl nehořlavý nebo odolný vůči vyšším teplotám.