



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

## ELEKTRICKÁ CHARAKTERIZACE UNIPOLÁRNÍHO TRANZISTORU S KANÁLEM TVOŘENÝM Z GRAFENU

ELECTRICAL CHARACTERIZATION OF A UNIPOLAR TRANSISTOR WITH A GRAPHENE CHANNEL

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

František Žeravík

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Imrich Gablech, Ph.D.

BRNO 2021

# Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Mikroelektronika a technologie**

Ústav mikroelektroniky

**Student:** František Žeravík

**ID:** 211252

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2020/21

## NÁZEV TÉMATU:

**Elektrická charakterizace unipolárního tranzistoru s kanálem tvořeným z grafenu**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Student se seznámí s problematikou elektrických vlastností grafenu. Prostuduje metody charakterizace a princip elektrické vodivosti grafenu. Na základě získaných poznatků provede charakterizaci unipolárních tranzistorů s kanálem tvořeným grafenem pomocí standardních litografických metod tenkovrstvou technologií. Zaměřte se zejména na volt-ampérovou charakterizaci.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle doporučení vedoucího práce.

**Termín zadání:** 8.2.2021

**Termín odevzdání:** 3.6.2021

**Vedoucí práce:** Ing. Imrich Gablech, Ph.D.

**doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.**  
předseda rady studijního programu

## UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **Abstrakt**

Bakalářská práce se zabývá základními vlastnostmi grafenu, způsoby jeho syntézy, dopování, přenosu, charakterizace a také popisem a výrobou unipolárního tranzistoru s kanálem z grafenu. Praktická část se zaměřuje na jeho elektrickou charakterizaci. Konkrétně je práce blíže zaměřena na měření odporu kanálu, jeho závislosti na hradlovém napětí, hledání Diracova bodu a určení závislosti vodivosti kanálu na délce žíhání. Ve druhé části je zkoumán posun Diracova bodu a změna elektrických vlastností grafenu při ohýbání MEMS struktury s unipolárním tranzistorem s kanálem z grafenu.

## **Klíčová slova**

unipolární tranzistor, grafen, syntéza, metody charakterizace, volt-ampérová charakteristika, dvoubodová metoda, ohyb, Diracův bod

## **Abstract**

This work deals with basic properties of graphene, methods of its synthesis, doping, transfer, characterization and description of basic properties and fabrication of field-effect transistor with graphene channel. The practical part focuses on electrical characterization of a field-effect transistor with graphene channel. Concretely on measuring the channel resistance, its dependence on gate voltage, finding the Dirac point and determining the dependence of the channel conductivity on the annealing length. Lastly, the shift of the Dirac point and the change of the electrical properties of graphene during bending of a MEMS structure with a unipolar transistor with a graphene channel are investigated.

## **Keywords**

unipolar transistor, graphene, synthesis, characterization methods, volt-ampere characteristic, two-point method, bend, Dirac point

## **Bibliografická citace**

ŽERAVÍK, František. *Elektrická charakterizace unipolárního tranzistoru s kanálem tvořeným z grafenu*. Brno, 2021. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/134689>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky. Vedoucí práce Imrich Gablech.

# Prohlášení autora o původnosti díla

**Jméno a příjmení studenta:** *František Žeravík*

**VUT ID studenta:** *211252*

**Typ práce:** *Bakalářská práce*

**Akademický rok:** *2020/21*

**Téma závěrečné práce:** *Elektrická charakterizace unipolárního tranzistoru s kanálem tvořeným z grafenu*

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 2. června 2021

-----  
František Žeravík

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Imrichu Gablechovi, PhD za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc. Také bych chtěl poděkovat Ing. Jakubu Piastekovi za konzultaci, cenné rady a poznatky při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne: 2. června 2021

-----  
František Žeravík

Experimentální část této bakalářské práce byla realizována na výzkumné infrastruktuře  
vybudované v rámci projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0072  
**Centrum senzorických, informačních a komunikačních systémů (SIX)**  
operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace.

Část práce byla provedena za podpory výzkumné infrastruktury CzechNanoLab (ID LM2018110, MŠMT, 2020–2022), CEITEC Vysoké učení technické v Brně.



# Obsah

<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>70</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>11</b>
<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>13</b>
<b>ÚVOD .....</b>	<b>14</b>
<b>1. GRAFEN.....</b>	<b>15</b>
1.1 HISTORIE.....	15
1.2 STRUKTURA .....	16
1.3 ELEKTRICKÉ VLASTNOSTI .....	19
1.4 MECHANICKÉ VLASTNOSTI.....	20
1.5 TEPELNÉ VLASTNOSTI .....	20
1.6 CHEMICKÉ VLASTNOSTI .....	22
1.7 OPTICKÉ VLASTNOSTI.....	23
<b>2. SYNTÉZA GRAFENU .....</b>	<b>25</b>
2.1 MECHANICKÁ EXFOLIACE .....	25
2.2 CHEMICKÁ EXFOLIACE .....	26
2.3 CHEMICKÁ SYNTÉZA – REDUKCE GRAFENU.....	27
2.4 CVD – CHEMICKÁ DEPOZICE Z PLYNNÉ FÁZE.....	27
<b>3. DOPOVÁNÍ.....</b>	<b>29</b>
3.1 CHEMICKÉ DOPOVÁNÍ .....	29
3.2 DOPOVÁNÍ PŮSOBENÍM ELEKTRICKÉHO POLE .....	30
<b>4. PŘENOS GRAFENU .....</b>	<b>32</b>
<b>5. METODY CHARAKTERIZACE .....</b>	<b>33</b>
5.1 MĚŘENÍ ELEKTRICKÉ REZISTIVITY .....	33
5.1.1 Čtyřbodová metoda.....	33
5.1.2 Van der Pauwova metoda .....	35
5.2 RAMANOVA SPEKTROSKOPIE.....	36
5.3 MIKROSKOPIE ATOMÁRNÍCH SIL.....	37
5.4 INFRAČERVENÁ SPEKTROSKOPIE S FOURIEROVOU TRANSFORMACÍ.....	38
5.5 RENTGENOVÁ FOTOELEKTRONOVÁ SPEKTROSKOPIE.....	40
<b>6. FET S KANÁLEM Z GRAFENU.....</b>	<b>41</b>
6.1 VLASTNOSTI.....	41
6.2 VÝROBA.....	42
6.3 TRANSPORTNÍ VLASTNOSTI .....	42
<b>7. ELEKTRICKÁ CHARAKTERIZACE GFET.....</b>	<b>44</b>
7.1 MĚŘENÍ ODPORU KANÁLU .....	46
7.2 MĚŘENÍ DIRACOVA BODU .....	51
7.3 MĚŘENÍ VLASTNOSTÍ GRAFENOVÉHO KANÁLU PŘI OHYBU .....	54
<b>8. ZÁVĚR.....</b>	<b>59</b>

<b>LITERATURA.....</b>	<b>61</b>
------------------------	-----------

# SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Alotropy uhlíku: a) 2D grafen, b) 0D fulleren, c) 1D uhlíková nanotrubička, d) 3D grafit [11].....	17
1.2	a) Atomová struktura uhlíku, b) elektronová konfigurace uhlíku, c) tvorba hybridních orbitalů $sp^2$ , d) krystalová mřížka grafenu, kde A a B jsou atomy uhlíku patřící do různých podmřížek, $a_1$ a $a_2$ jsou vektory elementárních buněk, e) vazby $\sigma$ a $\pi$ vytvořené v hybridním orbitalu $sp^2$ [10].....	18
1.3	a) Šestiúhelníková mřížka jednovrstvého grafenu, kde bílé (černé) tečky označují atomy podmřížek A (B), b) reciproká mřížka jednovrstvého grafenu, kde šedý šestiúhelník označuje odpovídající Brillouinovu zónu [10].....	18
1.4	Zobrazení valenčního a vodivostního pásu grafenu dotýkajícího se v tzv. Diracových bodech [17]	20
1.5	Graf znázorňující specifická tepla grafenu, grafitu a diamantu. Křivky zobrazují numericky vypočtené hodnoty, body experimentálně naměřená data. Z grafu vidíme, že hodnota specifického tepla grafenu je pro nízké teploty vyšší než u grafitu. Hodnoty se vyrovnávají při teplotě $\approx 100$ K a dále jsou již prakticky identické. [23].....	22
1.6	Dva typy okrajů struktury grafenu: a) cik-cak, b) křeslo. Okraj je označen tučnou čarou. Tmavé a světlé body označují atomy podmřížek A a B. [27].....	23
2.1	Znázornění jednotlivých kroků mechanické exfoliace grafenu pomocí lepící pásky [33].....	26
2.2	Mechanismus růstu grafenu na niklovém substrátu metodou CVD [40].....	28
3.1	Diagram znázorňující dopování p-typu a n-typu pomocí elektrického dopování, kde $E_{LUMO}$ a $E_{HOMO}$ znázorňují energii nejnižší, resp. nejvyšší neobsazené, resp. obsazené molekulové hladiny dopantu a $E_F$ energii Fermiho hladiny [43].....	30
4.1	Schématy diagram přenosu grafenu s využitím polymerní vrstvy PMMA [45].....	32
5.1	Schématy diagram čtyřbodové metody. Čtyři hroty se dotýkají povrchu vzorku a vzdálenost (s) mezi nimi je stejná. Proud je do vzorku dodáván hrotem 1 a odváděn hrotem 4. Úbytek napětí je měřen mezi hroty 2 a 3. [49].....	34
5.2	Obvodové schéma čtyřbodové sondy zobrazující odpory drátů ( $R_W$ ), kontaktní odpory ( $R_C$ ) a odpory vzorku ( $R_S$ ). Zelené šipky ukazují směr tekoucího proudu. [49].....	34
5.3	Jednotlivé konvence měření rezistivity van der Pauwovou metodou [51].....	35
5.4	Schématy diagram Rayleighova (a) a Ramanova (b, c) rozptylu [55].....	36
5.5	Schématy diagram jednoduchého Ramanova spektrometru [57].....	37
5.6	Schéma zařízení pro AFM analýzu s jednotlivými pracovními režimy, a) kontaktní režim, b) bezkontaktní režim, c) „třukací“ režim [58].....	38
5.7	Schéma interferometru používaného pro měření metodou FTIR [64].....	40
6.1	Schématy nákres unipolárního tranzistoru s kanálem z grafenu v zapojení s „back gate“.....	42
6.2	Teoretický průběh vodivosti dokonalého grafenu v závislosti na napětí $U_G$ [72].....	43
7.1	Analyzátor parametrů Keithley 4200A-SCS [74].....	44
7.2	GFET S-10 firmy GRAPHENEA [75].....	45
7.3	Struktura jednoho GFET na čipu GFET S-10 [71].....	46
7.4	a) Schéma struktury čipu H11 vyráběného na CEITECu, b) přiblížení oblasti s elektrodami drain (D), source (S) a gate (G).....	46
7.5	Schéma připojení hrotů pro dvoubodové měření odporu [76].....	47
7.6	VA charakteristiky GFET struktur na čipu GRAPHENEA s délkou $L = 30$ $\mu\text{m}$ a různými šířkami pro $U_{GS} = 0$ V.....	48
7.7	Histogram z naměřených hodnot odporu na čtverec u čipů s MEMS, na ose x jsou vyneseny intervaly odporů na čtverec, na ose y četnost výskytu naměřených hodnot v těchto intervalech.....	49
7.8	VA charakteristika GFET na čipu GRAPHENEA s rozměry kanálu $50$ $\mu\text{m} \times 50$ $\mu\text{m}$ v závislosti na velikosti $U_{GS}$ .....	51

7.9	VA charakteristika MEMS s GFET na čipu z CEITECu s rozměry kanálu $9 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$ v závislosti na velikosti $U_{GS}$ .....	51
7.10	Závislost proudu $I_D$ na napětí $U_{GS}$ bez žíhání.....	52
7.11	Závislost $I_D$ na $U_{GS}$ při různých dobách žíhání, nahoře je přiblížena oblast Diracova bodu .....	53
7.12	Závislost $I_D$ a $\mu$ na délce žíhání při $U_{GS} = 0 \text{ V}$ .....	54
7.13	Struktura GFET s ohebným nosníkem .....	55
7.14	Průběh $I_D$ v čase při ohýbání nosníku délky $200 \mu\text{m}$ o $70 \mu\text{m}$ .....	56
7.15	Průběh $I_D$ v čase při různých mírách ohybu nosníku délky $200 \mu\text{m}$ .....	56
7.16	Závislost $I_D$ na ohybu při $U_{GS} = 0 \text{ V}$ a $U_{DS} = 1 \text{ V}$ , body představují průměr ze všech naměřených hodnot pro danou velikost ohybu, chybové úsečky udávají rozptyl těchto hodnot od průměru.....	57
7.17	Závislost $I_D$ na $U_{GS}$ bez ohybu a s ohybem $60 \mu\text{m}$ , nahoře je přiblížen posun Diracova bodu .....	58

## SEZNAM TABULEK

7.1	Základní specifikace GFET S-10 [71].....	45
7.2	Vypočtené hodnoty pro měřené GFET struktury na čipu GRAPHENEA.....	48

# ÚVOD

Grafen je jedním z prvních a zároveň nejznámějších zástupců dvourozměrných krystalů. 2D materiály a systémy se v mnoha ohledech zásadním způsobem liší od materiálů trojrozměrných. Grafen můžeme využít jako modelový systém pro obecné studium fyziky a chemie dvourozměrných struktur, a proto od své první izolace v roce 2004 přitahuje zájem mnoha akademiků a výzkumných institucí. Grafen má díky své široké škále velmi unikátních vlastností potenciál pro využití ve velkém množství aplikací, jako jsou například nové typy baterií, senzorů nebo solárních článků. [1]

Teoretická část této semestrální práce se zabývá nejprve stručnou historií včetně toho, kdy, kým a kde byl nakonec poprvé grafen objeven. Následuje popis jeho struktury a elektrických, mechanických, tepelných, chemických a optických vlastností. Dále jsou rozebrány jednotlivé využívané metody syntézy včetně mechanické exfoliace, pomocí které byl grafen izolován poprvé, způsoby přenosu grafenu získaného metodou chemické depozice z plynné fáze a techniky používané k jeho charakterizaci. V neposlední řadě jsou také popsány vlastnosti a výroba unipolárního tranzistoru s kanálem z grafenu, označovaného zkratkou GFET.

Praktická část se zabývá elektrickou charakterizací GFET s využitím hrotové měřicí stanice. Měřením jsou podrobeny dva typy vzorků, čip s GFET strukturami vyráběný komerčně metodou chemické depozice z plynné fáze a čip s mikroeletromechanickými systémy (MEMS) pro zkoumání vlastností grafenu při jeho ohýbání. Jsou stanoveny hodnoty a průběhy základních elektrických veličin pro GFET s různými rozměry kanálů a různá hradlová napětí. Jednou ze zkoumaných závislostí je také změna vodivosti a polohy Diracova bodu s délkou žíhání, které slouží k odstranění vlhkosti adsorbované na povrchu kanálu. V druhé části se práce zaměřuje na ohyb grafenu a s tím souvisejícími změnami jeho vlastností, kterými jsou především změna vodivosti při konstantním napětí na hradle z důvodu posunu Diracova bodu a s tím související změny koncentrace dotovaných nosičů. Právě řízení elektrických vlastností mechanickou deformací dvourozměrných materiálů je v dnešní době studovaným jevem, který by mohl najít široké uplatnění v ohebných elektronických zařízeních nebo senzorech.

# 1. GRAFEN

Během posledních let došlo k velkému nárůstu zájmu o grafen. Ovšem materiály odvozené od oxidu jeho prekurzoru, grafitu, byly popsány a vyrobeny již v roce 1962. Postupem času byly objevovány dosud nevídané vlastnosti grafenu, které nebyly dříve u jiných materiálů pozorovány. Díky tomu se stal velmi atraktivním v mnoha vědních oborech a aplikacích od použití jako zpevňovacího materiálu v různých kompozitech přes fotovoltaiku a ukládání energie až po sensoriku, mikro a optoelektroniku. [2]

## 1.1 Historie

Příběh grafenu sahá až do roku 1859, ve kterém popsal sir Benjamin Collins Brodie vysoce lamelární strukturu tepelně redukováného oxidu grafitu. Samotná struktura grafitu byla však objevena až v roce 1916. První vědecké práce, které popisovaly teoretickou existenci grafenu v podobě jedné izolované vrstvy grafitu a jeho výborné elektrické vlastnosti, byly publikovány v roce 1940. O 60 let později nebyly tyto domněnky pouze potvrzeny, ale byly objeveny i další charakteristické vlastnosti jedné vrstvy grafitu – vysoká pohyblivost nosičů náboje, výjimečné hodnoty Youngova modulu nebo vysoká hodnota modulu pružnosti. V roce 1947 se podařilo panu Wallacemu spočítat těsnost uspořádání, respektive vzdálenost mezi jednotlivými atomy uhlíku v krystalové mříži grafenu. [2] [3] [4]

První pohled na několikavrstvou strukturu grafitu dal světu příchod elektronové mikroskopie v roce 1948. Tato událost byla těsně následována pozorováním jednotlivých vrstev grafenu pány Ruessem a Vogtem. Od této chvíle začaly ve světě snahy o izolaci jedné vrstvy grafitu – grafenu. [3]

V roce 1961 se podařilo skupině vědců pod vedením Hannse-Petera Boehma izolovat a identifikovat jednu vrstvu oxidu grafenu pomocí transmisní elektronové mikroskopie (TEM) a rentgenové difrakce (XRD). K izolaci využili přechodné konverze oxidu grafitu na oxid grafenu. V té době již bylo známo, že grafit lze oxidovat vystavením účinkům působení roztoku draslíku nebo kyseliny sírové. Díky této oxidaci se zvětší vzdálenost mezi jednotlivými vrstvami na dvojnásobek až trojnásobek původní hodnoty a je náchylná k dalšímu rozšiřování. Toho dosáhli pomocí polárních kapalin. Tímto postupem se dostali vědci až do bodu, kdy se oxid grafitu rozložil na jednotlivé vrstvy (vločky), které tvořily oxid grafenu. Tyto vločky byly poté pozorovány pomocí TEM a jejich rozměry ověřeny pomocí XRD. Boehm byl také autorem oficiálního prohlášení, ve kterém formálně definoval pojem grafen. Toto prohlášení vydal v roce 1994. [5]

Samotný grafen byl poprvé izolován vědci Andre Geimem a Konstantinem Novoselovem, kteří publikovali své výsledky na grafenových strukturách v říjnu roku 2004. V této publikaci popisovali výrobu, identifikaci a charakterizaci grafenu pomocí mikroskopie atomárních sil (AFM). K izolaci grafenu použili jednoduchou metodu

mechanické exfoliace. Oddělení jednotlivých vrstev grafenu z krystalu grafitu dosáhli použitím obyčejné lepicí pásky. Kromě toho se jim také podařilo dostat vzorky s několika vrstvami grafenu do Hallovy sondy a připojit k ní elektrody. [6]

Za tyto pokusy obdrželi oba zmiňovaní vědci v roce 2010 Nobelovu cenu. Toto udílení bylo ovšem doprovázeno nesouhlasem vědecké obce, která poukazovala na to, že k izolaci grafenu dopomohly především pokusy prováděné v dřívějších letech. Geim však uvedl, že Nobelova cena nebyla udělena za objev grafenu jako takového, nýbrž za pokusy a měření, které ve svých pracích popisovali. Podle něj se totiž jednalo o první zcela jednoznačnou izolaci jedné vrstvy grafitu, o kterém se ještě před rokem 2004 myslelo, že může být ve své jednovrstvé formě nestabilní. [6]

## 1.2 Struktura

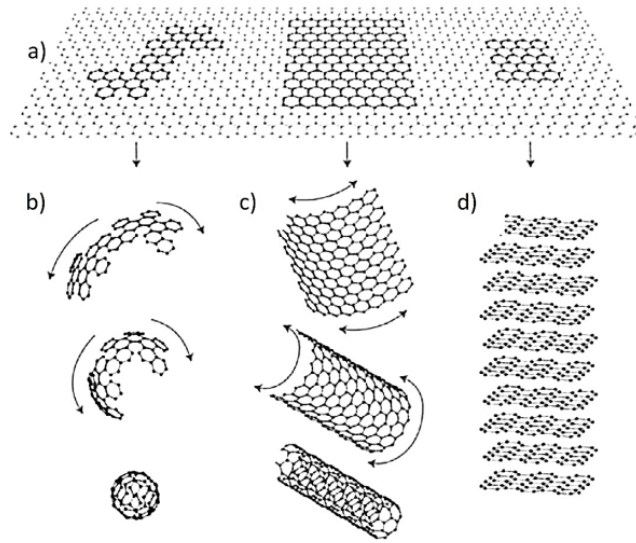
Grafen je dvourozměrná hexagonálně uspořádaná forma atomů uhlíku, která má tloušťku pouze jednoho atomu – 0,335 nm. Je to doposud nejtenčí materiál, který lidstvo poznalo. Tato struktura dává grafenu některé neobvyklé a pozoruhodné elektrické, mechanické, optické a teplotní vlastnosti, jako třeba velmi velkou specifickou plochu, vynikající tepelnou vodivost, vysokou pohyblivost nosičů náboje, hodnotu Youngova modulu, velmi vysokou propustnost světla, chemickou stabilitu a podobně. [7] [8] [9]

Díky velmi těsnému uspořádání atomů v krystalové mříži se jedná o jeden z nejstabilnějších prvků. Je to základní stavební blok všech materiálů založených na grafitu. Může být využit k výrobě bezrozměrných fullerenu, jednorozměrných uhlíkových nanotrubic nebo trojrozměrných grafitových struktur (viz obrázek 1.1). [9]

Uhlík je šestý prvek v periodické tabulce prvků. Jeho elektronovou konfiguraci můžeme vidět na obrázku 1.2(b). Jádro atomu uhlíku je obklopeno šesti elektrony, z nichž čtyři se nachází ve valenční vrstvě. Tyto elektrony mohou tvořit tři typy hybridizace –  $sp$ ,  $sp^2$  a  $sp^3$  (viz obrázek 1.2(b)). Obrázek 1.2(c) ilustruje vznik hybridizovaných orbitalů  $sp^2$ . Když atomy uhlíku sdílejí  $sp^2$  elektrony se svými třemi sousedícími atomy, vytvoří se rovinná struktura podobná včelím plástvím. Elementární buňka krystalu grafenu obsahuje dva atomy uhlíku a elementární vektory  $a_1$  a  $a_2$  mají stejnou mřížkovou konstantu 2,46 Å (viz obrázek 1.2(d)). [10]

V  $sp^2$  vazbě mezi dvěma sousedními atomy uhlíku v grafenové vrstvě (viz obrázek 1.2(e)) je přítomna i tzv. vazba  $\pi$ , která je tvořena orbitaly  $2p_z$  a je kolmá k rovině krystalové mříže. V rovině krystalové mříže jsou naopak přítomny vazby  $\sigma$ , které jsou tvořeny zbylými valenčními orbitaly –  $2s$ ,  $2p_x$  a  $2p_y$ . Kovalentní  $\sigma$  vazba má však velmi krátkou interatomovou délku, a to  $\approx 1,42$  Å. Díky tomu je ještě silnější než  $sp^3$  vazby mezi atomy uhlíku v diamantu. [10]





Obrázek 1.1 Alotropy uhlíku: a) 2D grafen, b) 0D fulleren, c) 1D uhlíková nanotrubička, d) 3D grafit [11]

Hexagonální strukturu jednovrstvého grafenu lze vidět na obrázku 1.3(a). Dva základní mřížkové vektory,  $a_1$  a  $a_2$ , jsou popsány rovnicemi

$$\vec{a}_1 = \frac{a}{2}(1, \sqrt{3}), \quad (1.1)$$

$$\vec{a}_2 = \frac{a}{2}(1, -\sqrt{3}), \quad (1.2)$$

kde  $a$  označuje mřížkovou konstantu, která udává vzdálenost mezi elementárními buňkami. Její hodnota je

$$a = \sqrt{3}a_0 \approx 1,42\sqrt{3} = 2,46 \text{ \AA}, \quad (1.3)$$

kde  $a_0$  označuje vzdálenost mezi sousedními atomy uhlíku. Polohové vektory atomů  $B_x$  ( $x = 1, 2, 3$ ) vzhledem k atomu A jsou označeny jako  $\delta_x$  a dány rovnicemi

$$\vec{\delta}_1 = \left(0, \frac{a}{\sqrt{3}}\right), \quad (1.4)$$

$$\vec{\delta}_2 = \left(\frac{a}{2}, -\frac{a}{2\sqrt{3}}\right), \quad (1.5)$$

$$\vec{\delta}_3 = \left(-\frac{a}{2}, -\frac{a}{2\sqrt{3}}\right). \quad (1.6)$$

Obrázek 1.3(b) znázorňuje reciprokovou mřížku jednovrstvého grafenu. Křížky představují body reciprokové mřížky a šedý šestiúhelník první Brillouinovu zónu. Primitivní vektory reciprokové mřížky označené  $b_1$  a  $b_2$  splňují podmínky

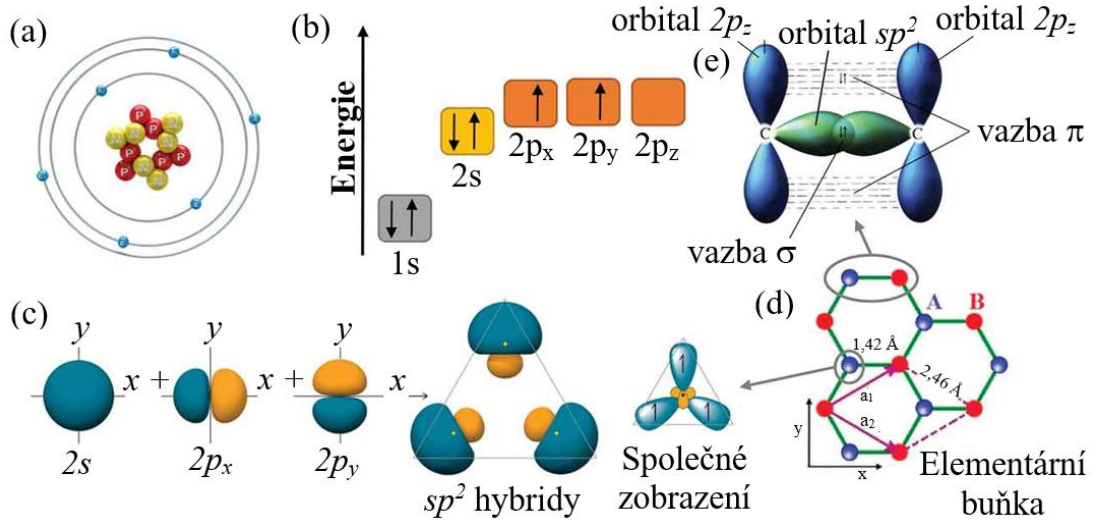
$$\vec{a}_1 \vec{b}_1 = \vec{a}_2 \vec{b}_2 = 2\pi, \quad (1.7)$$

$$\vec{a}_1 \vec{b}_2 = \vec{a}_2 \vec{b}_1 = 0. \quad (1.8)$$

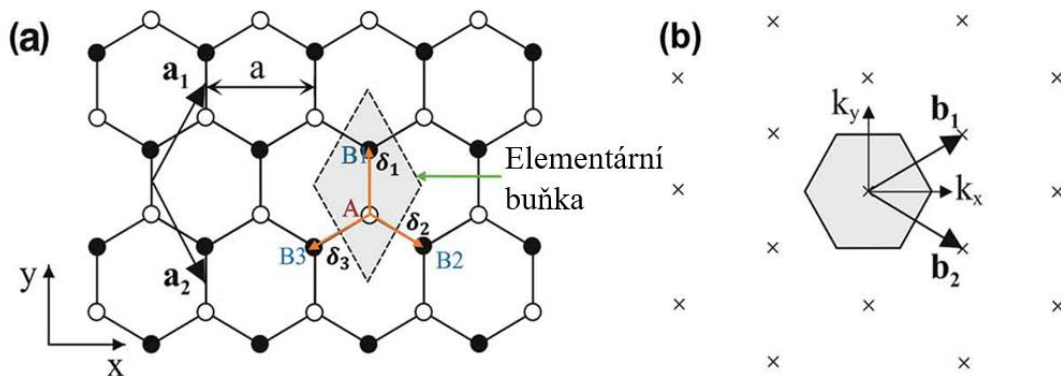
Z toho vyplývá, že pro  $b_1$  a  $b_2$  platí [10]

$$\vec{b}_1 = \left( \frac{2\pi}{a}, \frac{2\pi}{\sqrt{3}a} \right), \quad (1.9)$$

$$\vec{b}_2 = \left( \frac{2\pi}{a}, -\frac{2\pi}{\sqrt{3}a} \right). \quad (1.10)$$



Obrázek 1.2 a) Atomová struktura uhlíku, b) elektronová konfigurace uhlíku, c) tvorba hybridních orbitalů  $sp^2$ , d) krystalová mřížka grafenu, kde A a B jsou atomy uhlíku patřící do různých podmřížek,  $a_1$  a  $a_2$  jsou vektory elementárních buněk, e) vazby  $\sigma$  a  $\pi$  vytvořené v hybridním orbitalu  $sp^2$  [10]



Obrázek 1.3 a) Šestiúhelníková mřížka jednovrstvého grafenu, kde bílé (černé) tečky označují atomy podmřížek A (B), b) reciproká mřížka jednovrstvého grafenu, kde šedý šestiúhelník označuje odpovídající Brillouinovu zónu [10]

### 1.3 Elektrické vlastnosti

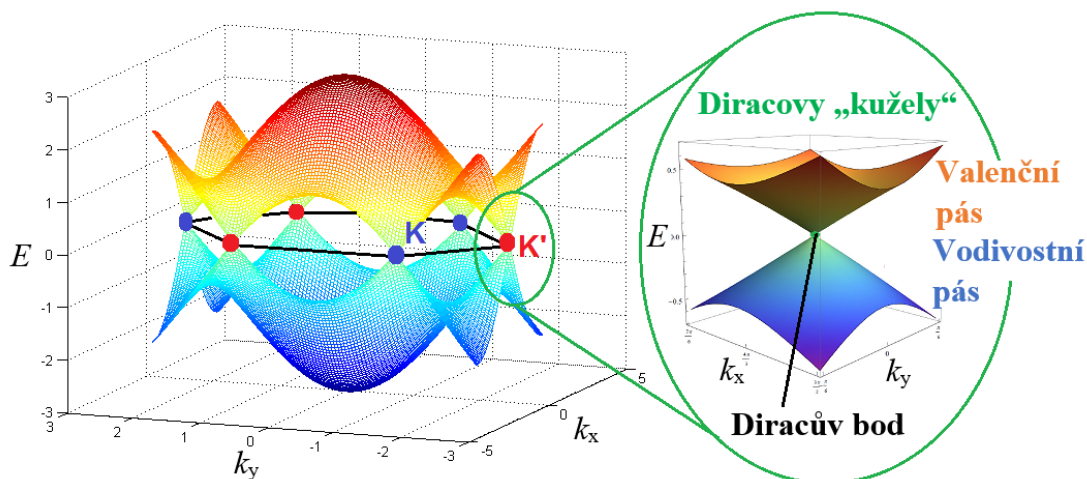
Jedním z důvodů, proč jsou vědci, zabývající se molekulární elektronikou, tak nadšení z grafenu, jsou jeho elektrické vlastnosti – je to jeden z nejlepších vodičů na Zemi. Vykazuje nejvyšší pohyblivost nosičů náboje při pokojové teplotě ze všech doposud změřených materiálů (až  $200000 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ). Jedinečné uspořádání atomů uhlíku umožňuje elektronům snadno cestovat extrémně vysokou rychlostí bez významné šance na rozptýl, což šetří podstatné množství energie, která je typicky v jiných vodičích tímto mechanismem ztracena. [12] [13] [14]

Jednou z nejlépe využívaných vlastností grafenu, především v sensorové technice, je to, že se jedná o polovodič s nulovou šířkou zakázaného pásu, oběma typy nosičů elektrického náboje – elektrony a dírami a velmi vysokou vodivostí. Nulová šířka zakázaného pásu je způsobena tím, že se valenční a vodivostní pás dotýkají ve dvou bodech ( $K$  a  $K'$ ) Brillouinovy zóny (viz obrázek 1.4). Tato vlastnost může být ovšem v některých aplikacích naopak překážkou. Jedním z takových případů jsou FET s kanálem z grafenu, kde nejsme díky nulové šířce zakázaného pásu schopni tranzistor úplně dovřít. Tento nedostatek se nejčastěji eliminuje určitým typem dopování. [13] [15]

Atom uhlíku má celkem šest elektronů. Dva ve vnitřní vrstvě a čtyři ve valenční vrstvě, které jsou k dispozici pro vazby s jinými atomy. V grafenu je každý atom vázán k dalším třem atomům uhlíku ve dvourozměrné rovině krystalové mřížky. Čtvrtý elektron je tak volný a může se podílet na vedení elektrického proudu. Jsou to tzv. elektrony pí ( $\pi$ ) a nachází se v prostoru nad a pod mřížkou grafenu. Elektrické vlastnosti grafenu jsou tedy v zásadě určovány vazbami a anti-vazbami právě těchto pí orbitalů. [15]

Vědci zjistili, že grafen je schopen vést elektřinu i na hranici nominálně nulové koncentrace nosičů, protože elektrony nejsou ničím zpomalovány ani nerekombinují. Tyto elektrony, které se pohybují kolem atomů uhlíku, interagují s periodickým potenciálem hexagonální grafenové mřížky, což vede ke vzniku kvazičástic. Tyto kvazičástice se jeví jako nehmotné a nazývají se „nehmotné Diracovy fermiony“. Díky tomuto jevu grafen nikdy nepřestane vést elektrický proud. [12]

Konduktivita čistého grafenu je  $\approx 10^8 \text{ S} \cdot \text{cm}^{-1}$ , což je vyšší hodnota než u stříbra a mědi, které jsou známé jako jedny z nejlepších vodičů. Při zvyšování počtu vrstev grafenu konduktivita postupně klesá až k hodnotě  $\approx 10^6 \text{ S} \cdot \text{cm}^{-1}$ . [12] [16]



Obrázek 1.4 Zobrazení valenčního a vodivostního pásu grafenu dotýkajícího se v tzv. Diracových bodech [17]

## 1.4 Mechanické vlastnosti

Jak již bylo zmíněno výše, grafen je jedním z nejtenčích materiálů, jehož monovrstva má tloušťku pouze jednoho atomu uhlíku  $\approx 0,335$  nm. Jeho působivé mechanické vlastnosti jsou jedním z důvodů, díky kterým vyniká jako samostatný materiál i jako podpůrná složka v různých kompozitech. Původem těchto výjimečných vlastností je stabilita  $sp^2$  vazeb tvořících hexagonální mřížku a zajišťujících odolnost vůči rovinným deformacím. Experimentálně bylo zjištěno, že grafen vykazuje jak nelineární elastické chování, tak křehkost v lomu. Současně může být snadno ohýbán, což je jedna z jeho specifických vlastností, která může být velmi výhodně využita v praxi. [8] [18] [19] [20]

Monovrstva grafenu neobsahující vady je považována za nejsilnější a nejpevnější materiál, který byl kdy měřen, až tři sta krát pevnější než ocel. Grafen má pevnost v tahu (maximální napětí, kterému může materiál odolat při roztahování nebo tažení před selháním nebo zlomením) přes 1 TPa. Grafen je také velmi lehký – jeho jeden metr čtvereční váží pouhých 0,77 mg. Jelikož se jedná o 2D strukturu, má také nejvyšší specifickou plochu povrchu ze všech materiálů. Pokud naskládáme několik vrstev grafenu na sebe, vytvoříme grafit, který je za normálních podmínek nejstabilnější trojrozměrnou formou uhlíku. [18] [19] [21]

## 1.5 Tepelné vlastnosti

Na mnoho typů 2D materiálů je nahlíženo jako na potenciální kandidáty pro elektronická zařízení nové generace, které by mohly překonat kritické překážky týkající se generování mnohem menšího množství tepla nebo jeho účinnějšího odvádění. Současný výzkum tepelných vlastností 2D materiálů však zdaleka nestačí. Ani v případě grafenu, který je

teoreticky i experimentálně nejvíce studovaný 2D materiál, neexistuje stále mezi vědci shoda ohledně jeho termofyzikálních vlastností, včetně tepelné vodivosti a měrné tepelné kapacity, které definují jeho schopnost transportu a ukládání tepla. [22]

Měrná tepelná kapacita (nebo také specifické teplo) materiálu reprezentuje změnu hustoty energie, když se jeho teplota změní o 1 Kelvin. Je dána rovnicí

$$C = \frac{dW}{dT}, \quad (1.11)$$

kde  $C$  je tepelná kapacita,  $W$  hustota energie a  $T$  absolutní teplota. Tepelná kapacita určuje nejen tepelnou energii uloženou v těle materiálu, ale také to, jak rychle se ochladí, nebo zahřeje. Tuto rychlost vyjadřuje tepelná časová konstanta  $\tau$ , která je dána vztahem

$$\tau \approx R_T C V, \quad (1.12)$$

kde  $R_T$  je tepelný odpor a  $V$  objem. Tepelná časová konstanta může nabývat pro objekty v řádech nanometrů velmi nízkých hodnot. Například pro nanotranzistory se hodnota pohybuje v řádu desítek ns, pro jednu vrstvu grafenu 0,1 ns. [23]

Specifické teplo je uloženo ve formě vibrací krystalové mřížky, takzvaných fononů, a volných vodivých elektronů, jak naznačuje rovnice

$$C = C_p + C_e, \quad (1.13)$$

kde  $C_p$  značí teplo uložené ve formě fononů (vibrací mřížky) a  $C_e$  ve formě volných elektronů. Vodivé elektrony mají však v případě grafenu při teplotách vyšších než 1 Kelvin oproti fononům na jeho velikost zanedbatelný vliv. Specifické teplo uložené ve formě fononů s rostoucí teplotou stoupá (viz obrázek 1.5). Při pokojové teplotě je tepelná kapacita grafitu  $\approx 0,7 \text{ J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ . Zajímavostí je, že tato hodnota je o jednu třetinu vyšší než pro diamant, a to kvůli vyšší hustotě stavů při nižších frekvencích fononů, což je zapříčiněno slabými vazbami mezi jednotlivými grafitovými vrstvami. Má se za to, že pro izolovaný grafen jsou hodnoty tepelné kapacity při pokojové teplotě velmi podobné. [23]

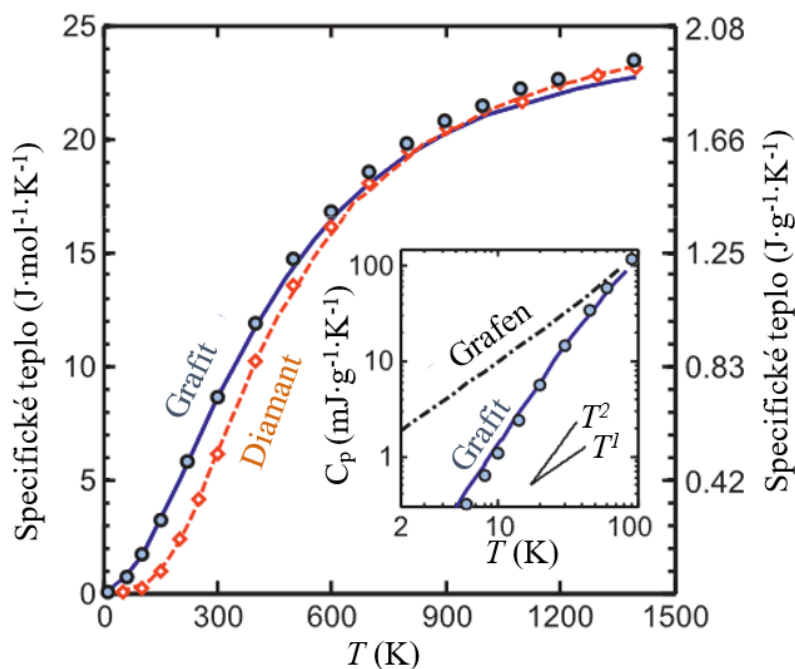
Tepelná vodivost materiálu je definována rovnicí

$$q = -\kappa \text{grad}T, \quad (1.14)$$

kde  $q$  je hustota tepelného toku,  $\kappa$  tepelná vodivost a  $\text{grad}T$  teplotní gradient. Znaménko v této rovnici je záporné, protože indikuje, že teplo teče od vysokých teplot k nižším, respektive z míst s vyšší teplotou do míst s nižší teplotou. Tepelná vodivost grafenu v rovině při pokojové teplotě je  $2000\text{--}4000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  a patří mezi nejvyšší ze všech známých materiálů. Horní hranice tohoto rozmezí se dosahuje u izotopově čistých vzorků (0,01 %  $^{13}\text{C}$ ), zatímco dolní konec odpovídá izotopově smíchaným vzorkům. Každá další porucha v krystalové mřížce nebo nečistota ve vzorku způsobí přirozeně větší rozptyl fononů, a tím i snížení hodnoty tepelné vodivosti. [23]

Tepelné vlastnosti grafenu hrají důležitou roli ve spoustě praktických aplikacích. Například grafenové tranzistory a propojovací články těží z jeho vysoké tepelné vodivosti

v rovině až do určité délky kanálu. Tok tepla v grafenu nebo grafenových kompozitech může být také různými způsoby upraven. Jednou z možností je rozptyl fononů na okrajích substrátu. Naproti tomu mají ale tepelné vlastnosti grafenu také jednu nevýhodu, a to slabou tepelnou vazbu na substrát, která zůstává stále nejslabším bodem většiny aplikací. [23]



Obrázek 1.5 Graf znázorňující specifická tepla grafenu, grafitu a diamantu. Křivky zobrazují numericky vypočtené hodnoty, body experimentálně naměřená data. Z grafu vidíme, že hodnota specifického tepla grafenu je pro nízké teploty vyšší než u grafitu. Hodnoty se vyrovnávají při teplotě  $\approx 100$  K a dále jsou již prakticky identické. [23]

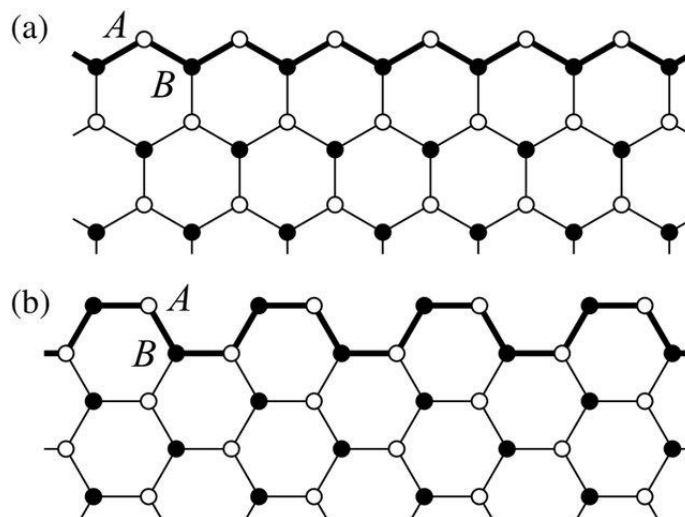
## 1.6 Chemické vlastnosti

Z chemického hlediska se dá říct, že atomy uhlíku v grafenu jsou navzájem kovalentně spojeny třemi  $\sigma$  vazbami v rovině a zbývající čtvrtá vazba tvoří  $\pi$  orbital, který se podílí na tvorbě sítě delokalizovaných elektronů. Pomocí metody SEM – skenovací elektronové mikroskopie – bylo prokázáno, že okraje krystalu grafenu mohou mít tvar typu „cik-cak“ nebo křeslo (viz obrázek 1.6). [24]

Grafen je čistá forma uhlíku, ve které je každá částice přístupná pro směsné reakce z různých stran. Částice, které se nachází na okrajích grafenového listu, mají jedinečnou chemickou reaktivitu. Nečistoty uvnitř krystalové mříže zvyšují jeho látkovou reaktivitu.

V roce 2013 tým fyziků ze Stanfordské univerzity prohlásil, že je grafen ve své jednovrstvé formě asi stokrát více uměle reaktivní než vícevrstvé materiály. [25]

Díky silným  $sp^2$  vazbám je grafen velmi stabilní při mechanickém a tepelném namáhání. Volné p-orbitály jsou však přístupné pro připojení chemických funkčních skupin, díky kterým mohou vznikat různé typy derivátů, včetně nejznámější a nejdůležitější formy funkcionalizovaného grafenu – oxidu grafenu (GO). Chemická redukce GO je jednou z hlavních metod k získávání čistého grafenu. GO je snadněji rozpustitelný ve vodě a organických rozpouštědlech. Dále jej lze propojovat s polymerními nebo keramickými maticemi, a tím vytvářet různé typy kompozitů, které mohou mít lepší elektrické a mechanické vlastnosti. [24] [26]



Obrázek 1.6 Dva typy okrajů struktury grafenu: a) cik-cak, b) křeslo. Okraj je označen tučnou čarou. Tmavé a světlé body označují atomy podmřížek A a B. [27]

## 1.7 Optické vlastnosti

Optické vlastnosti grafenu jsou úzce spojeny s jeho vlastnostmi elektrickými. Jak již bylo zmíněno dříve, elektrické vlastnosti grafenu jsou vynikající, což naznačuje, že vynikající budou i vlastnosti optické. Je třeba poznamenat, že optické vlastnosti se liší podle jeho počtu vrstev. Jedna vrstva grafenu absorbuje pouze 2,3 % světla, to znamená, že 97,7 % světla projde skrz, přičemž přibližně 0,1 % světla se odrazí nebo vychýlí od své původní trajektorie. Čím více vrstev grafenu na sebe položíme, tím větší je absorpce světla a tím pádem i nižší optická průhlednost. Vztah mezi počtem vrstev a průhledností je lineární. To znamená, že když na sebe navrstvíme například pět vrstev, každá z nich absorbuje 2,3 % světla, bude výsledná absorpce 11,5 % a optická průhlednost kolem 88 až 85,5 %, pokud vezmeme v úvahu i malé množství odraženého světla. [9] [28]

Grafen může absorbovat široké spektrum frekvencí elektromagnetického záření. Tento jev je zapříčiněn strukturou jeho pásma energetických hladin, nulovou šířkou zakázaného pásu a interakcemi mezi elektromagnetickým zářením a Diracovými fermiony. Interakce s různými spektry elektromagnetického záření je však rozdílná.

Viditelné světlo a infračervené záření způsobuje přechody uvnitř elektronového obalu, zatímco absorpce vzdáleného infračerveného záření je možná jak díky přechodům uvnitř elektronového obalu, tak mechanismem absorpce volným nosičem. [28]

Pokud vložíme grafen do elektrického pole, může v něm docházet k optickým přechodům. Působení elektrického pole zapříčiní posun Fermiho hladiny z důvodu nízké hustoty stavů poblíž Diracova bodu. Tento proces se často využívá v elektronice pro modulaci proudu a ladění přenosu optických zdrojů, protože posun Fermiho hladiny mění hodnotu konduktivity. Toto ladění je prováděno elektromagnetickým zářením, které daný materiál absorbuje. V případě grafenu se jedná o infračervené záření. Změna úrovně Fermiho hladiny určuje, kolik záření grafen absorbuje. Čím větší je míra absorpce, tím nižší je optický přenos a obráceně. Tohoto jevu se užívá především u jednovrstvého grafenu, protože u více vrstev dochází k významným změnám absorpčních vlastností, a tím i možnosti účinně je upravovat. [28]

Vzhledem k tomu, že grafen má některé jedinečné optické vlastnosti a může absorbovat širokou škálu elektromagnetického záření, existuje mnoho potenciálních optických a fotonických aplikací, ve kterých lze grafen použít, od saturovatelných absorbérů po průhledné vodiče ve fotonických zařízeních a fotodetektorech s velkou šířkou pásma. [28]



## 2. SYNTÉZA GRAFENU

Syntézou grafenu se myslí jakýkoliv proces výroby nebo extrakce. Poprvé byl grafen izolován v roce 2004 ve formě malých vloček velikosti v řádech mikrometrů pomocí mechanické exfoliace s využitím klasické lepicí pásky. Ačkoli byl touto metodou získán grafen nejvyšší kvality, není vhodná pro použití v hromadné výrobě z důvodu své vysoké časové náročnosti. [29]

V současné době jsou k syntéze grafenu v hromadné výrobě využívány různé techniky. Tyto techniky dělíme obecně do dvou kategorií – „top-down“ a „bottom-up“. U top-down metod musíme pro syntézu jednotlivých vrstev grafenu překonat van der Waalsovy síly, které mezi nimi působí. Obecně platí, že top-down metody bývají zdlouhavé a neefektivní. [30]

Zatímco top-down metody se zaměřují na rozkládání grafitu na atomické vrstvy, bottom-up metody využívají jednotlivé molekuly uhlíku, které se získávají z alternativních zdrojů, jako základní stavební kámen. I když tento přístup není vhodný pro výrobu grafenových struktur s velkou plochou povrchu, nabízí možnost výroby grafenových nanovrstev a nanovloček ve velkém množství. [30]

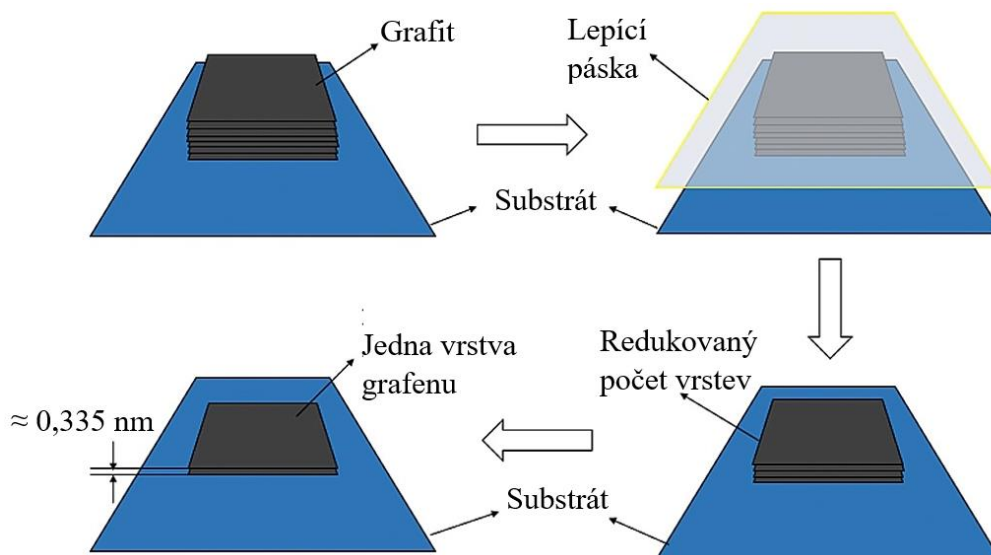
Nejčastěji používanými top-down metodami jsou různé druhy mechanické exfoliace, chemická exfoliace a chemická syntéza. Z bottom-up metod můžeme zmínit například chemickou depozici z plynné fáze, známou také pod zkratkou CVD. [29]

### 2.1 Mechanická exfoliace

Mechanická exfoliace byla poprvé popsána v roce 2008 jako metoda pro účinnou produkci grafenu. Obecně můžeme provádět exfoliaci grafitu na jednotlivé vrstvy grafenu dvěma různými mechanickými cestami, a to normálovou silou, působící kolmo k povrchu materiálu a laterální silou, působící rovnoběžně s povrchem materiálu. K odlupování dvou grafitových vrstev lze tedy použít například klasickou lepicí pásku, kde používáme k překonání van der Waalsových vazeb normálovou sílu. Další možností je využít samomazací vlastnost grafitu v rovnoběžném směru, díky kterým jsme například schopni psát tužkou, a oddělit jednotlivé vrstvy působením laterální síly. U všech doposud popsaných exfoliačních technik jsou předpokladem pro výrobu grafenu právě tyto dvě mechanické cesty. [31] [32]

Nejnámější mechanickou exfoliační metodou je mikromechanické štěpení, které stálo u zrodu jak první grafenové vločky, tak Nobelovy ceny za fyziku v roce 2010. Jednalo se o mikromechanické štěpení vysoce uspořádaného pyrolytického grafitu (HOPG). Hlavní myšlenkou této metody je odštěpování jednotlivých grafenových vrstev z povrchu HOPG. Exfoliační mechanismus u této metody spočívá v aplikaci lepicí pásky na povrch HOPG a její následné odlepení – působení normálovou silou. Pokud budeme tento postup opakovat stále dokola, bude vrstva grafitu na pásce čím dál tenčí až do té

doby, kdy získáme pouze jednu vrstvu – grafen (viz obrázek 2.1). Takto jsme schopni produkovat poměrně rozměrné vločky vysoce kvalitního grafenu, na kterých bylo zkoumáno a objeveno velké množství jeho vynikajících vlastností. Metoda je to ovšem velmi pracná a časově náročná. Proto se nejčastěji využívá pouze v laboratořích pro výzkumné aplikace. [32]



Obrázek 2.1 Znáornění jednotlivých kroků mechanické exfoliace grafenu pomocí lepicí pásky [33]

## 2.2 Chemická exfoliace

Kromě mechanické exfoliace lze potenciální energii mezi jednotlivými vrstvami způsobenou van der Waalsovými silami překonat také za pomoci rozpouštědel. Tento proces, známý jako exfoliace v kapalně fázi (LPE), se skládá ze tří základních kroků: disperze pevných materiálů (v našem případě grafitu) v rozpouštědle, exfoliace a čištění finálního produktu. Pro získání vysoce kvalitního produktu a stabilitu procesu je tedy rozhodující použití ideálního rozpouštědla. Běžně používaná rozpouštědla jsou ovšem toxická. K překonání tohoto problému byla v nedávné době vyvinuta řada přístupů, které využívají netoxická rozpouštědla. Jedním z nich je například vodní exfoliace na bázi močoviny. [34]

Proces exfoliace v kapalně fázi je dobrým příslibem pro syntézu grafenu ve velkém měřítku, k čemuž přispěly také některé nedávné modifikace této metody. Produkty exfoliované metodou LPE ovšem trpí několika nedostatky. Největším z nich je fakt, že struktura obsahuje velké množství defektů a nečistot, které jsou způsobeny jednotlivými oxidačními a redukčními reakcemi. Tyto defekty pak negativně ovlivňují elektrické vlastnosti produkovaného grafenu. Výzkum se proto zaměřuje na řízení počtu vrstev

finálního produktu, a především minimalizaci defektů a nečistot obsažených v jeho struktuře. [35]

## 2.3 Chemická syntéza – redukce grafenu

Chemická redukce oxidu grafenu (GO) je považována za nejslibnější metodu s ohledem na produktivitu. V porovnání s ostatními metodami syntézy je velmi levná a dokáže produkovat grafen z oxidu grafitu v poměrně velkém měřítku za krátký čas. [36]

Oxid grafitu je vysoce oxidovaná forma grafitu, která si ovšem zachovává vícevrstvou strukturu svého prekursoru. Mezi těmito vrstvami jsou větší mezery díky přítomnosti funkčních skupin obsahující kyslík. Tyto skupiny představují strukturální vady, které vedou k tomu, že po exfoliaci nezískáme čistý grafen, nýbrž jeho oxid. [37]

GO je strukturně odlišný, ale chemicky podobný oxidu grafitu. Stejně jako svůj prekurzor si zachovává funkční kyslíkové skupiny, ovšem existuje pouze ve formě jedné, dvou nebo několika vrstev. GO nejčastěji získáme z oxidu grafitu mechanickým mícháním nebo pomocí ultrazvuku v kombinaci s organickými polárními rozpouštědly nebo vodným médiem. [37]

K dosažení přeměny GO na čistý grafen se nejčastěji používají termální, elektrochemické a chemické redukční metody. Předpokladem pro vznik grafenu je odstranění kyslíkatých funkčních skupin, čemuž napomáhají právě tyto redukční reakce. Výsledná struktura a elektrické, fyzikální, mechanické i morfologické vlastnosti konečného produktu závisí na typu použité redukční metody. Ačkoliv je struktura takto syntetizovaného materiálu složena z uhlíkové  $sp^2$  sítě obsahující defekty, je velmi blízká čistému grafenu. Proto se tento způsob syntézy využívá v aplikacích, kde je třeba velkého množství grafenových materiálů. [37]

## 2.4 CVD – chemická depozice z plynné fáze

V roce 2009 objevila skupina pod vedením pana Ruoffa metodu syntézy velkoplošných a vysoce kvalitních grafenových filmů pomocí techniky CVD na měděných foliích. Dnes je tato technika využívána mnoha laboratořemi po celém světě a proces byl také upraven a přizpůsoben pro průmyslovou výrobu. [38]

Chemická depozice z plynné fáze je proces rozkladu uhlovodíkových plynů a dalších materiálů za účelem růstu grafenových vrstev na kovových katalyzátorech, nejčastěji niklu, mědi nebo SiC s extrémně hladkým povrchem. Ke zlepšení vlastností procesu se využívá katalyzátoru, který zajistí snížení potřebné teploty pro rozklad zdroje uhlíku z 2500 °C na  $\approx$  650 °C až 1200 °C. Po kontaktu s horkým povrchem kovového katalyzátoru se uhlíkový prekurzor disociuje na volné atomy uhlíku a vodíku. Atomy uhlíku poté difundují do kovového katalyzátoru a po dosažení limitu rozpustnosti vytvoří na jeho povrchu vrstvu grafenu (viz obrázek 2.2). [14] [39]

Fólie kovového katalyzátoru je vložena do komory z křemenné trubice, kde se pomocí vakuové pumpy vytvoří vakuum. Poté je do komory napuštěn vodík, a ještě před vpuštěním uhlovodíkového plynu je komora zahřata na potřebnou teplotu. Tlak se během procesu pohybuje v desetinách Pa, a proto se tento proces označuje jako nízkotlaká CVD (LPCVD). Růst grafenové vrstvy může ovšem probíhat i při vyšších tlacích, a to až do hodnoty tlaku atmosférického (APCVD). [38]



Obrázek 2.2 Mechanismus růstu grafenu na niklovém substrátu metodou CVD [40]

CVD může produkovat vysoce kvalitní grafen s nízkým množstvím defektů, vysoce propojenou strukturou a poměrně velkou plochou. Mezi její nevýhody však patří vysoké výrobní náklady, nízká rychlost produkce, potřeba čištění k odstranění zbytků kovového katalyzátoru a přenos grafenu na jiné substráty. Tyto nedostatky se podařilo částečně překonat optimalizacemi podmínek syntézy, díky kterým může proces probíhat při nižší teplotě a okolním tlaku, aniž by byla ohrožena kvalita výsledného produktu. [14]

### 3. DOPOVÁNÍ

Grafen je polovodičový materiál s nulovou šířkou zakázaného pásu. Jeho vodivostní a valenční pás se vzájemně dotýkají v rozích Brillouinovy zóny, takzvaných Diracových bodech. Z toho vyplývá, že při zanedbání účinků tepelných excitací je koncentrace vnitřních nosičů náboje v grafenu v zásadě nulová. Pro vývoj elektronických zařízení na bázi grafenu je však nutná přítomnost nosičů náboje, a také kontrola jejich typu a koncentrace. [41]

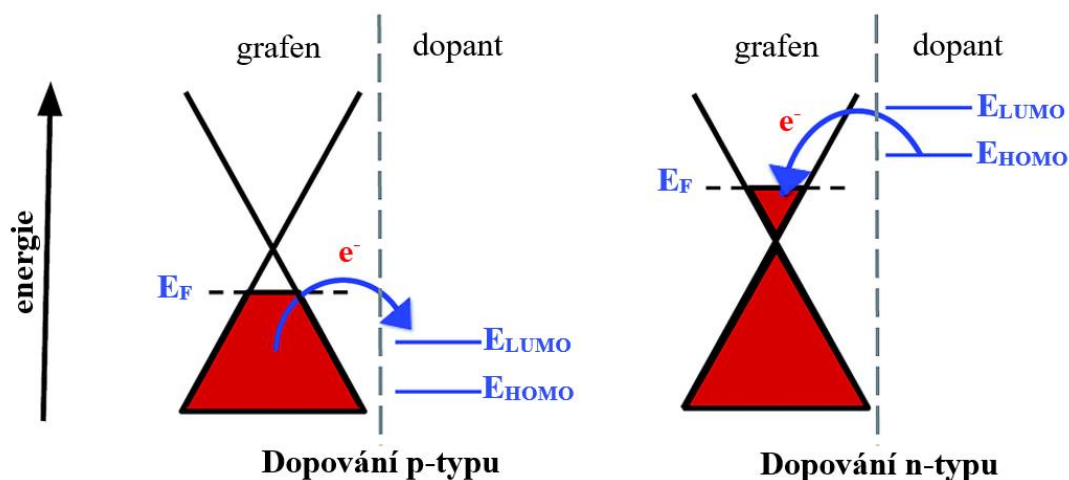
Vzhledem k tomu, že samotný grafen je atomicky tenký elektronicky aktivní povrch, může být jeho Fermiho hladina narušena při jakémkoliv kontaktu s libovolnou hmotou, dokonce i se samotným nosným substrátem, stejně jako při stopových změnách prostředí. To ovšem může vést k nežádoucímu a nekontrolovatelnému dopování. Schopnost přesné a účinné kontroly dopování n-typu nebo p-typu v grafenu s požadovanou koncentrací nosičů náboje umožňuje využití grafenu v řadě aplikací, jako je fotodetektor, fotovoltaika, senzory, organické diody vyzařující světlo, organické tenkovrstvé tranzistory, superkondenzátory a podobně. [42]

#### 3.1 Chemické dopování

Chemické dopování zahrnuje interakce grafenu s jinými chemickými činiteli. Existují dva druhy chemického dopování, povrchový přenos a substituční dopování. Ve druhém případě dochází k dopování substitucí atomů uhlíku v krystalové mřížce atomy jiného materiálu, nejčastěji boru a dusíku, což vede k vodivosti typu p, respektive n. Začlenění cizích atomů do grafenové mřížky však může vést k významné změně elektrické struktury grafenu. Například n-dopovaný grafen se chová jako dopovaný polovodič typu n, ale vykazuje při tomto typu dotace nízkou mobilitu nosičů. [41]

Dopování pomocí povrchového přenosu není destruktivní a dochází k němu v důsledku přenosu náboje mezi grafenem a povrchovými adsorbáty. Rozlišujeme dva základní mechanismy přenosu náboje, elektrický a elektrochemický. Elektrické dopování je důsledkem přímého přenosu náboje mezi grafenem a adsorbátem. To vyžaduje rozdíl v elektrochemických potenciálech na rozhraní, které je určeno relativní polohou Fermiho hladiny, nejvyšší obsazené (HOMO) a nejnižší neobsazené (LUMO) molekulové hladiny adsorbátu. Pokud je energie LUMO adsorbátu nižší než energie Fermiho hladiny, elektrony budou proudit z grafenu do adsorbátu, což vede k dopování typu p. Naopak adsorbáty, jejichž energie HOMO je vyšší než energie Fermiho hladiny, budou sloužit jako dárci elektronů a dopovat grafen n-typově (viz obrázek 3.1). I když je metoda povrchového přenosu náboje velmi účinná pro kontrolu koncentrace nosičů náboje v grafenu, ionizované příměsi mohou sloužit jako další zdroj rozptylu pro nosiče náboje a tím způsobovat snížení jejich pohyblivosti. [41]

K elektrochemickému dopování dochází v případě, kdy se adsorbát účastní elektrochemické redoxní reakce s povrchem grafenu, který se chová jako elektroda. Typ dotace závisí na relativních polohách elektrochemického redoxního potenciálu a Fermiho hladiny. Pokud je elektrochemický redoxní potenciál vyšší, budou do grafenu proudit elektrony až do vyrovnání obou hladin – dotace typu n. V opačném případě do grafenu proudí kladné díry – dotace typu p. Na rozdíl od elektrického dopování, k němuž dochází prakticky okamžitě, je elektrochemické dopování procesem závislým na čase, který je ovlivněn rychlostí reakce. Proto v případě, že je rychlost reakce nebo difúze pomalejší než rychlost změny vstupního napětí na hradle GFET, může elektrochemické dopování vést k hysterezi. [41]



Obrázek 3.1 Diagram znázorňující dopování p-typu a n-typu pomocí elektrického dopování, kde  $E_{LUMO}$  a  $E_{HOMO}$  znázorňují energii nejnižší, resp. nejvyšší neobsazené, resp. obsazené molekulové hladiny dopantu a  $E_F$  energii Fermiho hladiny [43]

## 3.2 Dopování působením elektrického pole

Dopování pomocí elektrického pole lze oproti dopování chemickému použít nejen k dopování, ale také k řízení elektrických a magnetických vlastností grafenu ovládním vratných změn koncentrace nosičů a energie Fermiho hladiny, aniž by se zvýšila úroveň poruch a vad v jeho struktuře. [44]

Dopování elektrickým polem se obvykle provádí ve FET tranzistorech na bázi grafenu, v nichž jsou nosiče náboje indukovány změnou elektrického potenciálu mezi grafenem a gate elektrodou, která bývá obvykle tvořena substrátem  $\text{Si}^+/\text{SiO}_2$ . Změnou napětí gatu ( $U_G$ ) lze ladit typ nosičů a jejich koncentraci v grafenu. Znaménko indukovaných nosičů je opačné než znaménko  $U_G$ . Kladné  $U_G$  indukuje elektrony, zatímco záporné  $U_G$  indukuje díry. Bylo prokázáno, že u grafenu na  $\text{Si}^+/\text{SiO}_2$  může být koncentrace nosičů náboje indukovaná touto metodou až  $10^{13} \text{ cm}^{-2}$ . [41]

Přestože byly zaznamenány vynikající výsledky, je třeba poznamenat, že se pomocí této metody využívající k dopování elektrického pole nepodařilo zatím vytvořit zakázaný pás v jednovrstvém grafenu. Proto má tato metoda navzdory svým dobrým vlastnostem zatím pouze omezené využití. [44]

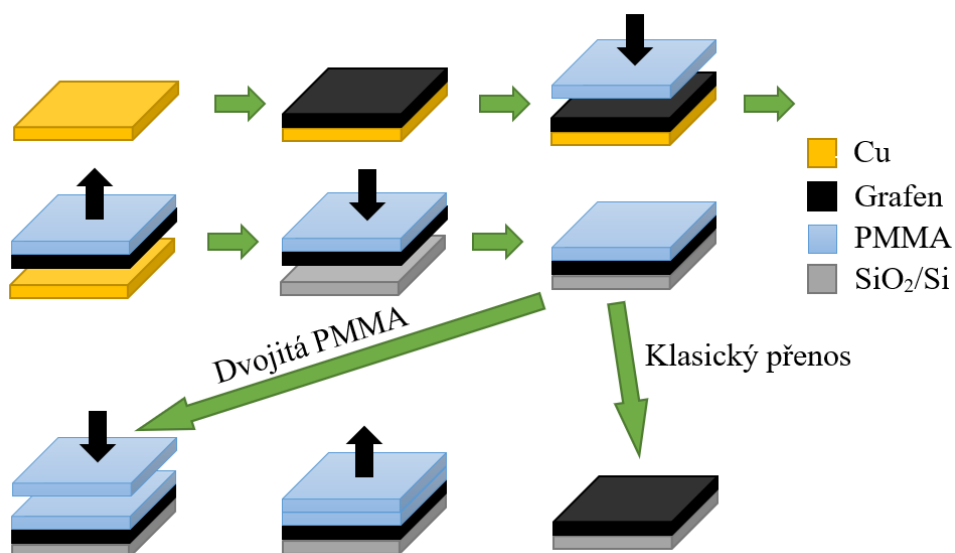
## 4. PŘENOS GRAFENU

Grafen vypěstovaný na kovových substrátech metodou CVD je díky své kvalitě využíván pro mnohé elektronické aplikace. Hlavní nevýhodou této metody je proces přenosu z kovu na cílový substrát. Přenosová metoda je velmi důležitá především proto, aby se zajistilo, že bude přepraveno co největší množství grafenu bez mechanického poškození a zároveň zachována jeho kvalita. [45] [46]

Existuje několik metod přenosu grafenu. První z nich využívá polymerní vrstvu – přenos podporovaný polymerem (PST). Další známé a používané metody jsou přímý přenos a „pick-up“ přenos. Všechny tři metody využívají polymethylmethakrylát (PMMA) jako podpůrnou vrstvu pro přenos grafenu. [46]

Před samotným přenosem grafenu musí ovšem nejprve dojít k odstranění kovového materiálu, na kterém vrstva grafenu vyrostla. Nejjednodušším způsobem je materiál nechat odleptat v leptací lázni. Kvalita odleptání kovového substrátu velmi ovlivňuje čistotu a tím i výsledné vlastnosti grafenu.

Nejpopulárnější a nejpoužívanější metodou pro transport grafenu je přenos pomocí polymerní vrstvy, a to především díky své jednoduchosti a produktivitě. Problémem této metody je ovšem odstranění podpůrné vrstvy po přenosu na substrát, které bývá obvykle neúplné a vede k povrchové kontaminaci grafenu způsobené nerozpuštěnými zbytky PMMA a tím i ke ztrátě některých intrinzických vlastností. Názorný postup přenosu grafenu na substrát  $\text{SiO}_2$  je znázorněn na obrázku 4.1. [46] [47]



Obrázek 4.1 Schématický diagram přenosu grafenu s využitím polymerní vrstvy PMMA [45]



## 5. METODY CHARAKTERIZACE

### 5.1 Měření elektrické rezistivity

Pro měření elektrického odporu a rezistivity bylo navrženo již mnoho různých modelů a metod. Mezi faktory ovlivňující jejich vhodnost použití a přesnost patří především kontaktní odpor a tvar vzorku, který může být například ve formě monokrystalu, tenkého filmu, prášku a podobně. Mezi nejznámější patří čtyřbodová metoda a van der Pauwova metoda. [48]

#### 5.1.1 Čtyřbodová metoda

Čtyřbodová metoda je jednou z hlavních technik užívaných k měření povrchového odporu tenkých vrstev. Povrchový odpor materiálu je definovaný rovnicí

$$R_s = \frac{\rho}{h}, \quad (5.1)$$

kde  $\rho$  označuje rezistivitu vzorku a  $h$  jeho tloušťku. Povrchový odpor je elektrická veličina používaná pro charakterizaci tenkých vrstev vodivých a polovodičových materiálů. Vyjadřuje míru odporu přes čtverec materiálu, jinými slovy odpor mezi protilehlými stranami čtverce. Proto se často jako jednotka využívá ohm na čtverec ( $\Omega \cdot \square^{-1}$ ). Hlavní výhodou měření povrchového odporu oproti měření rezistivity tkví v nezávislosti na velikosti čtverce. Další výhodou je fakt, že jej lze měřit přímo právě pomocí čtyřbodové metody. [49]

Měření čtyřbodovou metodou se provádí čtyřbodovou sondou, která je složena ze čtyř elektricky vodivých hrotů umístěných v jedné řadě ve stejné vzdálenosti od sebe (viz obrázek 5.1). Spočívá v přivedení proudu do vzorku dvěma vnějšími hroty a měření úbytku napětí mezi vnitřními hroty. Povrchový odpor je pak dán rovnicí

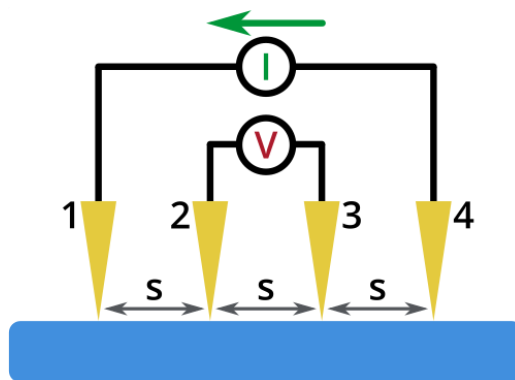
$$R_s = \frac{\pi}{\ln 2} \frac{\Delta U}{I} = 4,53236 \frac{\Delta U}{I}, \quad (5.2)$$

kde  $\Delta U$  vyjadřuje úbytek napětí mezi vnitřními hroty a  $I$  proud protékající vzorkem. Tato rovnice platí, pokud je splněno, že tloušťka vzorku je maximálně 40 % vzdálenosti mezi hroty a boční strana je dostatečně dlouhá. Pokud nejsou tyto podmínky splněny, je nutné zavést do rovnice geometrické korekční faktory, abychom zohlednili velikost, tvar a tloušťku vzorku. Pokud známe tloušťku vzorku, můžeme z naměřeného povrchového odporu vypočítat rezistivitu a konduktivitu vzorku podle rovnic

$$\rho = R_s h, \quad (5.3)$$

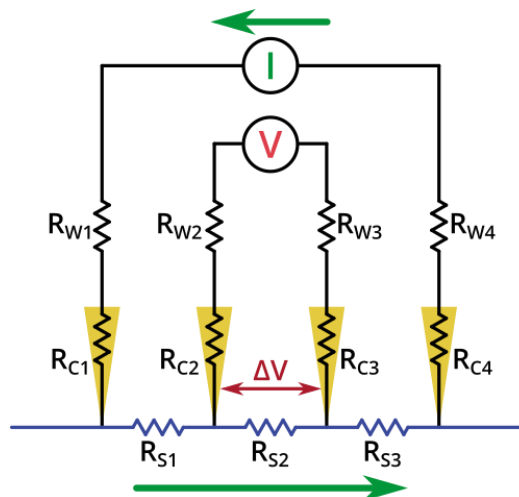
$$\gamma = \frac{1}{\rho}, \quad (5.4)$$

kde  $h$  je tloušťka vzorku. [49]



Obrázek 5.1 Schématický diagram čtyřbodové metody. Čtyři hroty se dotýkají povrchu vzorku a vzdálenost ( $s$ ) mezi nimi je stejná. Proud je do vzorku dodáván hrotem 1 a odváděn hrotem 4. Úbytek napětí je měřen mezi hroty 2 a 3. [49]

Jednou z hlavních výhod čtyřbodové metody je eliminace kontaktního odporu a odporu vodiče z měření. Diagram odporů v elektrickém obvodu je znázorněn na obrázku 5.2. Aplikovaný proud vstupuje a vystupuje ze vzorku krajními hroty a proudí skrz vzorek. Voltmetry mívají obvykle velmi vysoký vnitřní odpor, aby neovlivňovaly elektrický obvod, který měří, takže vnitřními hroty nepoteče žádný proud. Vnitřní hroty slouží tedy pouze k měření napětí, což znamená, že kontaktní odpory  $R_{C2}$ ,  $R_{C3}$  a odpory vodičů  $R_{W2}$ ,  $R_{W3}$  nijak neovlivňují měření. Proto bude veškerý naměřený úbytek napětí pouze na odporu vzorku  $R_{S2}$ . Díky tomu nám ke změření povrchového odporu stačí znát pouze proud protékající vzorkem a rozdíl napětí mezi vnitřními hroty. [49]



Obrázek 5.2 Obvodové schéma čtyřbodové sondy zobrazující odpory drátů ( $R_W$ ), kontaktní odpory ( $R_C$ ) a odpory vzorku ( $R_S$ ). Zelené šipky ukazují směr tekoucího proudu. [49]

### 5.1.2 Van der Pauwova metoda

Metoda Van der Pauwa slouží k měření průměrné rezistivity a Hallova koeficientu na tenkých vzorcích. Metoda je vhodná pro určování rezistivity vzorků různých tvarů, které ovšem musí splňovat určitá pravidla. Je třeba, aby byly izotropní, homogenní, ploché s rovnoměrnou tloušťkou a nesmí obsahovat vady. Větší přesnosti měření můžeme dosáhnout zavedením geometrického korekčního faktoru. Hallovu mobilitu určíme z měření změny odporu vzorku při kolmém působení magnetického pole na vzorek. [50]

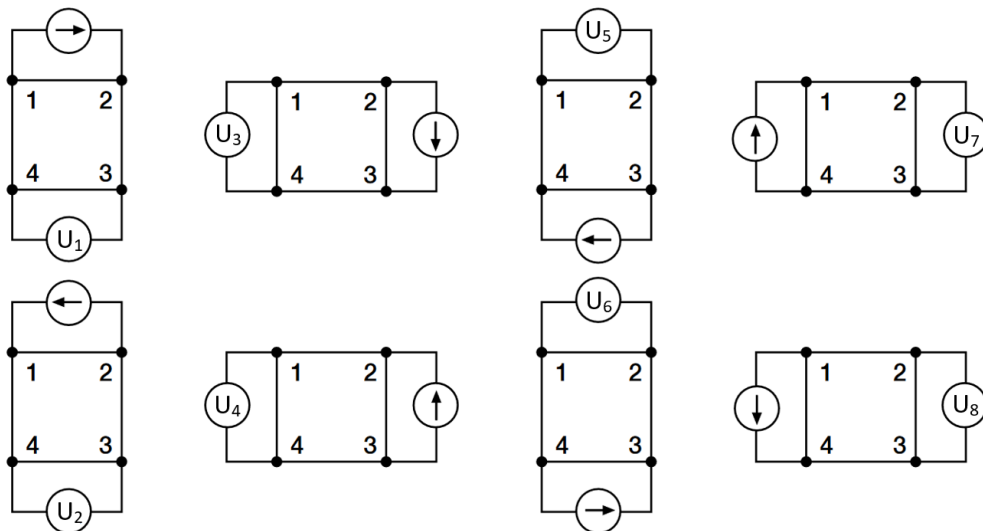
Van der Pauwova metoda zahrnuje aplikaci proudu a měření napětí pomocí čtyř malých kontaktů na obvodu plochého, libovolně tvarovaného vzorku rovnoměrné tloušťky. Je obzvláště užitečná pro měření velmi malých vzorků, protože zde nehrají roli vzdálenosti mezi jednotlivými kontakty. Rezistivitu můžeme odvodit z osmi měření, která se provádí po celém obvodu vzorku (viz obrázek 5.3). Jakmile jsou všechna měření provedena, odvodíme dvě hodnoty rezistivity podle rovnic

$$\rho_A = \frac{\pi}{\ln 2} f_A h \frac{(U_1 - U_2 + U_3 - U_4)}{4I}, \quad (5.5)$$

$$\rho_B = \frac{\pi}{\ln 2} f_B h \frac{(U_5 - U_6 + U_7 - U_8)}{4I}, \quad (5.6)$$

kde  $\rho_A$  a  $\rho_B$  jsou objemové rezistivity,  $h$  tloušťka vzorku,  $U_1$  až  $U_8$  napětí naměřená voltmetrem,  $I$  proud,  $f_A$  a  $f_B$  geometrické korekční faktory, které modelují symetrii vzorku. Když známe rezistivity  $\rho_A$  a  $\rho_B$ , průměrná rezistivita vzorku je dána rovnicí [51]

$$\rho_{AVG} = \frac{\rho_A + \rho_B}{2}. \quad (5.7)$$

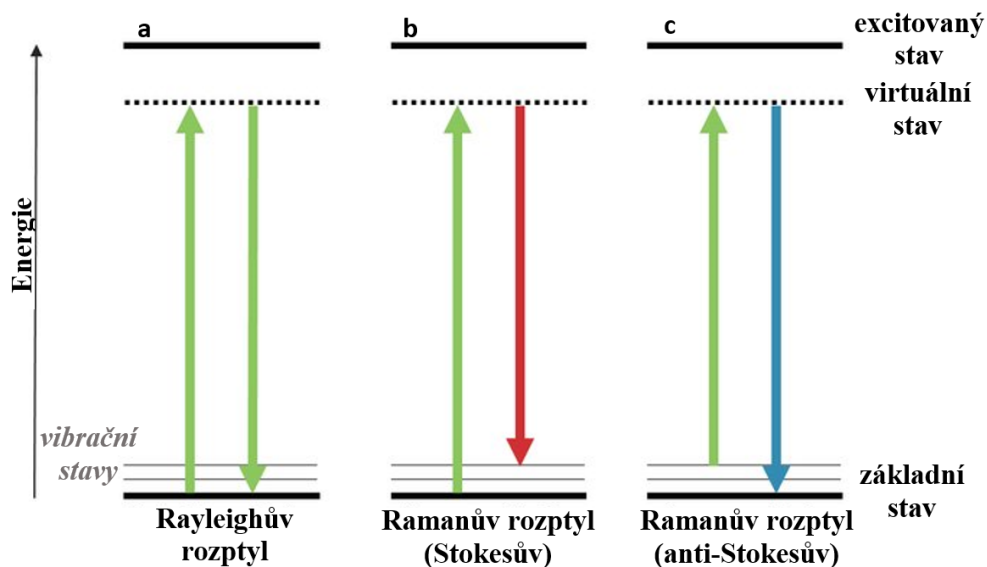


Obrázek 5.3 Jednotlivé konvence měření rezistivity van der Pauwovou metodou [51]

## 5.2 Ramanova spektroskopie

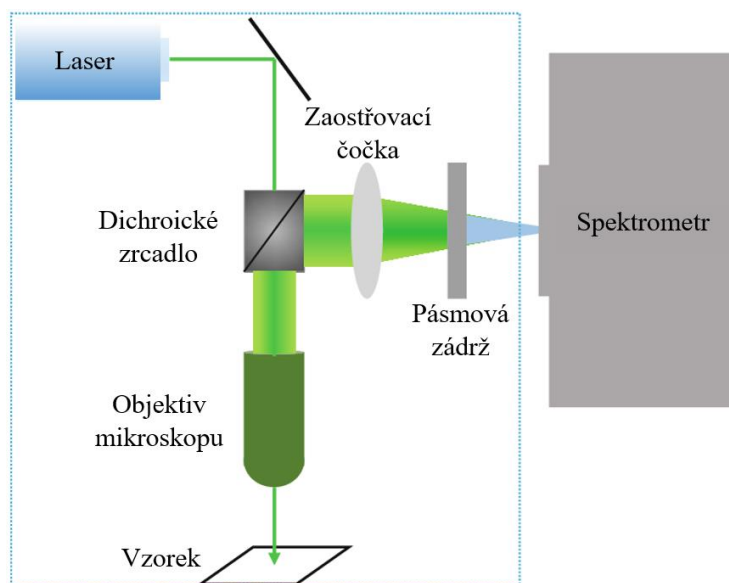
Ramanova spektroskopie je technika, která se specializuje na měření frekvenčního posunu neelastického rozptýleného světla emitovaného ze vzorku. To vzniká při interakci fotonů dopadajícího světla a molekul analyzovaného vzorku. Vyzářené rozptýlené světlo může být tvořeno fotony s nižší nebo vyšší frekvencí než dopadající fotony. Tyto jevy jsou známé jako Stokesův a anti-Stokesův rozptyl (viz obrázek 5.4). Změna vlnové délky rozptýleného světla je závislá na chemickém složení molekul, které jsou zodpovědné za rozptyl a poskytuje nám informaci o vibračních, rotačních a jiných nízkofrekvenčních přechodech v molekulách. Intenzita Ramanova rozptylu je úměrná velikosti změny molekulární polarizace. Podle Ramanova pravidla výběru bude změna v molekulární polarizaci výsledkem vychýlení jednotlivých atomů, ze kterých se molekula skládá, ze svých rovnovážných pozic v důsledku molekulárních vibrací. Ramanovo spektrum lze považovat za jakýsi jedinečný znak pro různé prvky a sloučeniny. Tuto analýzu můžeme tedy využít pro kvalitativní popis neznámých vzorků nebo jednotlivých složek směsí. [52] [53]

Prostorové rozlišení tradiční Ramanovy spektroskopie je v řádech mikrometrů a má proto omezenou využitelnost pro analýzu nanomateriálů. Z toho důvodu bylo vyvinuto několik variant této techniky. Mezi nejpoužívanější patří Povrchem zesílená Ramanova spektroskopie (SERS) a Skenovací optická mikroskopie v blízkém poli (SNOM) nebo zkráceně Nano Raman. Obě techniky zlepšují prostorové rozlišení Ramanovy spektroskopie na několik stovek nm. [54]



Obrázek 5.4 Schematický diagram Rayleighova (a) a Ramanova (b, c) rozptylu [55]

Na obrázku 5.5 můžeme vidět schéma jednoduchého Ramanova spektrometru. Jako zdroj světla slouží nejčastěji laserový paprsek s úzkou spektrální šířkou a vysokou stabilitou vlnových délek. Spektrometr slouží k difrakci Ramanova rozptýleného světla. Využívá se polychromátoru s difrakční mřížkou. Detektor musí mít velmi vysokou citlivost, protože Ramanovo rozptýlené světlo je extrémně slabé. Také je třeba zvolit čidlo s vhodným rozsahem detekovaných délek, odpovídající vlnovým délkám měřeného rozptýleného záření. [56]



Obrázek 5.5 Schematický diagram jednoduchého Ramanova spektrometru [57]

### 5.3 Mikroskopie atomárních sil

Mikroskopie atomárních sil neboli AFM analýza byla poprvé použita v roce 1986. Je klíčovým nástrojem používaným k charakterizaci struktury povrchu, drsnosti, morfologie, měření tloušťky tenkých filmů atd. Jedinečné schopnosti AFM analýzy jsou důležité, protože funkční vlastnosti a kosmetický vzhled objektu jsou velmi často ovlivněny právě jeho povrchem. [58]

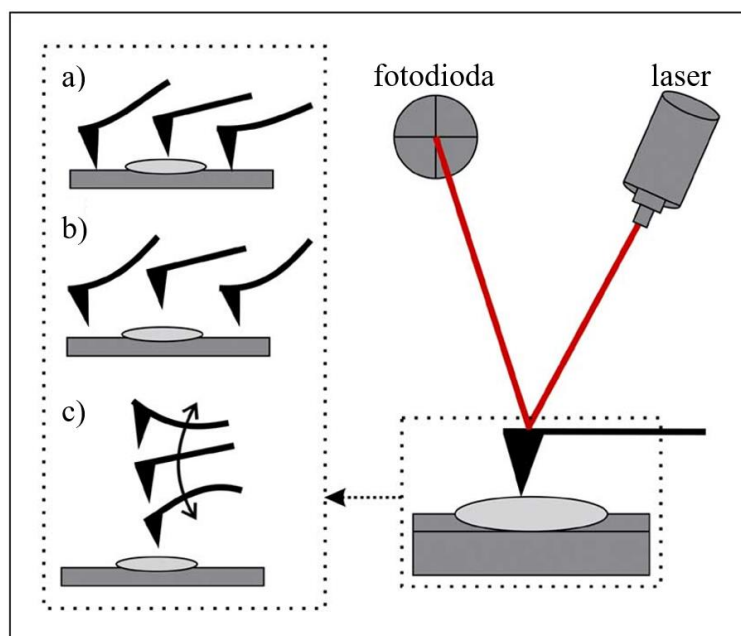
Zařízení pro AFM skenuje povrch pomocí mechanické sondy, na jejímž konci je ve většině případů vytvořen velmi ostrý hrot o průměru  $\approx 10$  nm až 20 nm. Hrot se pohybuje v reakci na interakce s povrchem. Tento pohyb je měřen zaostřeným laserovým paprskem, který je po odrazu od sondy detekován fotodiodou (viz obrázek 5.6). [59]

AFM lze obvykle používat ve třech základních režimech, kontaktním, bezkontaktním a „třukacím“ (viz obrázek 5.6). Pro měření povrchové síly se nejčastěji používá kontaktní režim, ve kterém hrot sondy skenuje vzorek v těsném kontaktu s povrchem. V bezkontaktním režimu se špička obvykle pohybuje asi 5 nm až 15 nm nad povrchem substrátu. Kontaktní režim má ovšem určité nedostatky. Jedná se především o vyšší míru opotřebení hrotu a jeho následné selhání během skenování. To je zapříčiněno především

třením mezi hrotem a povrchem substrátu, elektrostatickými silami a adhezí. Tyto nedostatky řeší „třukací“ režim, kdy nosník vibruje tak, aby byl hrot se skenovaným povrchem v kontaktu pouze přerušovaně. [59] [60]

AFM se používá ke zobrazení a manipulaci atomů a struktur na různých površích. Atom na vrcholu hrotu sondy interaguje s jednotlivými atomy povrchu analyzovaného materiálu a s každým z nich vytváří počáteční chemické vazby. Protože tyto chemické interakce citlivě mění frekvenci vibrací hrotu, lze je detekovat a mapovat. [59]

Výhodou AFM analýzy oproti podobným metodám je především ve velikosti síly, kterou hrot sondy působí na povrch analyzovaného vzorku. Ta se pohybuje až na úrovních nižších než nN. Největší předností AFM analýzy je však její rozlišení. Například drsnost povrchu je u materiálů, jako jsou křemíkové wafery nebo skla displejů, hluboko pod úrovní jednoho nm. Rozlišení AFM je v laterálním směru v jednotkách nm, ve vertikálním směru dokonce v řádech několika jednotek pm. [61]



Obrázek 5.6 Schéma zařízení pro AFM analýzu s jednotlivými pracovními režimy, a) kontaktní režim, b) bezkontaktní režim, c) „třukací“ režim [58]

## 5.4 Infračervená spektroskopie s Fourierovou transformací

Infračervená spektroskopie s Fourierovou transformací (FTIR) je nejpoužívanější modifikací infračervené spektroskopie. Když infračervené záření prochází vzorkem, je jeho část materiálem absorbována a část projde skrz. Výsledný signál na detektoru ve formě spektra reprezentuje molekulární „otisk“ analyzovaného vzorku. FTIR spektroskopie je tedy užitečná a využívána proto, že různé chemické struktury nebo molekuly produkují různé spektrální „otisky“. Díky tomu jsme schopni jak kvalitativní, tak kvantitativní analýzy materiálu. [62]

Analýza FTIR měří rozsah vlnových délek v infračervené oblasti, které jsou absorbovány materiálem. Měří se absorbance energie infračerveného světla vzorku při různých vlnových délkách. Účelem tohoto měření je určení molekulárního složení a struktury materiálu. Neznámé materiály jsou identifikovány porovnáním naměřeného spektra s referenčními spektry z databáze. Pokud lze vytvořit standardní křivku známých koncentrací sledované složky, můžeme touto metodou materiály také kvantifikovat. [63]

K identifikaci vzorků se používá zařízení zvané interferometr (viz obrázek 5.7), který produkuje optický signál obsahující všechny infračervené frekvence. Tento signál je velmi dobře a rychle měřitelný. Po průchodu materiálem je zachycen na detektoru, následně dekódován a zmapován použitím matematické techniky známé jako Fourierova transformace, která převede výstup detektoru na interpretovatelné spektrum. Výstupem je tedy graf obsahující spektrum se vzory reprezentující analyzovaný vzorek a poskytující pohled na jeho strukturu. [62] [63]

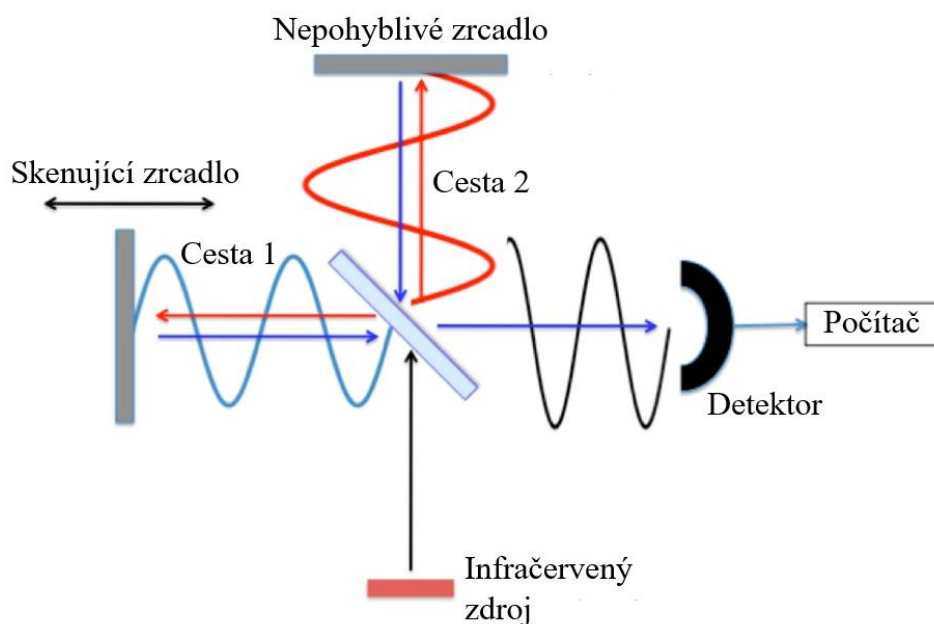
Infračervené světlo je nejčastěji generováno průchodem elektřiny přes vodivou keramickou tyč (žhavicí tyč). Jako první se záření potká s takzvaným rozdělovačem paprsků. Jedná se o zrcadlo částečně potažené tenkou vrstvou, díky které jím část záření projde skrz a část se odrazí. Jak je patrné z obrázku 5.7, jednotlivé paprsky poté pokračují cestou 1 a 2, odrazí se od zrcadla a vrací se zpátky do rozdělovače paprsků, kde interferují a odráží se do detektoru. Signál zaznamenaný na detektoru je tedy superpozicí obou paprsků infračerveného záření a závisí na rozdílu délek cest 1 a 2. Výstupem je interferogram, který udává závislost signálu zaznamenaném na detektoru na pozici pohyblivého skenovacího zrcadla. [64]

Přesto, že informace obsažené ve spektru a interferogramu jsou stejné, je obtížné interpretovat interferogram z hlediska molekulární struktury. Musí být tedy převeden zpět na spektrum. K této transformaci aplikujeme na interferogram Fourierovu transformaci vyjádřenou rovnicí

$$\tilde{f}(f) = \int_{-x}^x f(x)e^{-j2\pi fx} dx, \quad (5.8)$$

kde  $\tilde{f}(f)$  je spektrum, které je funkcí frekvence,  $f$  a  $f(x)$  je signál měřený na detektoru, což je funkce pozice zrcadla,  $x$ . [64]

Mezi hlavní výhody FTIR analýzy patří vyšší rozlišení při nižších nákladech, relativně malé množství času potřebné na shromáždění jednotlivých spekter a také možnost použití FTIR ve fotoakustickém režimu, kde vzorky nemusí být opticky tenké. [64]



Obrázek 5.7 Schéma interferometru používaného pro měření metodou FTIR [64]

## 5.5 Rentgenová fotoelektronová spektroskopie

Rentgenová fotoelektronová spektroskopie (XPS) je vakuová kvantitativní technika pro měření elementárního složení povrchu materiálu a určení vazebného stavu prvků. Dokáže detekovat všechny prvky s výjimkou vodíku a helia na základě vazebných energií fotoelektronů. Fotoelektron je označení pro elektron, který se vyzáří, když energetický foton zasáhne molekulu. XPS je obvykle schopna skenovat povrch do hloubky 10 nm. [65] [66] [67]

XPS analýza se provádí ozářením vzorku rentgenovými paprsky a měřením kinetické energie elektronů, které jsou emitovány z hloubky 1 až 10 nm z povrchu zkoumaného materiálu. Atomy povrchu mají v XPS spektru charakteristické vrcholy. Energie a intenzita těchto vrcholů umožňuje identifikaci a kvantifikaci všech přítomných povrchových prvků (kromě vodíku a helia). [68]

Díky vysoké povrchové citlivosti je XPS cenným nástrojem při studiu grafenu, protože čistý grafen má tloušťku pouze jedné nebo několik atomických vrstev. XPS tak může poskytnout velmi užitečné kvantitativní informace týkající se počtu vrstev a identifikace nečistot. Můžeme ji využít například k identifikaci kovových nečistot vzniklých při výrobě grafenu CVD procesem, odhadu tloušťky epitaxního grafenu, k měření množství oxidu vytvořeného na rozhraní s SiC substrátem a podobně. XPS je také neocenitelným nástrojem při analýze grafenu před i po jakékoli chemické modifikaci. [68]



## 6. FET S KANÁLEM Z GRAFENU

Ve srovnání s běžnými polovodiči, jako je křemík, vykazuje grafen zcela odlišné vlastnosti. Jelikož se jedná o polovodič s nulovou šířkou zakázaného pásu, vykazuje velmi vysokou elektrickou vodivostí. Jeho valenční a vodivostní pás se setkávají v takzvaném Diracově bodě (viz obrázek 1.4.). [69]

Aby se polovodič stal vodivý a mohla jím protékat elektřina, je zapotřebí určitého typu aktivace, aby měly nosiče elektrického náboje dostatek energie pro překonání zakázaného pásu. V tranzistorech typu FET dochází k řízené aktivaci pomocí energie elektrického pole. [69]

Klasický GFET (grafenový unipolární tranzistor, graphene field effect transistor) je tříelektrodová součástka, která je v některých ohledech podobná konvenčním FET. Třemi elektrodami jsou source (S) – zdrojová elektroda, drain (D) – odtoková elektroda (nora) a gate (G) – řídicí elektroda (viz obrázek 6.1). Na rozdíl od křemíkového tranzistoru má GFET tenký grafenový kanál, obvykle o délce v řádech desítek  $\mu\text{m}$ , mezi kovovými elektrodami D a S. Vzhledem k tomu, že jsou kanály v GFET tranzistorech tvořeny grafenem, je možné využít je díky jejich bezkonkurenční citlivosti v nejrůznějších aplikacích, jako jsou biosenzory, magnetické senzory, fotodetektory a podobně. [70] [39]

### 6.1 Vlastnosti

Právě výjimečná citlivost je jednou z hlavních předností grafenových tranzistorů. Dvojměrná struktura grafenu má oproti klasickým polovodičům řadu výhod. Protože většina tranzistorových polovodičových senzorů je trojrozměrná, změny elektrického náboje na povrchu ne vždy dokážou proniknout hlouběji do kanálu. To může významným způsobem omezit citlivost odezvy. Naopak u grafenu, který má tloušťku pouze jednoho atomu, je celý kanál GFET přímo vystaven působení jakékoliv částice, která se s ním nachází v kontaktu nebo v jeho blízkém okolí. [39]

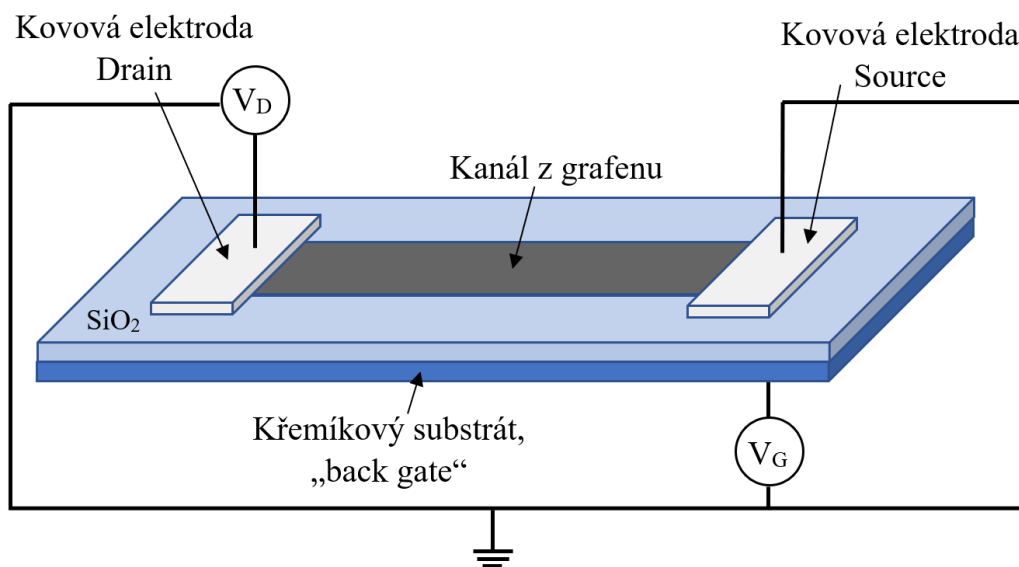
Další výhodou tohoto typu tranzistorů je menší množství vad. Vyrábět polovodiče, které mají podobnou tloušťku jako grafen, je velmi neefektivní. Při těchto tloušťkách dominují v polovodiči povrchové vady a volné vazby, které omezují citlivost zařízení a můžou způsobovat to, že senzor bude aktivní, i když nebude nic detekovat (tzv. detekce „false positive“). U grafenu tento problém odpadá, protože je možné jej vyrobit s velmi vysokou mírou čistoty a malým množstvím defektů. [39]

Poslední z velmi významných výhod GFET tranzistorů je vynikající vodivost, která je mnohem vyšší než u tradičních FET. Pohyblivost nosičů náboje dosahuje hodnot až  $200000 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  a zbytková hustota nosičů náboje se pohybuje v řádech  $5 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ . Značnou nevýhodou GFET je již dříve zmíněná unikátní struktura energetických pásů grafenu, díky které při nenulovém napětí na kanálu ( $U_{\text{DS}}$ ) protéká tranzistorem proud i bez

přiložení napětí na hradlo. Tato vlastnost brání využití GFET v klasických elektronických aplikacích. [14] [39]

## 6.2 Výroba

Grafenové tranzistory se nejčastěji vyrábějí na substrátech  $\text{Si}^+/\text{SiO}_2$ . Samotný grafen roste mimo substrát na kovovém nosném materiálu pomocí chemické depozice z plynné fáze (CVD). Po dokončení procesu je vytvořená vrstva přenesena z nosného depozičního materiálu na křemíkový substrát. Následuje depozice kovových elektrod a tvarování jednotlivých grafenových kanálů do požadované velikosti a tvaru. K tomu je využíván nejčastěji proces litografie. [39]



Obrázek 6.1 Schématický náčrt unipolárního tranzistoru s kanálem z grafenu v zapojení s „back gate“

## 6.3 Transportní vlastnosti

Transportní vlastnosti grafenu, jako je koncentrace nosičů náboje a pohyblivost nosičů, lze určit, podobně jako u kovových materiálů a polovodičů, měřením v magnetickém poli. Jedním z takových měření je Hallův jev popisující vznik příčného elektrického pole v materiálu, kterým protéká elektrický proud a který je umístěn do magnetického pole. Toto elektrické pole vzniká působením Lorentzovy síly, která je příčinou vychylování částic opačné polarity k opačným okrajům materiálu.

V případě měření elektrických vlastností na polem řízeném tranzistoru je možné pro určení koncentrace nosičů náboje využít teorii kondenzátorů. Přiložením napětí na křemíkový substrát, který slouží jako hradlo, dochází v grafenovém kanálu k hromadění náboje. Křemíkový substrát společně s kanálem z grafenu tedy tvoří elektrody deskového kondenzátoru. Náboj akumulovaný v grafenu je možné vyjádřit vztahem

$$Q = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{S}{d} U_G, \quad (6.1)$$

kde  $Q$  je celkový náboj v grafenu,  $\varepsilon_0$  permitivita vakua ( $8,854 \cdot 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$ ),  $\varepsilon_r$  relativní permitivita materiálu mezi elektrodami ( $\varepsilon_r = 3,9$  pro  $\text{SiO}_2$  [71]),  $S$  je plocha menší z elektrod a  $d$  je tloušťka izolační vrstvy. Celkový náboj v grafenu  $Q$  je dán součinem počtu nosičů náboje  $N$  a elementárního náboje  $e$ , tedy

$$Q = Ne. \quad (6.2)$$

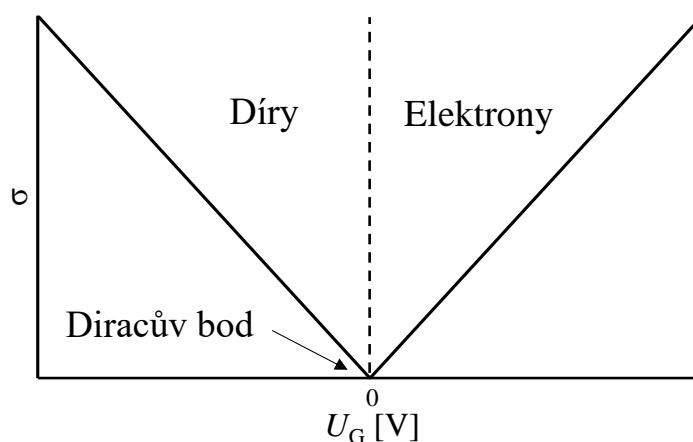
Koncentrace nosičů náboje  $n$  je dána podílem počtu nosičů náboje  $N$  a plochou kanálu  $S$ . Pro její výpočet pak platí

$$n = \frac{N}{S} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r}{ed} U_G = k U_G. \quad (6.3)$$

Protože jsou parametry  $\varepsilon_0$ ,  $\varepsilon_r$ ,  $e$  i  $d$  konstantní, můžeme zlomek v rovnici nahradit parametrem  $k$  ( $\approx 2,4 \cdot 10^{15} \text{ V}^{-1} \text{ m}^{-2}$ ). Koncentrace nosičů náboje tedy přímo úměrně závisí na velikosti napětí na hradle. Pro nulové napětí na hradle je koncentrace volných nosičů náboje také nulová. U grafenu tento stav v technické praxi nazýváme Diracův bod, tedy bod s nejmenší hodnotou vodivosti. Při zvyšování napětí na hradle do kladných hodnot dochází vlivem rostoucího elektrického pole k hromadění elektronů v kanálu. Pokud snižujeme hradlové napětí do záporných hodnot, dochází v kanálu ke hromadění děr. Z těchto poznatků vyplývá, že jsme napětím  $U_G$  schopni řídit typ vodivosti a zároveň i koncentraci nosičů v kanálu. Vodivost kanálu tedy klesá z obou stran s napětím  $U_G$  blížícím se k hodnotě  $U_G = 0 \text{ V}$ , jak je patrné z obrázku 6.2. Pohyblivost nosičů  $\mu$  je poté dána pro napětí  $U_G$  různá od nuly vztahem

$$\mu = \frac{1}{neR_{\square}}, \quad (6.4)$$

kde  $R_{\square}$  je odpor na čtverec grafenového kanálu. [72]



Obrázek 6.2 Teoretický průběh vodivosti dokonalého grafenu v závislosti na napětí  $U_G$  [72]

## 7. ELEKTRICKÁ CHARAKTERIZACE GFET

Měření v rámci praktické části bylo prováděno na dvou rozdílných vzorcích. Jedním z nich byl komerčně prodáváný čip firmy GRAPHENEA. Druhým byl čip s MEMS určený pro měření elektrických vlastností grafenu, především v závislosti na jeho ohybu, vyrobený v čistých prostorech CEITEC. Na obou zařízeních se nacházely unipolární tranzistory s kanálem z grafenu. Ten byl pro oba vzorky vyroben metodou CVD. Rozdíl v kvalitě jednotlivých struktur je dán především počtem litografických procesů, kterými musely vzorky při výrobě projít. U MEMS je tento počet vyšší z důvodu jeho složitější struktury, především ohebných nosníků zajišťujících možnost ohybu grafenového kanálu. Větší množství fotolitografických procesů negativně ovlivňuje kvalitu grafenu, protože v něm mohou ulpět částice látek a produktů z jednotlivých litografických procesů. První část měření se zabývá porovnáním jejich elektrických vlastností, druhá část je soustředěna na ohyb grafenu na MEMS.

Pro měření VA charakteristik byla použita hrotová testovací stanice s analyzátozem parametrů 4200A-SCS vyráběným firmou Keithley (viz obrázek 7.1). Tento přístroj slouží především k měření DC, VA, kapacitně-napěťových a pulzních charakteristik a vykreslování grafů v reálném čase. Zařízení je vybaveno kompletním integrovaným počítačem s operačním systémem Microsoft Windows, velkokapacitním úložištěm a dotykovou obrazovkou. [73]

Čip GFET-S10 vyráběný komerčně firmou GRAPHENEA (viz obrázek 7.2) má rozměry  $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$  a je vyráběn v čistých prostorech třídy 100. Na čipu je vytvořeno 36 GFET struktur v mřížce  $6 \times 6$ , z nichž 30 má geometrii Hall-bar a 6 geometrii pro dvoubodové měření. Geometrii Hall-bar lze použít jak k měření Hallova efektu, tak pro měření dvoubodovou nebo čtyřbodovou metodou. Jednotlivé GFET se liší v rozměrech grafenového kanálu, což umožňuje zkoumat závislost vlastností zařízení na jeho geometrii. Základní vlastnosti a specifikace jsou uvedeny v tabulce 7.1. [71]



Obrázek 7.1 Analyzátor parametrů Keithley 4200A-SCS [74]

Tabulka 7.1 Základní specifikace GFET S-10 [71]

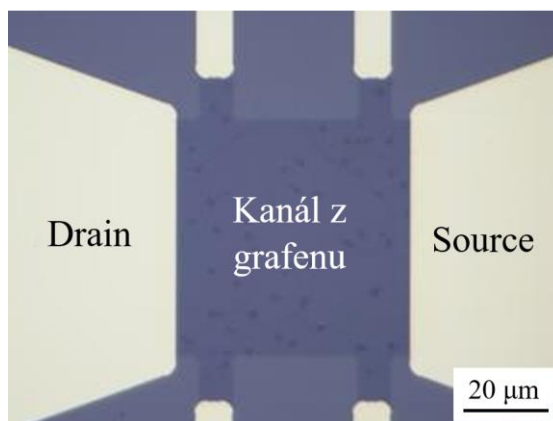
Metoda výroby grafenu	CVD
Rozměry čipu	10 mm x 10 mm
Tloušťka čipu	675 $\mu\text{m}$
Počet GFET na čipu	36
Tloušťka SiO <sub>2</sub> na gate elektrodě	90 nm
Relativní permitivita SiO <sub>2</sub>	3,9
Rezistivita substrátu	1-10 $\Omega \cdot \text{cm}$
Materiál elektrod	Cr (2 nm) / Au (50 nm)
Pohyblivost nosičů v grafenu	$> 1000 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$
Diracův bod	$< 50 \text{ V}$
Maximální napětí mezi G a S	$\pm 50 \text{ V}$
Maximální teplota	150 °C
Maximální proudová hustota mezi D a S	$10^7 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$



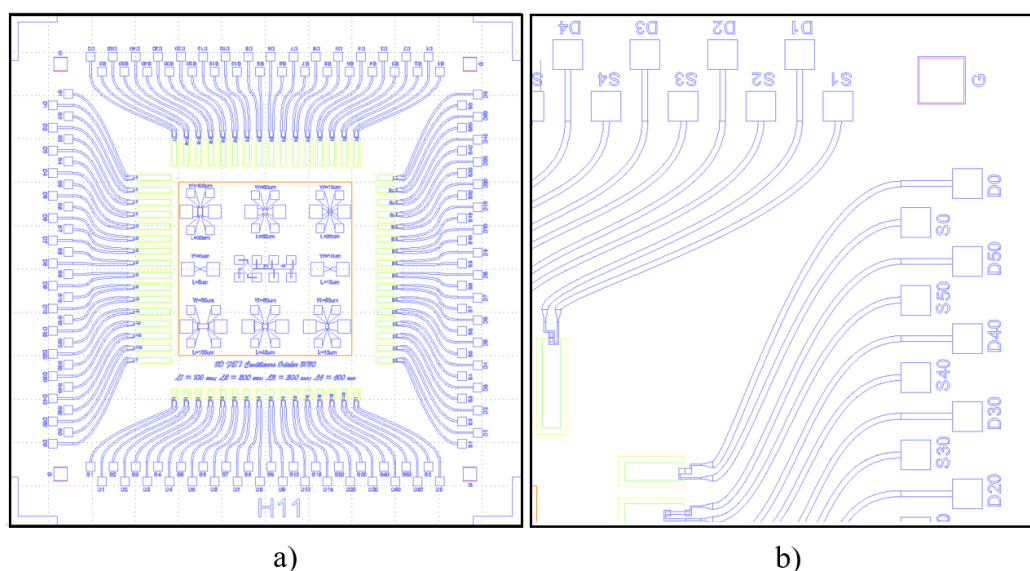
Obrázek 7.2 GFET S-10 firmy GRAPHENEA [75]

Detailní pohled na jednu ze struktur můžeme vidět na obrázku 7.3. Skládá se ze dvou zlatých elektrod drain a source, čtyř elektrod pro měření Hallova napětí nebo měření čtyřbodovou metodou a kanálem z grafenu.

Schéma struktury čipu s MEMS vyrobeného na CEITECu můžeme vidět na obrázku 7.4. Nachází se na něm 64 GFET struktur umístěných do čtyř řad. Každá řada se liší délkou ohybatelného nosníku, který slouží pro měření elektrických vlastností grafenu při ohýbání. Délky jednotlivých kanálů se pohybují v rozmezí od 1  $\mu\text{m}$  do 50  $\mu\text{m}$ . Šířka je u všech struktur stejná, a to 10  $\mu\text{m}$ . Každá elektroda je označena písmenem. Elektrody S slouží jako source, D jako drain a G jako gate, který je pro celý čip tvořen jednou společnou křemíkovou vrstvou (back gate).



Obrázek 7.3 Struktura jednoho GFET na čipu GFET S-10 [71]

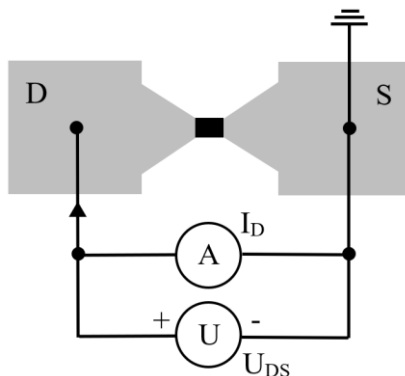


Obrázek 7.4 a) Schéma struktury čipu H11 vyráběného na CEITECu, b) přiblížení oblasti s elektrodami drain (D), source (S) a gate (G)

## 7.1 Měření odporu kanálu

Pro měření odporu kanálu byla použita dvoubodová metoda. Schéma zapojení měřicího systému je znázorněno na obrázku 7.5. Jak lze vidět, na elektrodu D je přivedeno napětí, elektroda S je uzemněna a mezi hroty měříme jak napětí, tak elektrický proud. U komerčně vyráběného vzorku byla měření prováděna na několika GFET strukturách s různými rozměry kanálů. Pro zajištění stabilního kontaktu byla za pomoci zařízení s mikroposuvníky a měřicích hrotů proškrábnuta do zlatých elektrod malá rýha, do které byl poté vrchol hrotu umístěn. Po nakontaktování všech elektrod následovalo nastavení analyzátoru Keithley 4200A-SCS. Pro měření byl vytvořen profil uzpůsobený k měření

odporu kanálu 2D-FET tranzistorů dvoubodovou metodou. Měřenými veličinami bylo napětí mezi elektrodami S a D ( $U_{DS}$ ) a proud protékající vzorkem ( $I_D$ ). Na první sondě, připojené k elektrodě D, bylo napětí lineárně měněno v rozmezí od -1 V do 1 V s krokem 0,048 V. Hodnota kroku byla zvolena účelně tak, aby nedošlo při rozmítání  $U_{DS}$  k měření proudu při  $U_{DS} = 0$  V. Sonda 2, připojená k elektrodě S, sloužila jako zemnicí.



Obrázek 7.5 Schéma připojení hrotů pro dvoubodové měření odporu [76]

Naměřené VA charakteristiky mají lineární průběhy (viz obrázek 7.6), což značí, že se kanál chová v daném rozsahu napětí  $U_{DS}$  bez připojeného napětí  $U_{GS}$  jako klasický rezistor. U každého z těchto průběhů byly poté vypočteny hodnoty jednotlivých elektrických veličin. Nejprve hodnota odporu kanálu. Pro každou z naměřených hodnot byl nejprve určen odpor dle:

$$R_i = \frac{U_{DS}}{I_D}, \quad (7.1)$$

kde  $U_{DS}$  značí napětí mezi elektrodami D a S a  $I$  proud protékající kanálem. Výsledný odpor kanálu je dán aritmetickým průměrem těchto hodnot následovně:

$$R = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_i. \quad (7.2)$$

kde  $n$  značí počet jednotlivých naměřených hodnot. Z takto vypočteného odporu a známých rozměrů kanálu můžeme vypočítat hodnotu odporu na čtverec pomocí rovnice

$$R_{\square} = R \frac{w}{l}, \quad (7.3)$$

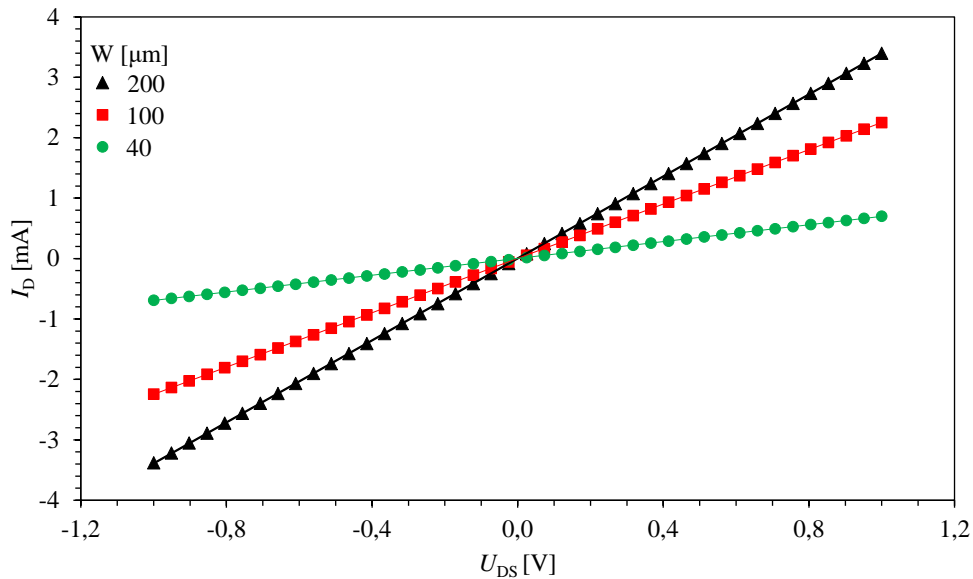
kde  $w$  je šířka kanálu a  $l$  délka kanálu. Výrobce garantuje, že je kanál tvořen jednou vrstvou grafenu. Je tedy známa tloušťka kanálu, která odpovídá velikosti jednoho atomu (0,335 nm). Díky tomu lze dopočítat rezistivitu, popř. konduktivitu kanálu ze vztahů

$$\rho = \frac{Rwh}{l} = R_{\square}h, \quad (7.4)$$

a následně:

$$\gamma = \frac{1}{\rho}, \quad (7.5)$$

kde  $h$  je tloušťka kanálu, v našem případě  $h = 0,335$  nm. Přehled vypočtených hodnot pro měřené struktury je uveden v tabulce 7.2.



Obrázek 7.6 VA charakteristiky GFET struktur na čipu GRAPHENEA s délkou  $L = 30$   $\mu\text{m}$  a různými šířkami pro  $U_{GS} = 0$  V

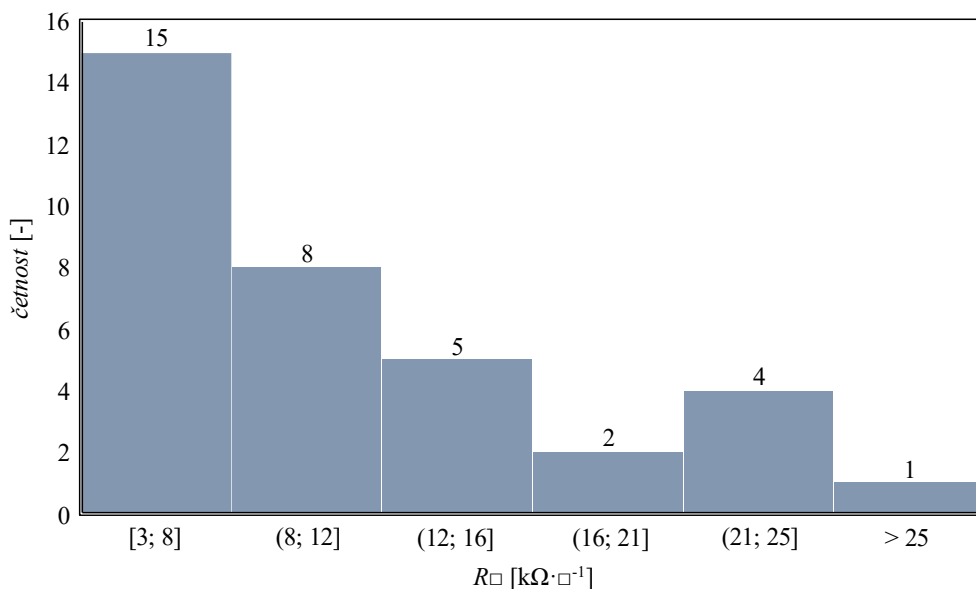
Tabulka 7.2 Vypočtené hodnoty pro měřené GFET struktury na čipu GRAPHENEA

$w$ [ $\mu\text{m}$ ]	$l$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R$ [ $\Omega$ ]	$R_{\square}$ [ $\Omega \cdot \square^{-1}$ ]	$\rho$ [ $\Omega \cdot \mu\text{m}$ ]	$\gamma$ [ $\text{S} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ ]
200	30	233	1553	0,5201	1,923
100	30	445	1483	0,4967	2,013
40	30	1439	1918	0,6427	1,556

Hodnoty odporů na čtverec jsou řádově stejné v jednotkách  $\text{k}\Omega$ . Jejich hodnoty by ovšem měly být teoreticky totožné, protože jsou oba kanály tvořeny stejným materiálem – grafenem. Odchytky v hodnotách odporu na čtverec mohou být způsobeny několika faktory. Prvním z nich je, že grafen velmi ochotně váže okolní molekuly, v našem případě převážně molekuly vody, které se nachází ve vzduchu. Dalším zdrojem odchylky mohou být poruchy v krystalové mřížce. Ty nevznikají při samotném růstu grafenu metodou CVD, ale při jeho přenosu ze substrátu na čip [45]. Posledním zdrojem chyby mohou být parazitní přechodové odpory kontaktů mezi měřicím hrotem a kontaktní plochou elektrody. Největší vliv na rozdílné hodnoty má v tomto případě jednoznačně množství adsorbované vlhkosti a přechodové odpory. Díky vlastnosti velmi dobře vázat okolní molekuly se grafen využívá velmi často v senzorických aplikacích.



Stejný typ měření byl proveden také na vzorcích s MEMS. Zde bylo ovšem odměřeno větší množství struktur. Jak již bylo zmíněno výše, čip prochází při výrobě větším množstvím litografických procesů, které zhoršují kvalitu grafenu. Hodnoty odporů na čtverec jednotlivých kanálů se mohou díky tomu značně lišit. Pro určení referenčních hodnot je tedy třeba vytvořit statistický soubor měření. Z něj je možné určit, v jakých intervalech se hodnoty odporů kanálů nachází a také pozorovat odchylky a odhadnout jejich původ. Celkem bylo odměřeno 35 GFET struktur na třech různých čipech (viz příloha A.1). Na každé z nich byly odměřeny a vypočteny totožné závislosti a elektrické veličiny, jako u komerčně vyráběného čipu. Z takto získaného souboru hodnot byl z odporů na čtverec vytvořen histogram, který udává četnost výskytu hodnot v určitých intervalech (viz obr. 7.7). Jak je možné vidět, největší množství hodnot se nachází v intervalu od  $3 \text{ k}\Omega \cdot \square^{-1}$  do  $8 \text{ k}\Omega \cdot \square^{-1}$ . V tomto rozmezí jsou odchylky mezi jednotlivými hodnotami způsobeny převážně stejnými vlivy, jako u čipu GRAPHENEA – adsorbovanou vlhkostí, nečistotami, poruchami v krystalové mříži, případně rozdílnými hodnotami kontaktních odporů. Třináct z naměřených hodnot se nachází v intervalech od  $8 \text{ k}\Omega \cdot \square^{-1}$  do  $16 \text{ k}\Omega \cdot \square^{-1}$ . Hodnoty odporů na čtverec jsou v těchto intervalech dvojnásobné oproti intervalu prvnímu. Zde můžou být odchylky způsobeny nedokonalým kontaktem mezi hrotem a elektrodou, popř. vadou zlaté vodivé cesty, jako je poškrábání apod. V posledních třech intervalech, kdy je hodnota větší než  $16 \text{ k}\Omega \cdot \square^{-1}$ , došlo pravděpodobně k poškození samotného kanálu, který díky tomu neměl tvar čtverce nebo obdélníku, ale nacházely se v něm trhliny různých tvarů. Tyto vady brání průchodu proudu kanálem a snižují tak jeho vodivost, což se projevuje ve vyšších hodnotách odporů na čtverec.



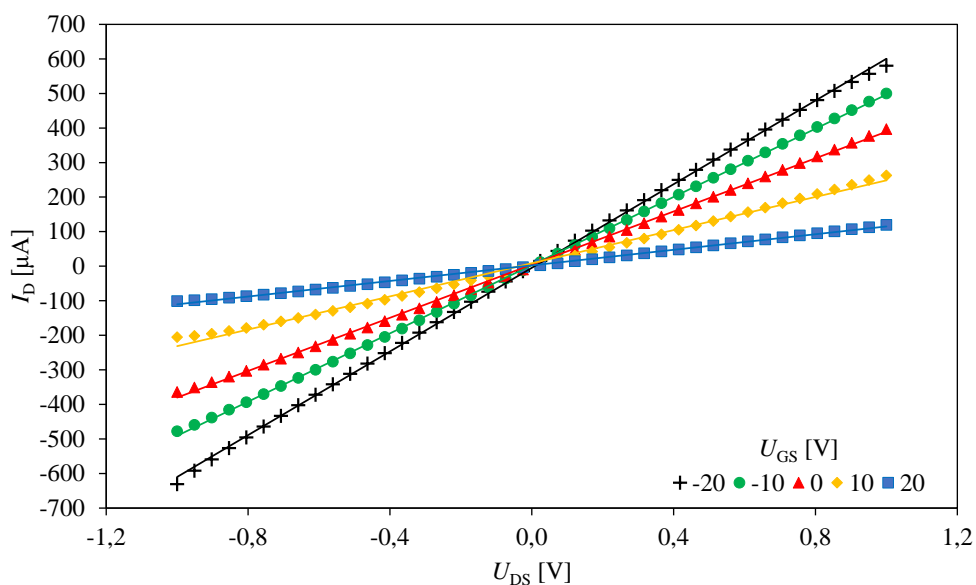
Obrázek 7.7 Histogram z naměřených hodnot odporu na čtverec u čipů s MEMS, na ose x jsou vyneseny intervaly odporů na čtverec, na ose y četnost výskytu naměřených hodnot v těchto intervalech

Pro srovnání s komerčně vyráběným čipem využijeme hodnot, které se nachází v intervalu od  $3 \text{ k}\Omega \cdot \square^{-1}$  až  $8 \text{ k}\Omega \cdot \square^{-1}$ . Odporů na čtverec jsou u MEMS dvakrát až pětkrát větší než u čipu GRAPHENEA. Vakance v krystalové mřížce jsou způsobeny metodou přenosu grafenu na čip a mohou způsobit lepší vázání molekul z okolního prostředí. V kanálech z grafenu se u struktur MEMS navíc vyskytují ještě částice jiných látek a nečistoty, které v kanálu ulpěly při opakovaných litografických procesech během výroby. K odchylce může také přispívat rozdílná koncentrace dotovaných nosičů, která bude zkoumána v dalším oddílu praktické části. Vlivem všech těchto faktorů je způsobena celková odchylka mezi hodnotami odporů na čtverec struktur obou čipů.

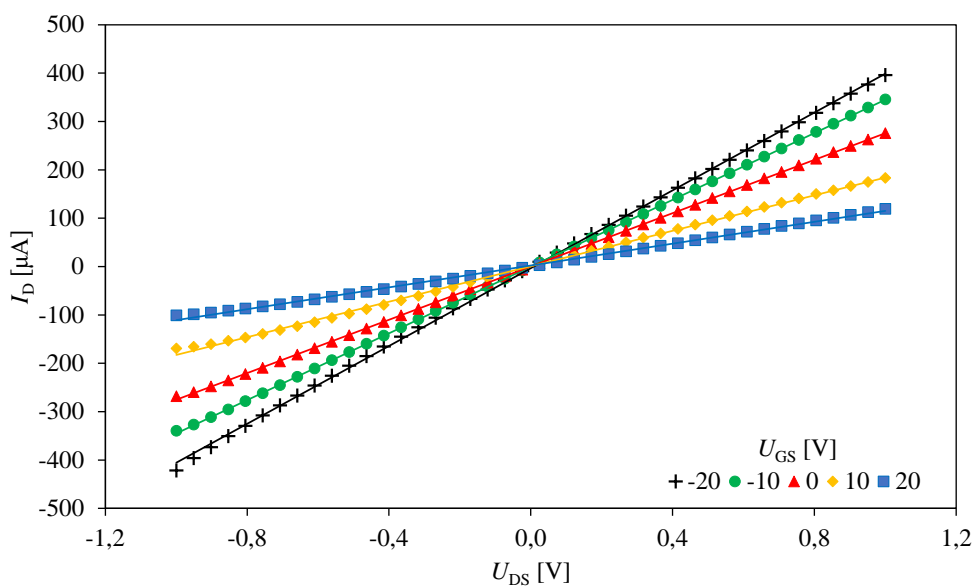
Dalším z experimentů bylo provedení stejného měření, ovšem při aplikaci hradlového napětí  $U_{GS}$ . U komerčně vyráběného čipu byl zvolen GFET s rozměry kanálu  $50 \mu\text{m} \times 40 \mu\text{m}$ , kde samotný substrát sloužil jako „back gate“ (viz obrázek 6.1). Napětí  $U_{DS}$  bylo měněno stejným způsobem jako u předchozího měření, tzn. od  $-1 \text{ V}$  do  $1 \text{ V}$ . Navíc ale po každém cyklu došlo ke změně napětí  $U_{GS}$ , a to v intervalu od  $-20 \text{ V}$  do  $20 \text{ V}$  s krokem  $10 \text{ V}$ .

Jak je vidět z grafu na obrázku 7.8, přímka, která znázorňuje závislost velikosti proudu  $I$  na napětí  $U_{DS}$ , je stejně jako v předchozím případě lineární. S rostoucím napětím  $U_{GS}$  se ovšem zmenšuje její strmost. To znamená, že se s rostoucím napětím  $U_{GS}$  snižuje vodivost kanálu.

Stejnou závislost je možné pozorovat také u MEMS (viz obr. 7.9). Pro měření byla zvolena jedna ze struktur, jejíž hodnota odporu na čtverec spadá do intervalu s hodnotami  $R_{\square}$  od  $3 \text{ k}\Omega \cdot \square^{-1}$  do  $8 \text{ k}\Omega \cdot \square^{-1}$ . Provedením identického měření je získána stejná závislost – strmost přímky, a tedy i vodivost kanálu, se snižují s rostoucím napětím  $U_{GS}$ . Z těchto měření lze vyvodit, že s rostoucím napětím  $U_{GS}$  klesá vodivost kanálu. Znamená to, že dochází k přibližování do místa s nejnižší vodivostí, tzv. Diracova bodu. V našem případě se nachází v oblasti kladných napětí  $U_{GS}$ , což značí, že je grafen dotován kladnými dírami a chová se proto jako polovodič typu P. Příčinou je především již dříve zmíněná vlhkost, která tento typ dotace způsobuje [77].



Obrázek 7.8 VA charakteristika GFET na čipu GRAPHENEA s rozměry kanálu  $50 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$  v závislosti na velikosti  $U_{GS}$

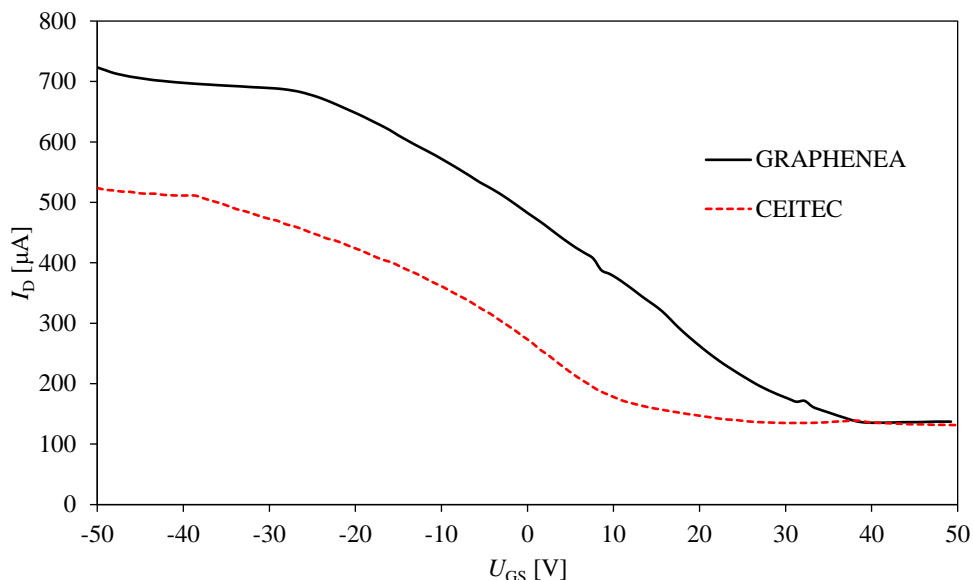


Obrázek 7.9 VA charakteristika MEMS s GFET na čipu z CEITECu s rozměry kanálu  $9 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$  v závislosti na velikosti  $U_{GS}$

## 7.2 Měření Diracova bodu

Pro nalezení polohy Diracova bodu, místa s nejnižší vodivostí, byla měřena závislost proudu tranzistorem na napětí  $U_{GS}$ . Zapojení měřicích hrotů bylo provedeno stejně jako

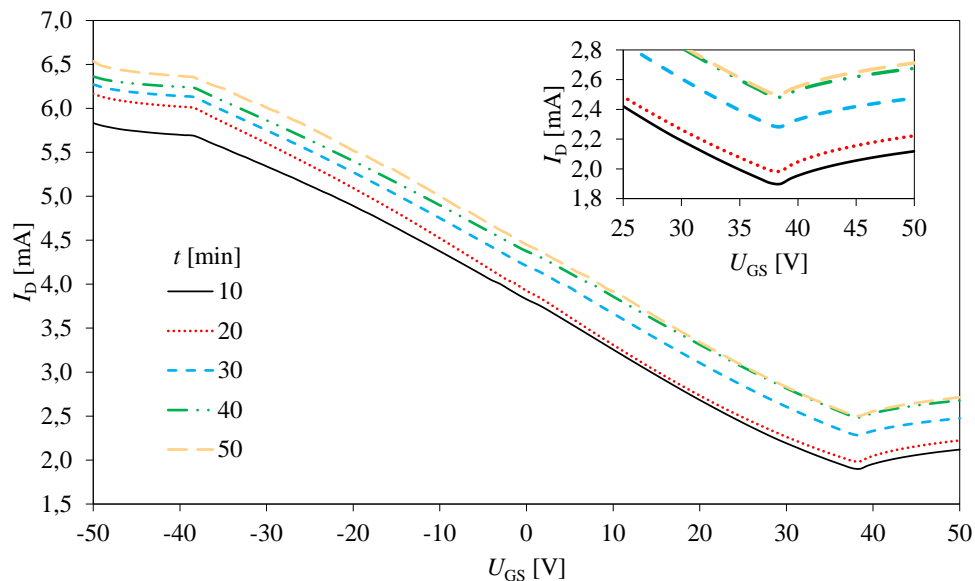
v předchozím měření. To znamená, že na každou z elektrod drain, source a gate byl připojen jeden hrot.  $U_{GS}$  bylo lineárně rozmítáno v rozmezí od  $-50$  V do  $50$  V. Napětí mezi drain a source bylo konstantní  $U_{DS} = 1$  V. Charakteristiky obou vzorků jsou znázorněny na obr. 7.10.



Obrázek 7.10 Závislost proudu  $I_D$  na napětí  $U_{GS}$  bez žíhání

Obě charakteristiky mají přibližně stejný průběh. Se snižováním  $U_{GS}$  dochází také ke snižování proudu, a to až k  $U_{GS} = 10$  V pro čip s MEMS, resp.  $U_{GS} = 35$  V pro čip GRAPHENEA. Od tohoto bodu se hodnota proudu ustálí na konstantní hodnotě. Teoreticky by ovšem měla charakteristika klesat do bodu s nejnižší vodivostí, Diracova bodu, a odtud opět růst (viz kapitola 6.3). V naměřených průbězích se ovšem žádný bod s výrazně nejnižší hodnotou vodivosti nenachází. Je to dáno již dříve zmíněnými vlivy, z nichž nejvýznamnějším je především adsorbovaná vlhkost. Ta způsobuje, že se grafen chová jako polovodič typu P a Diracův bod se tedy posouvá z teoretické hodnoty  $U_{GS} = 0$  V do kladných hodnot. Diracův bod se proto může nacházet i za hranicí rozsahu našeho měření. Kdybychom ovšem zvýšili napětí  $U_{GS}$  nad naši měřený interval, mohlo by dojít k poškození zařízení. Rozmezí povolených napětí na hradle udávané výrobcem je právě  $U_{GS} = \pm 50$  V. Druhou variantou, která mohla nastat, je fakt, kdy adsorbovaná vlhkost společně s nečistotami a poruchami v grafenu způsobí, že Diracův bod nelze v průběhu jednoznačně vidět kvůli malým změnám vodivosti v jeho okolí. To znamená, že se může nacházet v měřeném intervalu  $U_{GS}$ , ale nelze jej jednoznačně určit. Pro zlepšení výsledků měření, kdy bude možné z průběhu  $I_D$  v závislosti na  $U_{GS}$  jednoznačně určit místo s nejnižší vodivostí, je třeba se zbavit vlhkosti, která tvar průběhu ovlivňuje v největší míře. Toho je možné dosáhnout žíháním vzorků na hot platy.

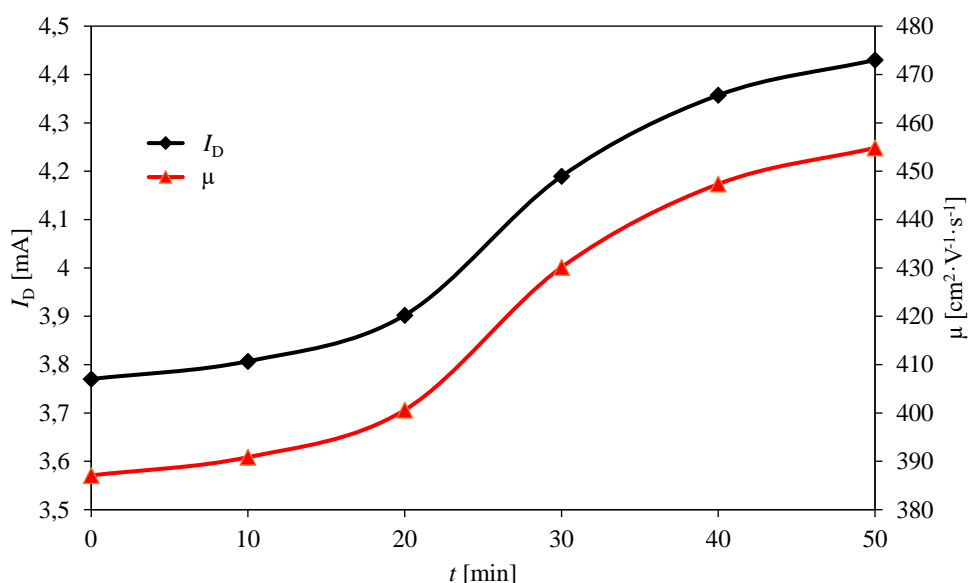
Pro měření závislosti tvaru průběhu na délce doby žíhání byl zvolen komerčně vyráběný čip, konkrétně struktura s rozměry  $w = 200 \mu\text{m}$  a  $l = 30 \mu\text{m}$ . Tímto vzorkem protéká díky velké šířce a malé délce kanálu velký proud a změny v charakteristice jsou proto zřetelnější. Vzorek byl žíhán při teplotě  $150 \text{ }^\circ\text{C}$ , což je maximální hodnota udávaná výrobcem. Nejprve byl umístěn na hot plate. Doba žíhání byla měněna v intervalu od 10 minut do 50 minut s krokem 5 minut. Před každým žíháním byl čip ponechán na vzduchu po dobu přibližně 20 minut, aby došlo k dostatečné adsorbaci vlhkosti a jednotlivá měření tak byla relevantní. Po uplynutí dané doby žíhání bylo provedeno měření závislosti proudu tranzistorem na  $U_{\text{GS}}$ . Následně byl vzorek opět vystaven působení vzduchu a okolní vlhkosti a celý proces se opakoval pro všechny doby žíhacího procesu. Výsledkem tohoto experimentu je sada charakteristik, které můžeme vidět na obr. 7.11. Jak lze vidět, již při žíhání po dobu 10 minut lze v charakteristice zřetelně rozeznat Diracův bod. Zároveň dochází s rostoucí dobou žíhání ke zvýšení vodivosti kanálu v celém rozsahu napětí  $U_{\text{GS}}$ . Na obr. 7.12 je znázorněna závislost proudu kanálem na době žíhání při  $U_{\text{GS}} = 0 \text{ V}$ . Pro krátké doby roste proud přibližně lineárně. Od doby 20 minut dochází k prudkému nárůstu až do doby 40 minut, kde se charakteristika zplošťuje a hodnota protékajícího proudu se s dále rostoucím časem mění již velmi málo. Pro dostačující vyžíhání vzorku tedy stačí 40 minut při teplotě  $150 \text{ }^\circ\text{C}$ .



Obrázek 7.11 Závislost  $I_{\text{D}}$  na  $U_{\text{GS}}$  při různých dobách žíhání, nahoře je přiblížena oblast Diracova bodu

Z posunu Diracova bodu do kladných hodnot  $U_{\text{GS}}$  můžeme určit pomocí vztahu (6.3) koncentraci dopovaných nosičů. U měřeného komerčně vyráběného vzorku je izolační vrstva mezi hradlem a kanálem tvořena oxidem křemičitým ( $\text{SiO}_2$ ), jehož relativní permitivita je  $\epsilon_r = 3,9$  a tloušťka oxidové vrstvy  $90 \text{ nm}$ . Pro tyto hodnoty dostáváme

konstantu  $k \approx 2,4 \cdot 10^{15} \text{ V}^{-1} \text{ m}^{-2}$ . Diracův bod se v našem případě nachází na hodnotě  $U_{GS} = 38 \text{ V}$ . Grafen je tedy dopován jako polovodič typu P koncentrací  $n \approx 9,12 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ . V kapitole 6.3 bylo odvozeno, že koncentrace nosičů náboje je přímo úměrná napětí  $U_{GS}$ . Při zvyšování délky doby žihání nedochází k posunu Diracova bodu, ale nachází se u všech průběhů na  $U_{GS} = 38 \text{ V}$ . Nedochází tedy ke změně koncentrace dotovaných nosičů. Změna vodivosti zvyšováním doby žihání musí být tedy způsobena růstem jejich pohyblivosti, kterou lze vypočítat dle rovnice (6.4). Změna pohyblivosti v závislosti na době žihání při  $U_{GS} = 0 \text{ V}$  má stejný průběh jako odpovídající charakteristika pro proud  $I_D$  (viz obr. 7.12). To potvrzuje naši teorii, že je změna vodivosti kanálu v závislosti na délce žihání zapříčiněna změnami pohyblivosti nosičů.



Obrázek 7.12 Závislost  $I_D$  a  $\mu$  na délce žihání při  $U_{GS} = 0 \text{ V}$

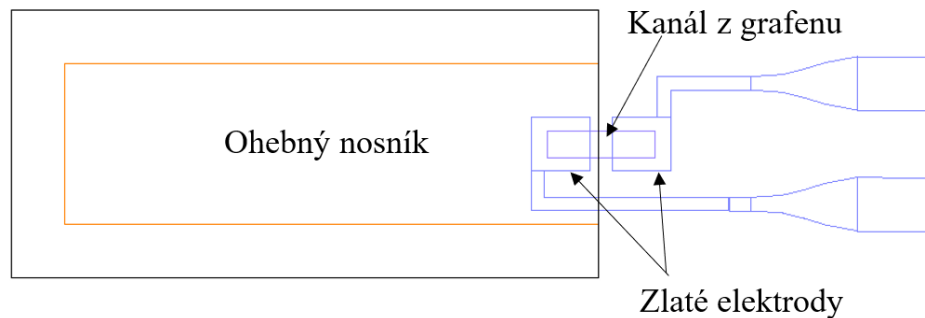
### 7.3 Měření vlastností grafenového kanálu při ohybu

Závislost elektrických vlastností grafenu na ohybu byly zkoumány na GFET strukturách umístěných na ohebných nosících (viz obr. 7.13). Ohýbání nosíku bylo prováděno mikroposuvníkem zakončeným hrotem. Pro přesné určení velikosti ohybu bylo třeba určit rozlišení mikroposuvníku. Ten byl nejprve vytočen do obou krajních poloh – maximální vytočení a minimální vytočení. Mezi těmito polohami byla mikrometrem změřena vzdálenost  $d$ , o kterou se daný hrot posunul. Pro vytočení z maximální do minimální polohy posuvník vykonal 67 otáček  $n$ . Mezi krajními hodnotami byla naměřena změna posuvu hrotu o 16,7 mm. Podle vzorce

$$DPR = \frac{d}{n} \quad (7.6)$$

můžeme vypočítat posun o jednu otáčku  $DPR$  (distance per rotation). Pro jednu otáčku

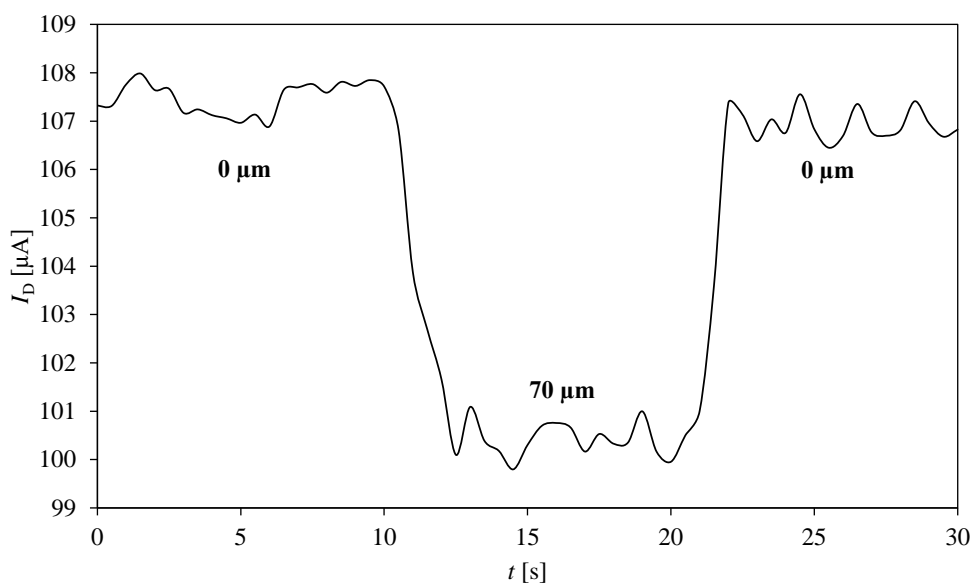
tedy platí  $DPR = 250 \mu\text{m}$ . Na mikroposuvníku se nachází 25 značek. Pootočení o jednu značku posune hrot o  $10 \mu\text{m}$ .



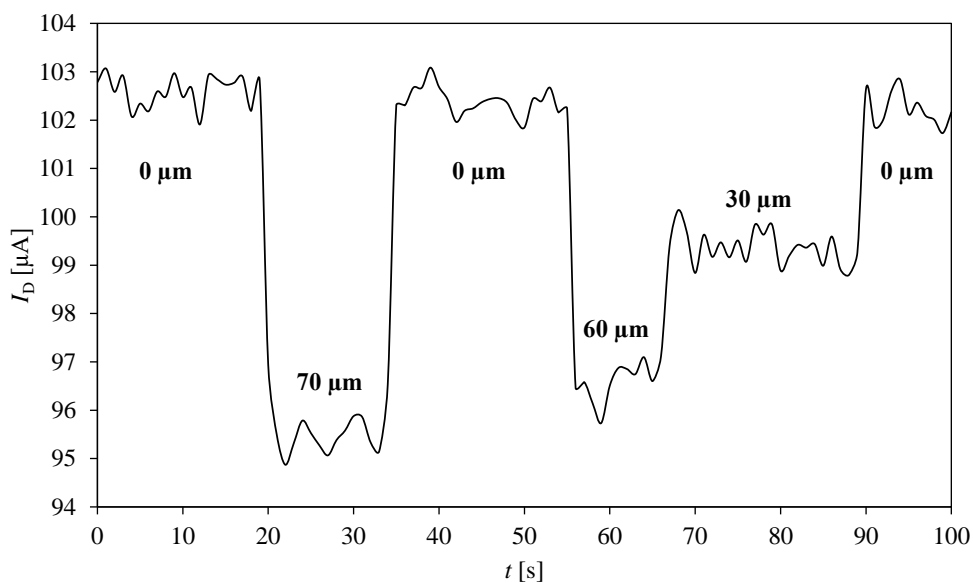
Obrázek 7.13 Struktura GFET s ohebným nosníkem

Nejprve byla měřena závislost proudu protékajícího kanálem, resp. jeho vodivosti, v závislosti na ohybu ( $y$ ). Měření probíhalo při  $U_{GS} = 0 \text{ V}$ . Hradlové napětí nemá na tvar průběhu žádný vliv. Měřicí hroty byly tedy připojeny na drain a source, třetí hrot byl použit pro ohyb nosníku. Jak lze vidět na obr. 7.13, polovina grafenového kanálu se nachází na ploše nosníku. Při jeho ohybu dochází tím pádem i k ohybu samotného grafenu, ve kterém vzniká vnitřní pnutí. To způsobí změnu jeho vodivosti. Průběh  $I_D$  v čase je vyneseno v grafu na obr. 7.14. Napětí mezi drain a source bylo zvoleno  $U_{DS} = 1 \text{ V}$ . V čase mezi  $t = 0 \text{ s}$  a  $t = 10 \text{ s}$  byla měřena referenční hodnota proudu bez ohybu. Proud  $I_D$  kolísá okolo hodnoty  $I_D \approx 107,5 \mu\text{A} \pm 0,5 \mu\text{A}$ . V čase  $t = 10 \text{ s}$  došlo k ohybu nosníku o  $70 \mu\text{m}$ . Proud kanálem s ohybem klesl a pohyboval se od této chvíle okolo hodnoty  $I_D \approx 100,5 \mu\text{A} \pm 0,5 \mu\text{A}$ . V čase  $t = 20 \text{ s}$  byl nosník opět uveden do původní polohy a proud  $I_D$  se vrátil na prvotní hodnotu také.

Ve druhém měření byla testována závislost proudu  $I_D$  na různých velikostech míry ohybu. Výsledná naměřená charakteristika je vynesena na obr. 7.15. Referenční hodnota proudu je v tomto případě  $I_D \approx 102,5 \mu\text{A} \pm 0,5 \mu\text{A}$ . Při prvním ohybu o  $70 \mu\text{m}$  došlo k poklesu proudu opět o  $7 \mu\text{A}$ , tedy na hodnotu  $I_D \approx 95,5 \mu\text{A} \pm 0,5 \mu\text{A}$ . Při druhém ohybu o  $60 \mu\text{m}$  proud poklesl na hodnotu  $I_D \approx 96,5 \mu\text{A} \pm 0,5 \mu\text{A}$ , což je o  $6 \mu\text{A}$  méně než hodnota referenční. Následně byla hodnota ohybu změněna z  $60 \mu\text{m}$  na  $30 \mu\text{m}$  a proud se změnil z  $I_D \approx 96,5 \mu\text{A} \pm 0,5 \mu\text{A}$  na  $I_D \approx 99,5 \mu\text{A} \pm 0,5 \mu\text{A}$ . Z tohoto měření lze vyvodit, že proud  $I_D$ , resp. vodivost kanálu je nepřímo úměrná míře ohybu. Čím více nosník ohneme, tím menší bude vodivost kanálu. Graf závislosti proudu kanálem na míře ohybu je na obrázku 7.16. Průběh charakteristiky se blíží lineárnímu. Pro každou hodnotu velikosti ohybu byl ze všech naměřených hodnot v časovém intervalu vypočten průměr a rozmezí, ve kterém se okolo něj naměřené hodnoty vyskytují.



Obrázek 7.14 Průběh  $I_D$  v čase při ohýbání nosníku délky  $200 \mu\text{m}$  o  $70 \mu\text{m}$

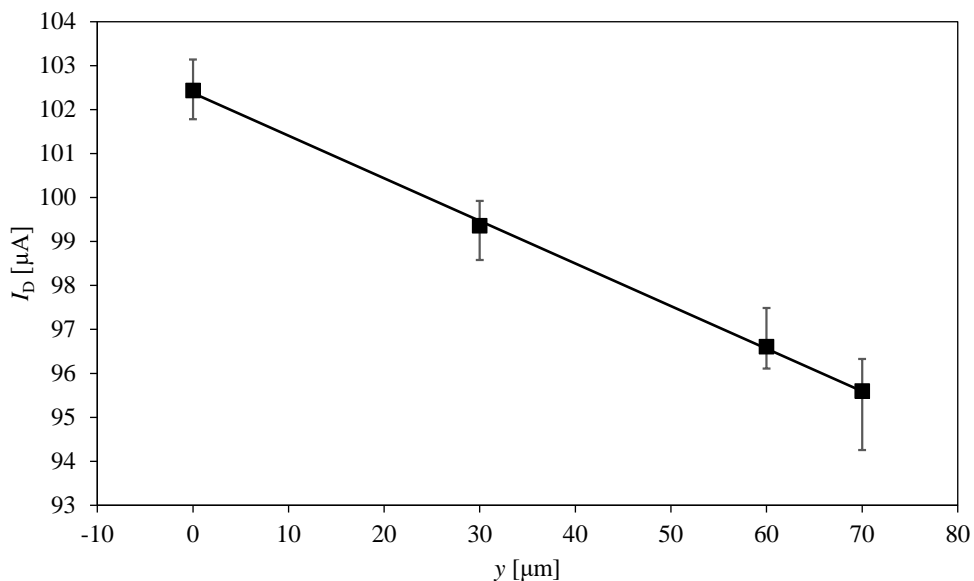


Obrázek 7.15 Průběh  $I_D$  v čase při různých mírách ohybu nosníku délky  $200 \mu\text{m}$

Poslední měření sloužilo k určení posuvu Diracova bodu. Při ohybu směrem dolů dochází k jeho posunu na nižší napětí  $U_{GS}$  (viz obr. 7.17). To znamená, že se snižuje koncentrace dotovaných nosičů. V tomto případě dochází ke snižování koncentrace dotovaných děr. Ohýbáním směrem dolů roztahujeme kanál z grafenu. Díky tomu dochází ke změnám vzdáleností mezi částicemi v krystalové mřížce a dochází ke vzniku polarizace. Čím větší je míra ohybu, tím větší je také velikost polarizace, která je příčinou



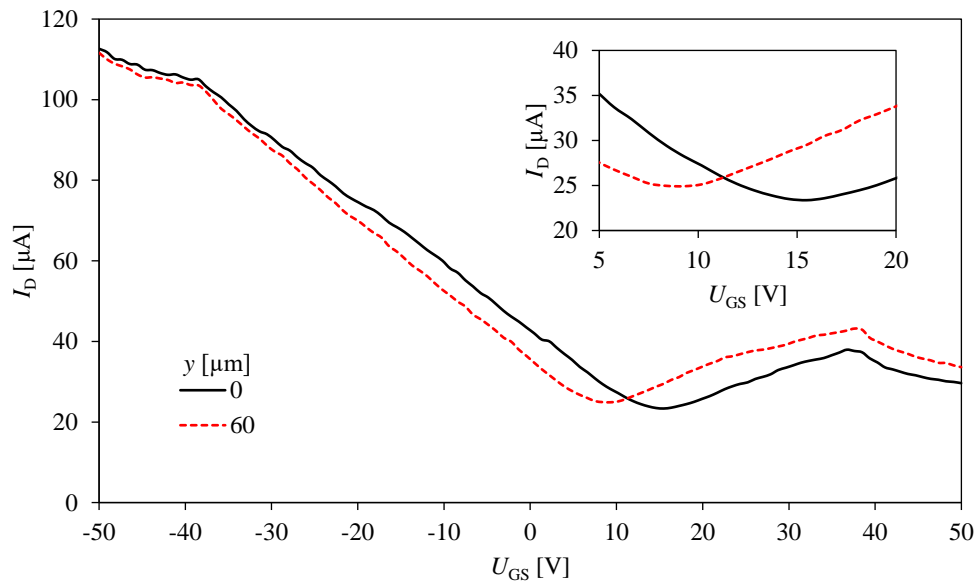
vzniku elektrického pole v kanálu. Aby došlo ke kompenzaci tohoto elektrického pole, akumulují se v grafenu nosiče, v našem případě elektrony. [78] Tyto elektrony rekombinují s děrami a snižují tak jejich množství a tím i koncentraci dopantu. Snižováním jeho koncentrace dojde k posunu Diracova bodu k nižším hodnotám  $U_{GS}$ . Podle rovnice (6.3) můžeme určit koncentrace nosičů před a po ohybu. Před ohybem se Diracův bod nacházel na  $U_{GS} = 15,5$  V, což odpovídá koncentraci dotovaných nosičů  $n \approx 3,72 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ . Po ohybu nosníku délky  $300 \mu\text{m}$  o  $60 \mu\text{m}$  směrem dolů na jeho konci došlo k posunu Diracova bodu na  $U_{GS} = 9$  V. Tato hodnota odpovídá koncentraci dotace  $n \approx 2,16 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ , což je pokles o 42 % proti koncentraci dotace před ohybem. Kdyby byl grafen dokonale bezvadný a neobsahoval žádné adsorbované částice (Diracův bod v  $U_{GS} = 0$  V), mohli bychom v něm ohybem měnit typ dotace. Při ohybu směrem dolů (roztahování kanálu) by docházelo k posunu Diracova bodu do záporných hodnot, což značí dotaci typu N. Při ohybu směrem nahoru (smršťování kanálu) by byla situace přesně opačná. Vektor polarizace by měl opačný směr. Pro kompenzaci vzniklého elektrického pole se budou v grafenu akumulovat nosiče opačné polarity než při ohybu směrem dolů. Diracův bod by se posunul v tomto případě do kladných  $U_{GS}$  – dotace typu P.



Obrázek 7.16 Závislost  $I_D$  na ohybu při  $U_{GS} = 0$  V a  $U_{DS} = 1$  V, body představují průměr ze všech naměřených hodnot pro danou velikost ohybu, chybové úsečky udávají rozptyl těchto hodnot od průměru

Při porovnání poloh Diracova bodu námi měřené MEMS s čipem GRAPHENEA (viz kapitola 7.2) dostáváme rozdíl  $\Delta U_{GS} = 22,5$  V ( $U_{GS} = 38$  V pro komerčně vyráběný čip,  $U_{GS} = 15,5$  V pro MEMS). Kanál komerčně vyráběného čipu tedy obsahuje přibližně  $2,5 \times$  větší množství dotovaných nosičů ( $n \approx 9,12 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ ) než měřená struktura MEMS ( $n \approx 3,72 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ ). Jedná se tedy o další významný faktor, který se podílí na nižších

hodnotách odporů na čtverec u struktur MEMS měřených v kapitole 7.1. Snížení koncentrace dotace je dáno menšími rozměry kanálů a větší mírou jeho kontaminace v důsledku většího počtu litografických procesů. Tyto faktory snižují schopnost grafenu vázat okolní částice, které plní funkci akceptorů a zvyšují koncentraci dotovaných nosičů.



Obrázek 7.17 Závislost  $I_D$  na  $U_{GS}$  bez ohybu a s ohybem 60  $\mu m$ , nahoře je přiblížen posun Diracova bodu

## 8. ZÁVĚR

V rámci této semestrální práce byla provedena literární rešerše základních vlastností, metod syntézy, charakterizace a dopování grafenu. Praktická část se zabývala základními elektrickými vlastnostmi GFET, což je obdoba FET s kanálem tvořeným grafenem s několika významnými odlišnostmi.

Pro měření byly použity dva typy vzorků, jeden komerčně vyráběný firmou GRAPHENEA, druhý pro měření vlastností grafenu při ohybu s MEMS vyráběný v čistých prostorech CEITEC. Nejprve byly měřeny základní elektrické vlastnosti GFET, kdy bylo zjištěno, že se kanál z grafenu chová jako odpor při rozmítání napětí  $U_{DS}$  v rozmezí -1 V až 1 V a konstantním napětí  $U_{GS}$ . Změnou  $U_{GS}$  jsme schopni řídit vodivost kanálu, podobně jako u klasického FET tranzistoru. Rozdílem je, že GFET vede díky svému unikátnímu uspořádání energetických pásů elektrický proud i při nulovém napětí  $U_{GS}$ . Hodnoty odporů na čtverec kanálů jednotlivých struktur jsou obecně vyšší pro vzorek s MEMS. Je to způsobeno větším množstvím litografických procesů, kterými musí tento čip díky své unikátní struktuře při výrobě projít. Při každém z těchto výrobních kroků může dojít ke kontaminaci kanálu, a tím ke zvýšení koncentrace nečistot a poruch. Proto jsou hodnoty odporů na čtverec jednotlivých MEMS rozprostřeny v určitém intervalu. Tvary charakteristik se ovšem výrazně neliší, a proto jsou tyto struktury dostačující pro zkoumání vlastností grafenu jako takového.

Dále byla určena poloha Diracova bodu u komerčně vyráběného vzorku. K tomu bylo zapotřebí vzorek vyžítat, abychom se zbavili adsorbované vlhkosti, která ovlivňovala vodivost kanálu v okolí Diracova bodu tak, že jej z naměřených závislostí nebylo možné jednoznačně lokalizovat. Žihání probíhalo v intervalu od 10 minut do 50 minut. Diracův bod byl z charakteristiky závislosti  $I_D$  na  $U_{GS}$  zřetelný již po prvotním deseti minutovém žihání jako místo s nejnižší vodivostí. Nachází se na  $U_{GS} = 38$  V, což odpovídá dotaci typu P koncentrací  $n \approx 9,12 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ . Při dalším zvyšování délky žihacího procesu docházelo ke zvyšování vodivosti kanálu. Je to zapříčiněno zvyšováním pohyblivosti nosičů, protože s rostoucím časem žihání ubývá vlhkosti na povrchu a poruch, které pohyblivost nosičů snižují. Od doby žihání 40 minut se vodivost kanálu dále zvyšovala jen velmi málo. Proto je tato doba dostačující ke spolehlivému vyžítání vzorku a není třeba jej žihat déle.

Pro zkoumání vlastností grafenu v závislosti na jeho ohybu bylo využito MEMS s ohebnými nosíky, na kterých je umístěna část grafenového kanálu. Při ohýbání směrem dolů dochází ke snižování procházejícího proudu  $I_D$ . Naměřená charakteristika jeho závislosti na míře ohybu je lineární. Za snížení vodivosti při konstantním napětí  $U_{GS}$  stojí posun Diracova bodu. Při ohybu dolů se posouvá k nižším hodnotám  $U_{GS}$ , což značí, že se snižuje koncentrace dotovaných nosičů, v našem případě děr. V grafenu dochází při ohybu k vychylování částic krystalové mříže z rovnovážných poloh a tím ke vzniku polarizace. V kanálu se indukuje elektrické pole, které je kompenzováno akumulací

nosičů opačného náboje. Při ohybu směrem dolů dochází v grafenu k akumulaci elektronů, které rekombinují s dotovanými děrami a snižují tak jejich koncentraci, která se projeví jako posun Diracova bodu a s tím souvisejícím snížením vodivosti při  $U_{GS} = 0$  V. Ohybem nosníku dolů o 60  $\mu\text{m}$  došlo k posunu Diracova bodu z  $U_{GS} = 15,5$  V na  $U_{GS} = 9$  V. To odpovídá snížení koncentrace dotovaných nosičů o 42 %, z  $n \approx 3,72 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$  na  $n \approx 2,16 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ . Tímto experimentem bylo dokázáno, že jsme ohybem kanálu z grafenu schopni měnit typ dotace a její koncentraci.

Z naměřených závislostí a charakteristik vyplývá, že tranzistory typu GFET nejsou vhodné pro využití v klasických mikroelektronických aplikacích, protože kanálem při nenulovém napětí  $U_{DS}$  protéká proud nevhodně na velikost napětí na hradle. Naopak velkou výhodou těchto struktur je řízení vodivosti kanálu vnějšími vlivy. Grafen velmi dobře reaguje s částicemi v jeho blízkém okolí a na základě interakcí s nimi mění své elektrické vlastnosti. V našich měřeních se jednalo o interakce se vzdušnou vlhkostí, která způsobovala dotaci kanálu děrami. Dalším ze zdrojů dotace je mechanické namáhání, v našem případě výše zmíněný ohyb, kterým jsme schopni přesně řídit typ dotace a koncentraci nosičů. Díky těmto unikátním vlastnostem jsou GFET vhodné pro použití v senzorických aplikacích.

## LITERATURA

- [1] Graphene: structure and shape. Graphene-info [online]. [cit. 2020-12-14]. Dostupné z: <https://www.graphene-info.com/graphene-structure-and-shape>
- [2] DREYER, Daniel, Rodney RUOFF a Christopher BIELAWSKI. From Conception to Realization: An Historical Account of Graphene and Some Perspectives for Its Future. *Angewandte Chemie International Edition* [online]. 2010, 49(49), 9336-9344 [cit. 2020-12-04]. ISSN 14337851. Dostupné z: doi:10.1002/anie.201003024
- [3] The History of Graphene. [Http://www.cealtech.com/](http://www.cealtech.com/) [online]. Stavanger: CEALTECH [cit. 2020-12-04]. Dostupné z: <http://www.cealtech.com/2017/05/09/the-history-of-graphene/>
- [4] WANG, Xinran a Yi SHI. CHAPTER 1. Fabrication Techniques of Graphene Nanostructures. ZHANG, Gang a Navin MANJOORAN, ed., Gang ZHANG, Navin MANJOORAN. *Nanofabrication and its Application in Renewable Energy* [online]. Cambridge: Royal Society of Chemistry, 2014, s. 1-30 [cit. 2020-12-04]. Nanoscience & Nanotechnology Series. ISBN 978-1-84973-640-4. Dostupné z: doi:10.1039/9781782623380-00001
- [5] SPRINKLE, Mike. Boehm's 1961 isolation of graphene. *Graphene Times* [online]. **2009** [cit. 2020-12-04]. Dostupné z: <https://web.archive.org/web/20101008144828/http://graphenetimes.com/2009/12/boehms-1961-isolation-of-graphene/>
- [6] MERTENS, Ron. Graphene: history, controversy and the Nobel prize. *Graphene-info* [online]. 2004 [cit. 2020-12-04]. Dostupné z: <https://www.graphene-info.com/graphene-history-controversy-and-nobel-prize>
- [7] TIWARI, Ravikumar.K. a Rakshit RANGARR. *Graphene Review: A Future for Electronics Applications* [online]. Nagpur, 2013 [cit. 2020-12-04]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/274075782\\_Graphene\\_Review\\_A\\_Future\\_for\\_Electronics\\_Applications](https://www.researchgate.net/publication/274075782_Graphene_Review_A_Future_for_Electronics_Applications). G.H.Raisoni College of Engineering.
- [8] YE, Shuangli, Honghua HUANG, Cailei YUAN, Feng LIU, Min ZHAI, Xinzhi SHI, Chang QI a Gaofeng WANG. Thickness-Dependent Strain Effect on the Deformation of the Graphene-Encapsulated Au Nanoparticles. *Journal of Nanomaterials* [online]. 2014, **2014**, 1-6 [cit. 2020-12-04]. ISSN 1687-4110. Dostupné z: doi:10.1155/2014/989672
- [9] RUDRAPATI, Ramesh. *Graphene: Fabrication Methods, Properties, and Applications in Modern Industries*. AMEEN, Sadia, M. SHAHEER

- AKHTAR a Hyung-Shik SHIN, ed., Sadia AMEEN, M. SHAHEER  
AKHTAR, Hyung-Shik SHIN. Graphene Production and Application  
[online]. IntechOpen, 2020 [cit. 2020-12-04]. ISBN 978-1-83880-191-5.  
Dostupné z: doi:10.5772/intechopen.92258
- [10] YANG, Gao, Lihua LI, Wing LEE a Man NG. Structure of graphene and its disorders: a review. Science and Technology of Advanced Materials [online]. 2018, 19(1), 613-648 [cit. 2020-12-04]. ISSN 1468-6996. Dostupné z: doi:10.1080/14686996.2018.1494493
- [11] STEFANESCU, D., G. ALONSO, P. LARRAÑAGA, E. DE LA FUENTE a R. SUAREZ. A Comparative Study of Graphite Growth in Cast Iron and in Analogous Systems. International Journal of Metalcasting [online]. 2018, 12(4), 722-752 [cit. 2020-12-04]. ISSN 1939-5981. Dostupné z: doi:10.1007/s40962-017-0204-1
- [12] BERGER, Michael. Graphene Description. Nanowerk [online]. [cit. 2020-12-04]. Dostupné z: [https://www.nanowerk.com/what\\_is\\_graphene.php](https://www.nanowerk.com/what_is_graphene.php)
- [13] SREEPRASAD, T. a Vikas BERRY. How Do the Electrical Properties of Graphene Change with its Functionalization?. Small [online]. 2013, 9(3), 341-350 [cit. 2020-12-04]. ISSN 16136810. Dostupné z: doi:10.1002/sml.201202196
- [14] LEE, Xin, Billie HIEW, Kar LAI, Lai LEE, Suyin GAN, Suchithra THANGALAZHY-GOPAKUMAR a Sean RIGBY. Review on graphene and its derivatives: Synthesis methods and potential industrial implementation. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers [online]. 2019, 98, 163-180 [cit. 2020-12-04]. ISSN 18761070. Dostupné z: doi:10.1016/j.jtice.2018.10.028
- [15] DE LA FUENTE, Jesus. Properties Of Graphene. Graphenea [online]. [cit. 2020-12-04]. Dostupné z: [https://www.graphenea.com/pages/graphene-properties#.X8n\\_bNhKiHt](https://www.graphenea.com/pages/graphene-properties#.X8n_bNhKiHt)
- [16] Report On GRAPHENE: THE WORLD OF FUTURE. Education India & Abroad [online]. [cit. 2020-12-04]. Dostupné z: <http://eduindiaabroad.blogspot.com/2016/11/report-on-graphene-world-of-future.html>
- [17] The Spacecraft That Requires no Fuel: Graphene Photoelectric Solar Sails. In: MuonRay [online]. MuonRay Enterprises [cit. 2020-12-04]. Dostupné z: <http://muonray.blogspot.com/2016/06/>
- [18] An overview of graphene's properties. Graphene-info [online]. [cit. 2020-12-04]. Dostupné z: <https://www.graphene-info.com/graphene-properties>

- [19] PAPAGEORGIOU, Dimitrios, Ian KINLOCH a Robert YOUNG. Mechanical properties of graphene and graphene-based nanocomposites. *Progress in Materials Science* [online]. 2017, 90, 75-127 [cit. 2020-12-04]. ISSN 00796425. Dostupné z: doi:10.1016/j.pmatsci.2017.07.004
- [20] OVID'KO, Ilya. MECHANICAL PROPERTIES OF GRAPHENE [online]. St. Petersburg, 2013 [cit. 2020-12-04]. Dostupné z: [http://www-proxy.ipme.ru/e-journals/RAMS/no\\_13413/01\\_13413\\_ovidko.pdf](http://www-proxy.ipme.ru/e-journals/RAMS/no_13413/01_13413_ovidko.pdf). St. Petersburg State University.
- [21] ZURUTUZA, Amaia. Graphene & Graphite - How Do They Compare?. *Graphenea* [online]. [cit. 2020-12-04]. Dostupné z: <https://www.graphenea.com/pages/graphene-graphite#.X8oRDthKiHt>
- [22] LI, Qin-Yi, Kailun XIA, Ji ZHANG, Yingying ZHANG, Qunyang LI, Koji TAKAHASHI a Xing ZHANG. Measurement of specific heat and thermal conductivity of supported and suspended graphene by a comprehensive Raman optothermal method. *Nanoscale* [online]. 2017, 9(30), 10784-10793 [cit. 2020-12-04]. ISSN 2040-3364. Dostupné z: doi:10.1039/C7NR01695F
- [23] POP, Eric, Vikas VARSHNEY a Ajit ROY. Thermal properties of graphene: Fundamentals and applications. *MRS Bulletin* [online]. 2012, 37(12), 1273-1281 [cit. 2020-12-04]. ISSN 0883-7694. Dostupné z: doi:10.1557/mrs.2012.203
- [24] FARJADIAN, Fatemeh, Somayeh ABBASPOUR, Mohamad SADATLU et al. Recent Developments in Graphene and Graphene Oxide: Properties, Synthesis, and Modifications. *ChemistrySelect* [online]. 2020, 5(33), 10200-10219 [cit. 2020-12-04]. ISSN 2365-6549. Dostupné z: doi:10.1002/slct.202002501
- [25] RAHMAN, Mohammad, Moshiur RASHID, Mashrur ISLAM a Masum AKANDA. Electrical and Chemical Properties of Graphene over Composite Materials: A Technical Review [online]. [cit. 2020-12-04]. Dostupné z: <http://www.materialsciencejournal.org/vol16no2/electrical-and-chemical-properties-of-graphene-over-composite-materials-a-technical-review/>. Rajshahi University of Engineering & Technology.
- [26] XU, Zhiping. Fundamental Properties of Graphene. *Graphene* [online]. Elsevier, 2018, s. 73-102 [cit. 2020-12-04]. ISBN 9780128126516. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-812651-6.00004-5
- [27] POKLONSKI, Nikolai, Eugene KISLYAKOV, Sergey VYRKO, Oleg BUBEL' a Sergey RATKEVICH. Electronic band structure and magnetic states of zigzag graphene nanoribbons: quantum chemical calculations.

- Journal of Nanophotonics [online]. 2012, 6(1) [cit. 2020-12-04]. ISSN **1934-2608**. Dostupné z: doi:10.1117/1.JNP.6.061712
- [28] CRITCHLEY, Liam. What are the Optical Properties of Graphene?. AZoOptics [online]. [cit. 2020-12-04]. Dostupné z: <https://www.azooptics.com/Article.aspx?ArticleID=1537>
- [29] BHUYAN, Sajibul, Nizam UDDIN, Maksudul ISLAM, Ferdaushi BIPASHA a Sayed HOSSAIN. Synthesis of graphene. International Nano Letters [online]. 2016, 6(2), **65-83** [cit. 2020-12-04]. ISSN 2008-9295. Dostupné z: doi:10.1007/s40089-015-0176-1
- [30] SHAMS, S., Ruoyu ZHANG a Jin ZHU. Graphene synthesis: a Review. Materials Science-Poland [online]. 2015, 33(3), 566-578 [cit. 2020-12-04]. ISSN 2083-134X. Dostupné z: doi:10.1515/msp-2015-0079
- [31] Mechanical Exfoliation. Carbon Waters [online]. 2017 [cit. 2020-12-04]. Dostupné z: <https://www.carbon-waters.com/mechanical-exfoliation/>
- [32] YI, Min a Zhigang SHEN. A review on mechanical exfoliation for the scalable production of graphene. Journal of Materials Chemistry A [online]. 2015, 3(22), 11700-11715 [cit. 2020-12-04]. ISSN 2050-7488. Dostupné z: doi:10.1039/C5TA00252D
- [33] CH, Bhagya lakshmi. Graphene and derivatives – Synthesis techniques, properties and their energy applications. Energy. 2017, **140**, 766–778.
- [34] LEE, Jin-Ho, Soo-Jeong PARK a Jeong-Woo CHOI. Electrical Property of Graphene and Its Application to Electrochemical Biosensing. Nanomaterials (Basel, Switzerland). MDPI, 2019, 9(2), 297. ISSN 2079-4991. Dostupné z: doi:10.3390/nano9020297
- [35] CHOI, Wonbong, Indranil LAHIRI, Raghunandan SEELABOYINA a Yong KANG. Synthesis of Graphene and Its Applications: A Review. Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences [online]. 2010, 35(1), 52-71 [cit. 2020-12-04]. ISSN 1040-8436. Dostupné z: doi:10.1080/10408430903505036
- [36] DE SILVA, K.K.H., H.H. HUANG, R.K. JOSHI a M. YOSHIMURA. Chemical reduction of graphene oxide using green reductants. Carbon [online]. 2017, **119**, 190-199 [cit. 2020-12-04]. ISSN 00086223. Dostupné z: doi:10.1016/j.carbon.2017.04.025
- [37] CHUA, Chun a Martin PUMERA. Chemical reduction of graphene oxide: a synthetic chemistry viewpoint. Chem. Soc. Rev [online]. 2014, 43(1), 291-312 [cit. 2020-12-04]. ISSN 0306-0012. Dostupné z: doi:10.1039/C3CS60303B



- [38] LI, Xuesong, Luigi COLOMBO a Rodney RUOFF. Synthesis of Graphene Films on Copper Foils by Chemical Vapor Deposition. *Advanced Materials* [online]. 2016, 28(29), 6247-6252 [cit. 2020-12-04]. ISSN 09359648. Dostupné z: doi:10.1002/adma.201504760
- [39] BOLZA, Miklos. What are graphene field effect transistors (GFETs). *Graphenea* [online]. [cit. 2020-12-04]. Dostupné z: <https://www.graphenea.com/pages/what-are-graphene-field-effect-transistors-gfets>
- [40] CUNNINGHAM, Bridget. Synthesizing Graphene with Chemical Vapor Deposition. *COMSOL* [online]. [cit. 2020-12-04]. Dostupné z: <https://www.comsol.com/blogs/synthesizing-graphene-chemical-vapor-deposition/>
- [41] PINTO, Hugo a Alexander MARKEVICH. Electronic and electrochemical doping of graphene by surface adsorbates. *Beilstein journal of nanotechnology*. Beilstein-Institut, 2014, **5**, 1842-1848. ISSN 2190-4286. Dostupné z: doi:10.3762/bjnano.5.195
- [42] LEE, Hoik, Keewook PAENG a Ick KIM. A review of doping modulation in graphene. *Synthetic Metals* [online]. 2018, 244, **36-47** [cit. 2020-12-04]. ISSN 03796779. Dostupné z: doi:10.1016/j.synthmet.2018.07.001
- [43] MISSEEUW, Lara, Aleksandra KRAJEWSKA, Iwona PASTERNAK et al. Optical-quality controllable wet-chemical doping of graphene through a uniform, transparent and low-roughness F4-TCNQ/MEK layer. *RSC Advances* [online]. 2016, **6**(106), 104491-104501 [cit. 2020-12-04]. ISSN 2046-2069. Dostupné z: doi:10.1039/C6RA24057G
- [44] GUO, Beidou, Liang FANG, Baohong ZHANG a Jian GONG. Graphene Doping: A Review. *Insciences Journal* [online]. 2011, , 80-89 [cit. 2020-12-04]. ISSN 1664171X. Dostupné z: doi:10.5640/insc.010280
- [45] BORIN BARIN, Gabriela, Yi SONG, Iara DE FÁTIMA GIMENEZ, Antonio SOUZA FILHO, Ledjane BARRETO a Jing KONG. Optimized graphene transfer: Influence of polymethylmethacrylate (PMMA) layer concentration and baking time on graphene final performance. *Carbon* [online]. 2015, 84, 82-90 [cit. 2020-12-04]. ISSN 00086223. Dostupné z: doi:10.1016/j.carbon.2014.11.040
- [46] SABKI, Syarifah, Shafiq SHAMSURI, Siti FAUZI, Meghashama CHON-KI, Noraini OTHMAN a Mohamad WAHID. Graphene transfer process and optimization of graphene coverage. *EPJ Web of Conferences* [online]. 2017, 162 [cit. 2020-12-04]. ISSN 2100-014X. Dostupné z: doi:10.1051/epjconf/201716201049

- [47] VAN NGOC, Huynh, Yongteng QIAN, Suk HAN a Dae KANG. PMMA-Etching-Free Transfer of Wafer-scale Chemical Vapor Deposition Two-dimensional Atomic Crystal by a Water Soluble Polyvinyl Alcohol Polymer Method. *Scientific Reports* [online]. 2016, **6**(1) [cit. 2020-12-04]. ISSN 2045-2322. Dostupné z: doi:10.1038/srep33096
- [48] SINGH, YADUNATH. ELECTRICAL RESISTIVITY MEASUREMENTS: A REVIEW. *International Journal of Modern Physics: Conference Series* [online]. 2013, **22**, 745-756 [cit. 2020-12-04]. ISSN 2010-1945. Dostupné z: doi:10.1142/S2010194513010970
- [49] Sheet Resistance: A Guide to Theory. Ossila [online]. [cit. 2020-12-04]. Dostupné z: <https://www.ossila.com/pages/sheet-resistance-theory>
- [50] Van Der Pauw Method For Resistivity & Hall Mobility. The Pennsylvania State University [online]. [cit. 2020-12-04]. Dostupné z: <https://www.mri.psu.edu/materials-characterization-lab/characterization-techniques/electrical-characterization/van-der-pauw>
- [51] Making van der Pauw Resistivity and Hall Voltage Measurements Using the 4200A-SCS Parameter Analyzer. Tektronix [online]. [cit. 2020-12-04]. Dostupné z: <https://www.tek.com/document/application-note/van-der-pauw-and-hall-voltage-measurements-4200a-scs-parameter-analyzer>
- [52] ROSTRON, Paul a Dina GERBER. Raman Spectroscopy, a review. *International Journal of Engineering and Technical Research*. 2016, **6**, 50-64.
- [53] JOSE CHIRAYIL, Cintil, Jiji ABRAHAM, Raghvendra KUMAR MISHRA, Soney GEORGE a Sabu THOMAS. Instrumental Techniques for the Characterization of Nanoparticles. *Thermal and Rheological Measurement Techniques for Nanomaterials Characterization* [online]. Elsevier, 2017, s. 1-36 [cit. 2020-12-04]. ISBN 9780323461399. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-323-46139-9.00001-3
- [54] HOLBROOK, R., Anne GALYEAN, Justin GORHAM, Andrew HERZING a John PETTIBONE. Overview of Nanomaterial Characterization and Metrology. *Characterization of Nanomaterials in Complex Environmental and Biological Media* [online]. Elsevier, 2015, s. 47-87 [cit. 2020-12-04]. *Frontiers of Nanoscience*. ISBN 9780080999487. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-08-099948-7.00002-6
- [55] MOURA, Catarina, Rahul TARE, Richard OREFFO a Sumeet MAHAJAN. Raman spectroscopy and coherent anti-Stokes Raman scattering imaging: prospective tools for monitoring skeletal cells and skeletal regeneration. *Journal of The Royal Society Interface* [online]. 2016, **13**(118) [cit. 2020-12-04]. ISSN 1742-5689. Dostupné z: doi:10.1098/rsif.2016.0182

- [56] Raman spectrophotometer. Hamatsu Photonics [online]. [cit. 2020-12-04]. Dostupné z: <https://www.hamamatsu.com/jp/en/applications/raman-spectrophotometer/index.html>
- [57] CHO, Young a Sung AHN. Fabricating a Raman spectrometer using an optical pickup unit and pulsed power. *Scientific Reports* [online]. 2020, 10(1) [cit. 2020-12-13]. ISSN 2045-2322. Dostupné z: doi:10.1038/s41598-020-68650-7
- [58] VEERAPANDIAN, Murugan a Kyusik YUN. Study of Atomic Force Microscopy in Pharmaceutical and Biopharmaceutical Interactions - A Mini Review. *Current Pharmaceutical Analysis* [online]. 2009, 5(3), 256-268 [cit. 2020-12-04]. ISSN 15734129. Dostupné z: doi:10.2174/157341209788922020
- [59] SINHA RAY, Suprakas. Techniques for characterizing the structure and properties of polymer nanocomposites. *Environmentally Friendly Polymer Nanocomposites* [online]. Elsevier, 2013, s. 74-88 [cit. 2020-12-04]. ISBN 9780857097774. Dostupné z: doi:10.1533/9780857097828.1.74
- [60] ASMATULU, Ramazan a Waseem KHAN. Characterization of electrospun nanofibers. *Synthesis and Applications of Electrospun Nanofibers* [online]. Elsevier, 2019, s. 257-281 [cit. 2020-12-04]. ISBN 9780128139141. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-813914-1.00013-4
- [61] FREDERIX, Patrick a Matthew LINFORD. Surface Analysis by Atomic Force Microscopy (AFM): Its Various Modes, Capabilities, and Comparison to and Integration with other Techniques: Its Various Modes, Capabilities, and Comparison to and Integration with other Techniques. *Vacuum Technology & Coating*. 2017.
- [62] BRADLEY, Michael. FTIR Basics. Thermo Fisher Scientific [online]. [cit. 2020-12-04]. Dostupné z: <https://www.thermofisher.com/cz/en/home/industrial/spectroscopy-elemental-isotope-analysis/spectroscopy-elemental-isotope-analysis-learning-center/molecular-spectroscopy-information/ftir-information/ftir-basics.html>
- [63] MATHIAS, Jennifer. How Does FTIR Work?. Innovatech [online]. [cit. 2020-12-04]. Dostupné z: <https://www.innovatechlabs.com/newsroom/672/stuff-works-ftir-analysis/>
- [64] CLAYBORNE, Andre a Vernon MORRIS. Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR): How a Fourier Transform Infrared Spectrometer Works. CHEM 174 Physical Chemistry Laboratory II [online]. Howard University, 2017 [cit. 2020-12-04]. Dostupné z: [https://chem.libretexts.org/Courses/Howard\\_University/Howard%3A\\_Physic](https://chem.libretexts.org/Courses/Howard_University/Howard%3A_Physic)

al\_Chemistry\_Laboratory/14.\_Fourier\_Transform\_Infrared\_Spectroscopy\_(FTIR)#title

- [65] MATHER, R.R. Surface modification of textiles by plasma treatments. Surface Modification of Textiles [online]. Elsevier, 2009, s. 296-317 [cit. 2020-12-04]. ISBN 9781845694197. Dostupné z: doi:10.1533/9781845696689.296
- [66] BAER, D.R. a S. THEVUTHASAN. Characterization of Thin Films and Coatings. Handbook of Deposition Technologies for Films and Coatings [online]. Elsevier, 2010, s. 749-864 [cit. 2020-12-04]. ISBN 9780815520313. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-8155-2031-3.00016-8
- [67] BOULTON, A.J. a A. MCKILLOP. Structure of Six-membered Rings. Comprehensive Heterocyclic Chemistry [online]. Elsevier, 1984, s. 1-27 [cit. 2020-12-04]. ISBN 9780080965192. Dostupné z: doi:10.1016/B978-008096519-2.00023-0
- [68] GUY, Owen a Kelly-Ann WALKER. Graphene Functionalization for Biosensor Applications. Silicon Carbide Biotechnology [online]. Elsevier, 2016, s. 85-141 [cit. 2020-12-04]. ISBN 9780128029930. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-802993-0.00004-6
- [69] LU, Nianduan, Lingfei WANG, Ling LI a Ming LIU. A review for compact model of graphene field-effect transistors. Chinese Physics B. IOP Publishing, 2017, 26(3), 036804. ISSN 1674-1056. Dostupné z: doi:10.1088/1674-1056/26/3/036804
- [70] KINGATUA, Amos. What Is a Graphene Field Effect Transistor (GFET)? Construction, Benefits, and Challenges. All About Circuits [online]. [cit. 2020-12-04]. Dostupné z: <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/graphene-field-effect-transistor-gfet-construction-benefits-challenges/>
- [71] GFET-S10 for Sensing applications. Graphenea [online]. [cit. 2020-12-14]. Dostupné z: <https://www.graphenea.com/products/gfet-s10-for-sensing-applications-10-mm-x-10-mm>
- [72] PROCHÁZKA, Pavel. Příprava grafenu a výzkum jeho fyzikálních vlastností [online]. Brno, 2018 [cit. 2021-05-21]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/106708>. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [73] Model 4200A-SCSPParameter Analyzer. Tektronix [online katalogový list]. [cit. 2020-12-14]. Dostupné z: file:///C:/Users/Uzivatel/AppData/Local/Temp/4200A-900-01B\_User\_Manual\_Feb2017.pdf

- [74] Keithley 4200A-SCS Parameter Analyzer. Tektronix [online]. [cit. 2020-12-14]. Dostupné z: <https://sg.tek.com/keithley-4200a-scs-parameter-analyzer?zct=US>
- [75] GFET-S10 for Sensing applications. ULTRANANOTECH [online]. [cit. 2020-12-14]. Dostupné z: <https://ultrananotec.com/product/gfet-s10-for-sensing-applications/>
- [76] Graphene Field-Effect Transistor Chip: GFET-S10: Measurement Protocols and Handling Instructions. Graphenea [online]. [cit. 2020-12-14]. Dostupné z: [https://cdn.shopify.com/s/files/1/0191/2296/files/2020\\_Measurement\\_Protocols\\_GFET-S10.pdf?v=1607012633](https://cdn.shopify.com/s/files/1/0191/2296/files/2020_Measurement_Protocols_GFET-S10.pdf?v=1607012633)
- [77] MELIOS, C., C.E. GIUSCA, V. PANCHAL a O. KAZAKOVA. Water on graphene: review of recent progress. *2D Materials* [online]. 2018, 5(2) [cit. 2021-06-02]. ISSN 2053-1583. Dostupné z: doi:10.1088/2053-1583/aa9ea9
- [78] HU, Guangliang, Jingying WU, Chunrui MA, Zhongshuai LIANG, Weihua LIU, Ming LIU, Judy WU a Chun-Lin JIA. Controlling the Dirac point voltage of graphene by mechanically bending the ferroelectric gate of a graphene field effect transistor. *Materials Horizons* [online]. 2019, 6(2), 302-310 [cit. 2021-05-30]. ISSN 2051-6347. Dostupné z: doi:10.1039/C8MH01499J

# SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky:

FEKT	Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
VUT	Vysoké učení technické v Brně
TEM	Transmisní elektronová mikroskopie
XRD	Rentgenová difrakce
AFM	Mikroskopie atomárních sil
GO	Oxid grafenu
HOPG	Vysoce uspořádaný pyrolytický grafen
LPE	Exfoliace v kapalně fázi
GO	Oxid grafenu
CVD	Chemická depozice z plynné fáze
LPCVD	Chemická depozice z plynné fáze za nízkého tlaku
APCVD	Chemická depozice z plynné fáze při atmosférickém tlaku
HOMO	Nejvyšší obsazená molekulová hladina
LUMO	Nejnižší neobsazená molekulová hladina
FET	Unipolární tranzistor
PMMA	Polymethylmetakrylát
SERS	Povrchem zesílená Ramanova spektroskopie
NSOM	Skenovací optická mikroskopie v blízkém poli
AFM	Mikroskopie atomárních sil
FTIR	Infračervená spektroskopie s Fourierovou transformací
XPS	Rentgenová fotoelektronová spektroskopie
GFET	Unipolární tranzistor s kanálem z grafenu
DC	Stejnoseměrný proud
PST	Přenos s podpůrnou vrstvou polymeru
VA	Volt-ampérová
MEMS	Mikroelektromechanický systém

Symbols:

$\vec{a}_{1,2}$	základní mřížkové vektory	[m]
$a$	mřížková konstanta	[m]
$a_0$	vzdálenost mezi sousedními atomy uhlíku	[m]
$\vec{\delta}_{1,2,3}$	polohové vektory atomu A vzhledem k atomu B	[m]
$\vec{b}_{1,2}$	základní mřížkové vektory reciproké mřížky	[m]
$C$	tepelná kapacita	[J·K <sup>-1</sup> ]
$W$	hustota energie	[J]
$T$	absolutní teplota	[K]
$R_T$	tepelný odpor	[K·W <sup>-1</sup> ]
$V$	objem	[m <sup>3</sup> ]
$C_p$	teplo uložené ve formě fononů	[J·K <sup>-1</sup> ]
$C_e$	teplo uložené ve formě volných elektronů	[J·K <sup>-1</sup> ]
$q$	hustota tepelného toku	[W·m <sup>-2</sup> ]
$\kappa$	tepelná vodivost	[W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]
$R$	odpor	[Ω]
$\rho$	rezistivita	[Ω·m]
$h$	tloušťka	[m]
$U$	napětí	[V]
$I$	proud	[A]
$\gamma$	konduktivita	[S·m <sup>-1</sup> ]
$f_{A,B}$	geometrické korekční faktory	[-]
$f$	frekvence	[Hz]
$x$	pozice zrcadla	[m]
$w$	šířka	[m]
$l$	délka	[m]
$R_{\square}$	odpor na čtverec	[Ω·□ <sup>-1</sup> ]
$y$	velikost ohybu	[m]
$Q$	náboj	[C]
$\epsilon_0$	permitivita vakua	[Fm <sup>-1</sup> ]
$\epsilon_r$	relativní permitivita	[-]
$n$	koncentrace nosičů	[m <sup>-2</sup> ]
$N$	počet nosičů	[-]
$e$	elementární náboj	[C]
$\mu$	pohyblivost nosičů	[m <sup>2</sup> ·V <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup> ]

## Příloha A - Naměřené hodnoty

### A.1 Tabulka naměřených a vypočtených hodnot

Čip	Nosník [ $\mu\text{m}$ ]	Struktura	L [ $\mu\text{m}$ ]	R [ $\Omega$ ]	G [mS]	$R_{\square}$ [ $\text{k}\Omega \cdot \square^{-1}$ ]	$\rho$ [ $\Omega \cdot \mu\text{m}$ ]	$\gamma$ [ $\text{S} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ ]
H11	200	D2	2	3833	0,26	19,17	6,42	0,16
		D3	3	3219	0,31	10,73	3,59	0,28
		D4	4	3263	0,31	8,16	2,73	0,37
		D5	5	3202	0,31	6,40	2,15	0,47
		D6	6	4441	0,23	7,40	2,48	0,40
		D8	8	3798	0,26	4,75	1,59	0,63
		D10	10	3293	0,30	3,29	1,10	0,91
	300	D2	2	4739	0,21	23,70	7,94	0,13
		D3	3	3890	0,26	12,97	4,34	0,23
	J12	100	D9	9	41760	0,02	46,40	15,54
300		D6	6	13132	0,08	21,89	7,33	0,14
K13	100	D3	3	4260	0,23	14,20	4,76	0,21
		D7	7	13451	0,07	19,22	6,44	0,16
		D9	9	12189	0,08	13,54	4,54	0,22
		D10	10	5187	0,19	5,19	1,74	0,58
	200	D3	3	3299	0,30	11,00	3,68	0,27
		D4	4	4119	0,24	10,30	3,45	0,29
		D5	5	5114	0,20	10,23	3,43	0,29
		D7	7	7787	0,13	11,12	3,73	0,27
		D8	8	3327	0,30	4,16	1,39	0,72
		D9	9	4002	0,25	4,45	1,49	0,67
		D10	10	5187	0,19	5,19	1,74	0,58
	300	D2	2	3196	0,31	15,98	5,35	0,19
		D3	3	2757	0,36	9,19	3,08	0,32
		D5	5	11989	0,08	23,98	8,03	0,12
		D6	6	12850	0,08	21,42	7,17	0,14
		D7	7	3287	0,30	4,70	1,57	0,64
		D9	9	3377	0,30	3,75	1,26	0,80
		D10	10	5181	0,19	5,18	1,74	0,58
	400	D2	2	2475	0,40	12,37	4,14	0,24
		D3	3	1969	0,51	6,56	2,20	0,45
		D5	5	5563	0,18	11,13	3,73	0,27
		D6	6	2620	0,38	4,37	1,46	0,68
		D7	7	3219	0,31	4,60	1,54	0,65
D8		8	2938	0,34	3,67	1,23	0,81	
D9		9	3017	0,33	3,35	1,12	0,89	
D10		10	5181	0,19	5,18	1,74	0,58	



