

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Využití uhlíkových nanostruktur v elektronických součástkách

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Martin KOPA**
Osobní číslo: **E13B0322P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Název tématu: **Využití uhlíkových nanostruktur v elektronických součástkách**
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Prostudujte a popište uhlíkové nanostruktury.
2. Vyhledejte a uveďte elektronické součástky založené na uhlíkových nanostrukturách.
3. Diskutujte přínos (výhody a nevýhody) elektronických součástek na bázi nanostruktur v porovnání s konvenčními polovodičovými součástkami.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Rozsah kvalifikační práce: **30 - 40 stran**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:


1. **A. Javey, J. Kong Carbon Nanotube Electronics (2009).**
2. **A. Hazeghi - Carbon Nanotube Electronics (2011).**
3. **Elektronické informační zdroje.**

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jiří Štulík**
Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2015**
Termín odevzdání bakalářské práce: **2. června 2016**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2015

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na uhlíkové nanostrukтуры v elektronických součástkách. V úvodu tato práce obsahuje krátké popsání základů nanotechnologie a samotného uhlíku jako prvku. Dále se zabývá uhlíkovými alotropy, a to speciálně grafenem a uhlíkovými nanotrubicemi. Na téma uhlíkových alotropů navazuje popis součástek z nich vyrobených, a to diod a tranzistorů. Na závěr práce obsahuje porovnání a zhodnocení výhod a nevýhod elektronických součástek na bázi uhlíkových nanostruktur s konvenčními součástkami.

Klíčová slova

Nanotechnologie, grafen, uhlíkové nanotrubice, dioda, tranzistor.

Abstract

The bachelor thesis is focused on carbon nanostructures in electronic components. The nanotechnology and carbon element structure is brief described at the introduction of the thesis. Next part deals with carbon allotropes especially graphene and carbon nanotubes. Nanostructures are followed by description of the active components such as diodes and transistors based on these materials. Comparison and evaluation of the advantages and disadvantages of carbon nanostructure electronic components with conventional components is summarized in the conclusion.


Key words

Nanotechnology, graphene, carbon nanotubes, diodes, transistors.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.



.....

podpis

V Plzni dne 31. 5. 2016

Martin Kopa

Poděkování

Nejvíce bych chtěl poděkovat své rodině, která i přesto, že jsem jí k tomu dal značné důvody, ve mě nepřestala věřit a vždy stála neochvějně za mnou. Nebýt jí, neměl bych šanci dostat se až do této chvíle, která mi může umožnit jí tento dluh alespoň menší mírou splatit. Moc Vám za vše děkuji a snad budu schopen Vám ukázat, že Vaše úsilí nevyšlo nadarmo.

Neméně bych chtěl poděkovat svému vedoucímu práce panu Ing. Jiřímu Štulíkovi za jeho věcné rady a připomínky. Hlavně za pomoc ve chvílích, kdy byl sám indisponován, a přesto si našel čas, aby mi pomohl zodpovědět všechny otázky.

Obsah

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	1
ÚVOD.....	3
1 ZÁKLADY NANOTECHNOLOGIE.....	4
1.1 SAMOTNÝ POJEM NANOTECHNOLOGIE.....	5
1.2 UHLÍKOVÉ NANOSTRUKTURY	6
2 UHLÍK A JEHO ALOTROPY	7
2.1 VLASTNOSTI UHLÍKU	7
2.2 TEORIE HYBRIDIZACE.....	7
2.3 CHEMICKÁ REAKTIVITA UHLÍKU	9
2.4 IZOTOPY UHLÍKU	10
2.5 UHLÍKOVÉ ALOTROPY	10
2.6 UHLÍKOVÉ NANOTRUBICE	11
2.6.1 <i>Struktura uhlíkových nanotrubic</i>	<i>11</i>
2.6.2 <i>Vlastnosti uhlíkových nanotrubic</i>	<i>13</i>
2.6.3 <i>Využití uhlíkových nanotrubic</i>	<i>14</i>
2.7 GRAFEN	14
2.7.1 <i>Vlastnosti grafenu.....</i>	<i>15</i>
2.7.2 <i>Využití grafenu.....</i>	<i>19</i>
3 SOUČÁSTKY ZALOŽENÉ NA UHLÍKOVÝCH NANOSTRUKTURÁCH.....	20
3.1 SCHOTTKYHO DIODA NA BÁZI UHLÍKOVÝCH NANOTRUBIC.....	20
3.2 PLNĚ LADITELNÁ DIODA S JEDNOSTĚNNÝMI UHLÍKOVÝMI NANOTRUBICEMI	22
3.3 IDEÁLNÍ GRAFEN/KŘEMÍKOVÉ SCHOTTKYHO PŘECHODOVÉ DIODY	24
3.4 ORGANICKÝ TRANZISTOR ŘÍZENÝ POLEM.....	26
3.5 UHLÍKOVÝ NANOTRUBICOVÝ TRANZISTOR ŘÍZENÝ POLEM.....	28
3.5.1 <i>Uhlíkový nanotrubicový tranzistor řízený polem využívající back-gate geometrii</i>	<i>29</i>
3.5.2 <i>Uhlíkový nanotrubicový tranzistor řízený polem využívající top-gate geometrii...29</i>	<i>29</i>
3.6 GRAFENOVÝ TRANZISTOR ŘÍZENÝ POLEM	32
3.7 GRAFENOVÝ NANORIBBON TRANZISTOR	34
3.8 TENKOVSTVÝ TRANZISTOR	35
4 POROVNÁNÍ SOUČÁSTEK NA BÁZI UHLÍKOVÝCH NANOSTRUKTUR S KONVENČNÍMI SOUČÁSTKAMI.....	37
ZÁVĚR	39
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	40

Seznam symbolů a zkratek

Ω	ohm
A	ampér
C	uhlík
C	kapacita
cm	centimetr
Cu	měď
CNT	carbon nanotubes (uhlíkové nanotrubic)
CNT-SD	carbon nanotube Schottky diode (Schottkyho dioda na bázi uhlíkových nanotrubic)
CNT-FET	carbon nanotube field effect transistor (uhlíkový nanotrubicový tranzistor řízený polem)
DWCNT	double-walled carbon nanotubes (dvoustěnné uhlíkové nanotrubic)
dB	decibel
DC	direct current (stejnoseměrný proud)
DOS	density of states (hustota stavů)
E	energie
eV	elektronvolt
f	frekvence
F	farad
FET	field effect transistor (tranzistor řízený polem)
g	gram
GNR	graphene nanoribbons (grafenové nanopásky)
G-FET	graphene field effect transistor (grafenový tranzistor řízený polem)
Hz	hertz
I	proud
J	proudová hustota
K	kelvin
m	metr
mm	milimetr
MWCNT	multi-walled carbon nanotubes (vícestěnné uhlíkové nanotrubic)
nm	nanometr

OLED.....organic light-emitting diod (organické elektroluminiscenční diody)
OFETorganic field effect transistor (organický tranzistor řízený polem)
P výkon
Pa pascal
R..... odpor
s..... sekunda
SWCNTsingle-walled carbon nanotubes (jednotěnné uhlíkové nanotrubičky)
T..... teplota
TFTthin film transistor (tenkovrstvý tranzistor)
U..... napětí
V..... volt
W..... watt

Úvod

Tato práce pojednává o nových uhlíkových nanostrukturách a jejich využití v elektronických součástkách. Hlavním úkolem je zde popsat nové uhlíkové alotropy, které se ukazují jako výborné stavební prvky nejenom v elektronice, ale i v dalších výzkumných oborech. Tato práce je zaměřena oborově na využití těchto alotropů přesněji tedy grafenu a uhlíkových nanotrubic v elektronických součástkách. Největšího pokroku bylo zatím dosaženo u diod a tranzistorů.

Zájem o tento progres v elektronice je hlavně z toho důvodu, že dnešní konvenční součástky už jsou ve vývoji na svých limitech, a to jak výkonově, tak i velikostně. Velikostně z důvodu fyzikálních zákonů, které již nedovolují zmenšení velikosti na úkor jejich funkčnosti. Prozatímni vývoj nových elektronických součástek na bázi uhlíkových nanostruktur již ve svých počátcích ukazuje možnost překročit hranice dosavadních konvenčních součástek, a to nejenom v jejich velikosti, ale hlavně také v jejich výkonosti.

Tato práce se tedy zabývá základními pojmy o nanotechnologii a o samotném uhlíku jako prvku. Dále se speciálně zaměřuje na již zmíněné dva uhlíkové alotropy grafen a uhlíkové nanotrubic. Hlavní důraz je zde kladen na jejich stavbu, tepelné vlastnosti a zejména jejich elektrické vlastnosti. Následně v návaznosti na uhlíkové alotropy jsou zde popsány jednotlivé již zmíněné součástky diody a tranzistory, přesněji jejich stavba a vlastnosti. Tyto součástky jsou v této době stále v raném vývoji, tedy nejsou uvedeny do velkovýroby a jejich zapojení do obvodů je prozatím experimentální. Nakonec jsou zde tyto součástky popsány a porovnány jejich výhody a nevýhody oproti konvenčním součástkám.

1 Základy nanotechnologie

Nejznámějším a prvním průkopníkem oboru nanotechnologie byl Richard Phillips Feynman. V roce 1959 se v přednášce „There’s Plenty of Room at the Bottom“ v překladu „Tam dole je spousta místa“ ptal na otázku: „Proč ještě neumíme zapsat všech dvacet čtyři svazků Encyklopedie Britanniky na špendlíkovou hlavičku?“. R. P. Feynman tehdy nazýval tento obor mikrotechnologií. [1]

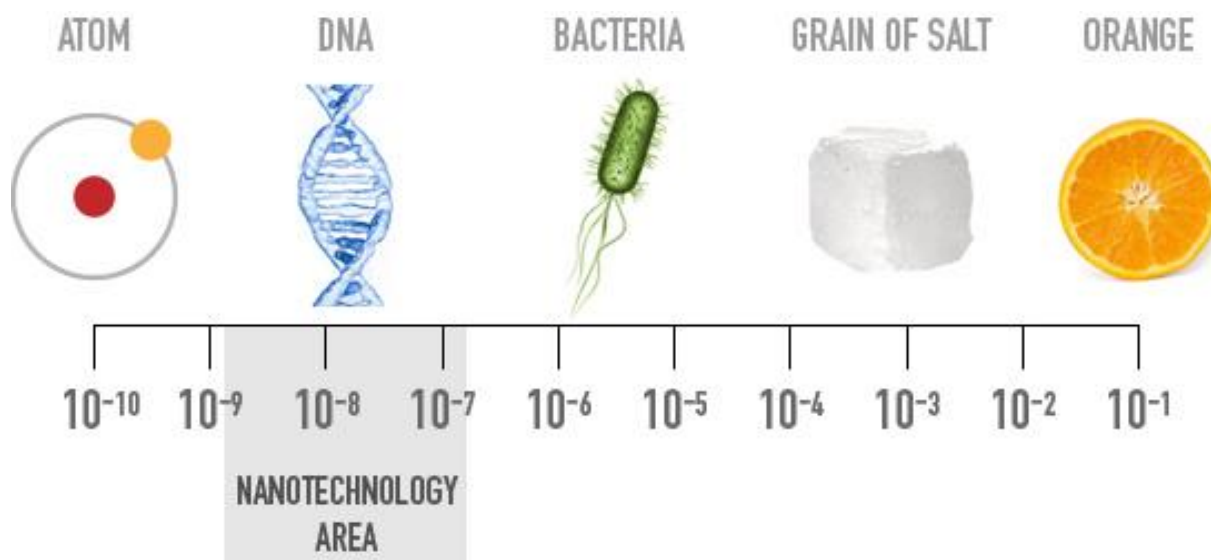
Samotný termín nanotechnologie se objevil později v roce 1974, kdy japonský fyzik Taniguchi takto označil novou měřicí metodu, která umožňovala výrobu součástek s přesností na nanometry. [1]

1959	R. P. Feynman zveřejnil první vizi o nanotechnologii.	1997	Založena firma Zyvex, která se jako první firma zabývala konstrukcí nanomechanismů.
1974	Japonský fyzik Taniguchi uvedl samotný termín nanotechnologie.	2000	Byl rozluštěn lidský genom.
1985	Objevení fullerenu neboli „buckyball“, který dostal název podle svého objevitele R. B. Fullera.	2001	Vynalezen tranzistor z nanotrubic a logický obvod v jedné molekule, který je tvořen dvěma tranzistory.
1986	První záznam jednotlivých kvantových skoků v atomech.	2003	Překročena hranice 50 nm a byl vytvořen první klon člověka.
1988	Vypracování metody pro identifikaci osob podle DNA z jednoho vlasu.	2008	Počátek vývoje hybridního nanopočítače.
1991	Demonstrace důkazu, že molekuly fullerenu spolu s draslíkem nebo rubidiem jsou supravodivé, od Arthura Hebarda.	2011	Vyvinut první molekulární nanosystém s vlastní inteligencí – assembler.
1993	Feynmanova a Gell-Manova teorie kvantové chromodynamiky byla potvrzena pomocí výpočtů provedených na superpočítači.	2020	Předpokládá se nástup nanopočítačů, nanomedicíny a ekonanotechnologie.
1995	Demonstrování elektrického proudu vedeného pouze jednou molekulou.	2030	Nástup kvantových počítačů.

Tab. 1: Základní mezníky vývoje nanotechnologie od jejich počátků až k předpokládané budoucnosti.

1.1 Samotný pojem nanotechnologie

Nanosvětlem se nazývají částice a struktury, které mají alespoň jeden z rozměrů v intervalu mezi 1 nm až 100 nm a následně se označují jako nanostruktury, které se považují za základní stavební jednotky nanomateriálů. Zkoumáním nanostruktur se zabývá nanověda, ale její hranice nelze přesně vymezit z toho důvodu, že zahrnuje oblasti fyziky pevných látek, chemie, inženýrství i molekulární biologie. [1]



Obr. 1: Stupnice nanometrů 10^{-10} m - 10^{-1} m, kde my se pohybujeme mezi 10^{-7} m – 10^{-9} m. (převzato z [2])

Samotná definice nanotechnologie, by se mohla nazývat interdisciplinární a průřezovou technologií, která se zabývá praktickým využitím neobvyklých a také nových vlastností nanomateriálů určených pro konstrukci zařízení, struktur a vytváření materiálů. [1]

Nanotechnologie zahrnuje manipulaci a kontrolu atomů a molekul, které jsou stavebními kameny všech materiálů. Obecně řečeno v oblasti nanotechnologií existují dva přístupy: "zdola nahoru" a "shora dolů". První přístup "zdola nahoru" zahrnuje manipulaci s malým počtem jednotlivých atomů nebo více komplexnějších molekul. Druhý přístup "shora dolů" znamená řízení procesů tak, aby přinutily atomy a molekuly přesunout samy sebe do požadovaných míst nebo struktur. [3]

Nanotechnologie může nabídnout nové způsoby práce pro elektroniku. Nanotechnologická věda vyvíjí nový okruh materiálů: nové procesory, nové způsoby ukládání informací a nové způsoby jejich předávání. Toto nové odvětví, které se objevuje v elektronice, by mělo způsobit

obrovský skok v počítačové a elektronické oblasti a tím rozšířit oblast kvantového počítání a kvantové technologie. [3]

1.2 Uhlíkové nanostruktury

Při objevování nanosvětla v oboru nanoelektroniky se nejvíce prosadil uhlík, u kterého se při objevu jeho nanočástic zjistilo, že by byl vhodný pro vytváření různých nanostruktur. Postupně se přišlo na tři základní uhlíkové nanostruktury, a to fullereny, uhlíkové nanotrubicce a grafen. Fullereny nejsou vhodné pro používání v oboru nanoelektroniky, ale grafen s uhlíkovými nanotubicemi se v tomto oboru prozatím osvědčují. Grafen je uhlíková nanodestička tvořená na výšku pouze jedním atomem uhlíku, která dává základ pro tvorbu jiných nanostruktur, zejména pro tvorbu uhlíkových nanotubic. Tyto dvě nanostruktury se již využívají pro konstruování tranzistorů, diod a dalších součástek. Prozatím je vše relativně nové, takže vývoj těchto součástek je na počátku, ale předpokládá se, že v budoucnu budou mít tyto součástky své místo. [4]

2 Uhlík a jeho alotropy

První známka uhlíku se objevila již tehdy, když se podařilo založit první oheň, kde při exotermické oxidaci vznikl ze dřeva popel a saze. V této době, ale ještě nikdo netušil, že tento prvek bude mít tak významnou roli v budoucnosti nanotechnologií. Uhlík jako prvek byl objeven až v druhé polovině osmnáctého století. Svůj název "carbon" získal odvozením z latinského slova "carbo", kterým starověcí Římané označovali dřevěné uhlí. Uhlík je základní stavební kámen veškerých organických sloučenin. V prvcích, které mají zastoupení v zemské kůře, je uhlík na patnáctém místě a ve vesmíru na místě čtvrtém. Tento prvek tvoří základ všech živých organismů. [4] [5]

2.1 Vlastnosti uhlíku

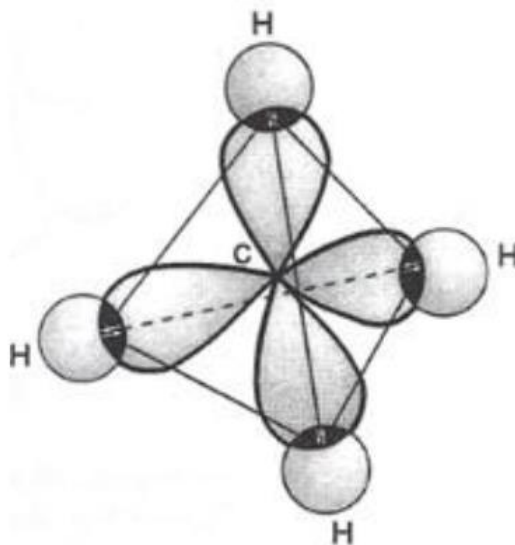
Uhlík je šestý prvek periodické tabulky a je uveden v horní části IV sloupce. Každý atom uhlíku má šest elektronů, které zabírají $1s^2$, $2s^2$ a $2p^2$ atomových orbitalů. Orbital $1s^2$ obsahuje dva pevně svázané elektrony, které jsou nazývány jádrové elektrony. Čtyři elektrony obsazují $2s^2 2p^2$ orbitály, tyto elektrony jsou vázány slaběji než předchozí dva a nazývají se valenční elektrony. [6]

V krystalické fázi se valenční elektrony pohybují k $2s$, $2p_x$, $2p_y$ a $2p_z$ orbitalům, což je velmi důležité pro vytváření kovalentních vazeb v uhlíkových materiálech. Díky tomu v porovnání s vazebnou energií chemických vazeb, je energetický rozdíl mezi horní $2p$ energetickou úrovní a spodní $2s$ úrovní v uhlíku malý. Navíc se elektrické vlnové funkce pro tyto čtyři elektrony mohou snadno mísit mezi sebou, čímž se mění obsazení $2s$ a tří $2p$ atomových orbitalů, a tím se zvyšuje vazební energie mezi atomem uhlíku a sousedními atomy. [6]

2.2 Teorie hybridizace

Hybridizace dovoluje předpovídat prostorové uspořádání atomů v molekulách a popisuje vytvoření energeticky rovnocenných kovalentních vazeb z energeticky rozdílných orbitalů. Zde je centrální atom uhlíku ${}_6\text{C}$: $[\text{He}] 2s^2 2p^2$. ${}_6\text{C}$: Stavba valenční vrstvy atomu uhlíku dokazuje, že základní stav atomu uhlíku obsahuje dva nepárové elektrony, které poukazují na to, že budou moci vytvořit dvě kovalentní chemické vazby. Reálně však atom uhlíku tvoří čtyři kovalentní vazby. Pomocí experimentů bylo zjištěno, že vazby v atomu jsou si rovnocenné, tedy mají

stejnou délkou, energii a směřují k atomům vodíku do vrcholů pravidelného tetraedru a ve středu tetraedru se nachází zmiňovaný atom uhlíku, což je znázorněno na obrázku č. 2. [7]

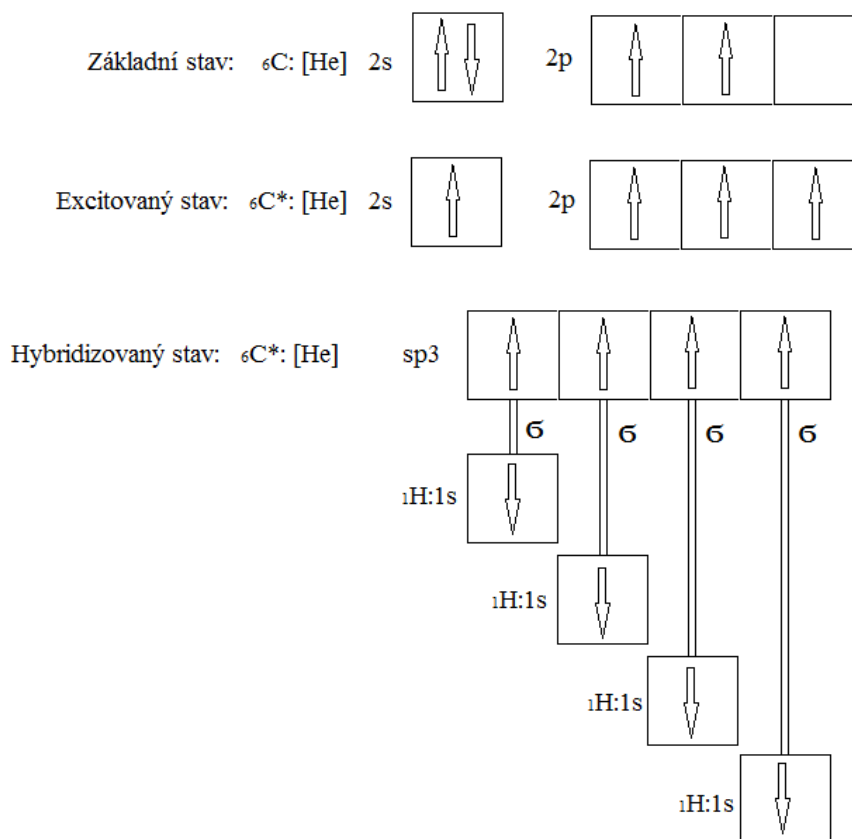


Obr. 2: Ukázka tetraedru, kde jsou vidět čtyři kovalentní vazby atomu uhlíku, tvořící dokonalý čtyřstěn. (převzato z [8])

Atom uhlíku v prvotním excitovaném stavu obsahuje čtyři nepárové elektrony v orbitalech 2s a 2p. K vytvoření valenčního excitovaného stavu a excitaci se vyžaduje energie menší, než je energie, která je uvolněná při vzniku chemické vazby. 2s a 2p orbitaly jsou od sebe energeticky odlišné a mají naprosto odlišné tvary. Z tohoto vyplývá, že v molekule CH_4 by měly být chemické vazby rozdílné svou pevností i prostorovou orientací. Reálně jsou však všechny čtyři chemické vazby rovnocenné. [7]

Dle teorie hybridizace se energeticky a tvarově sjednocují všechny valenční orbitaly, které obsahují alespoň jeden elektron. Pak tedy energetické a tvarové sjednocení orbitalů rozdílných typů nazýváme hybridizací. U atomu uhlíku se energeticky a tvarově sjednocuje tedy hybridizuje jeden orbital 2s se třemi orbitaly 2p, čímž vzniknou energeticky a tvarově stejné orbitaly a každý orbital obsahuje jeden elektron, ty označujeme jako sp^3 . Jedná se zde o hybridizaci typu SP^3 . [7]

Průměr energií původních atomových orbitalů se rovná celkové energii hybridních orbitalů. Hybridní orbitaly charakterizují energetický stav atomu a tento stav nazýváme stavem valenčním. Pro uskutečnění přechodu atomu z excitovaného stavu do valenčního stavu je potřeba další energie, která se vytvoří při tvorbě vazeb. [7]



Obr. 3: Ukázka hybridizace molekuly metanu od základního stavu po hybridizační stav. (převzato z [8])

2.3 Chemická reaktivita uhlíku

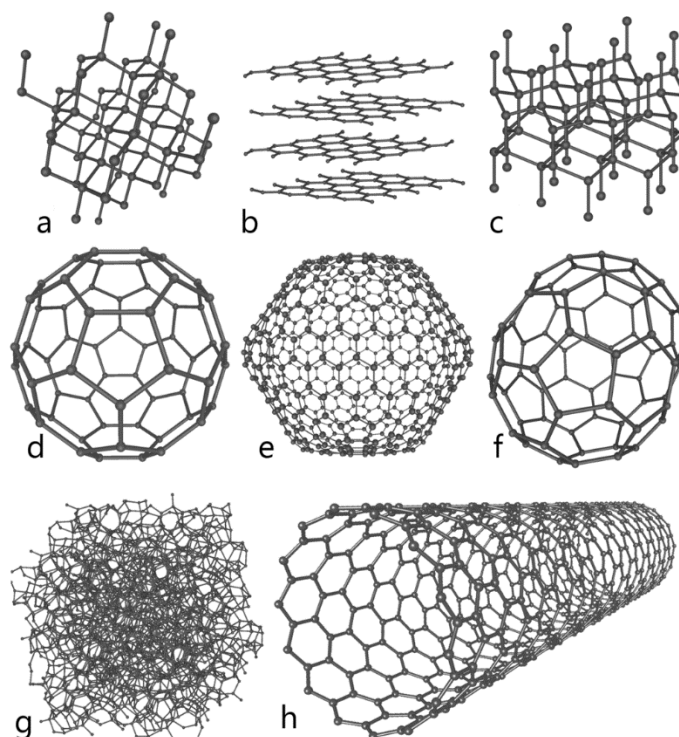
Sloučeniny uhlíku tvoří základ veškerého známého života na Zemi. Uhlík má dobré vlastnosti k vázání se s dalšími atomy, včetně jiných atomů uhlíku, díky tvorbě stabilních kovalentních vazeb. Při standardní teplotě a tlaku je odolný vůči oxidaci a nereaguje s kyselinou sírovou, kyselinou chlorovodíkovou, chlorem nebo jakýmkoli alkalickými kovy. Při vyšších teplotách uhlík reaguje s kyslíkem za vzniku oxidů uhlíku a s kovy za vzniku kovových karbidů. Uhlík má schopnost vytvářet velmi dlouhé, silné a stabilní řetězce propojující C-C vazby. Tato vlastnost umožňuje vznik téměř nekonečného množství uhlíkových sloučenin. Ve skutečnosti je uhlík prvek s nejvíce známými sloučeninami v porovnání s ostatními prvky, s výjimkou vodíku, protože téměř všechny známé organické sloučeniny obsahují vodík. [9]

2.4 Izotopy uhlíku

Uhlík má dva stabilní přirozeně se vyskytující izotopy, a to uhlík-12 a uhlík-13. Uhlík-12 činí 98,93 % a uhlík-13 tvoří zbývajících 1,07 %. Koncentrace ^{12}C je dále zvýšena v biologických materiálech. Identifikace uhlíku v NMR experimentech se provádí s izotopem ^{13}C . ^{14}C je radioaktivní izotop uhlíku s poločasem rozpadu 5730 let, v přírodě se vyskytuje velmi málo (0,0000000001 %) a rozpadá se na ^{14}N díky beta rozpadu. Toto je využíváno v radiometrickém datování k určení původu a stáří uhlíkových vzorků. Určuje se fyzický a biologický původ až do stáří cca 60 000 let. [9]

2.5 Uhlíkové alotropy

Uhlík má několik alotropů nebo různých forem, ve kterých se vyskytuje. Mezi uhlíkové alotropy se zařazují například diamant, grafit, fullereny, amorfní uhlík, skelný uhlík, uhlíkové nanotrubičky, grafen a další. Uhlíkové alotropy se vyznačují širokou škálou fyzikálních vlastností, například diamant je nejtvrdší přirozeně se vyskytující látka, je průhledný, dá se využít jako elektrický izolant nebo jako tepelný vodič. Diamant je nejtvrdším dosud známým přírodním materiálem neboli nerostem. Vyskytuje se nejvíce ve formě oktaedrického, dodekaedrického a krychlového vzhledu uhlíku, typický je pro něj vypouklý nebo velmi výjimečně kulovitý tvar krystalů. Pro jeho tvrdost se používá pro řezání měkčích materiálů a pro jeho neobyčejnost pro tvorbu šperků. Naopak grafit se využívá jako velmi dobrý lubrikant, je neprůhledný a používá se jako dobrý elektrický vodič. Grafit je šesterečný materiál, pro svoje vlastnosti se uplatňuje v mnoha oborech, jako jsou například elektromotory, elektrody a jeho nejstarší použití je tuha v psacích tužkách, podle čehož také získal svůj název grafit, a to z řeckého slova "grafein", tedy česky přeloženo "psát". [9]



Obr. 4: Ukázka některých alotropů uhlíku: a) diamant, b) grafit, c) lonsdaleite, d-f) fullereny (C60, C540, C70), g) amorfní uhlík, h) uhlíkové nanotrubičky (převzato z [9])

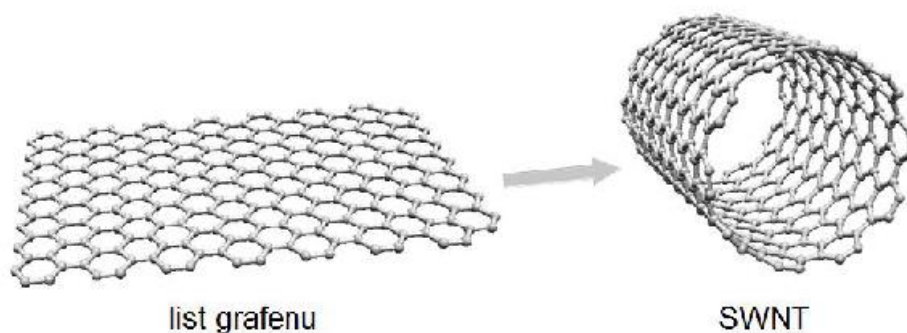
2.6 Uhlíkové nanotrubičky

Úplně poprvé byly uhlíkové nanotrubičky pozorovány a popsány v roce 1952, a to vědci Lukyanovichem a Radushkevichem. Jednotěnné nebo dvoustěnné uhlíkové nanotrubičky (anglická zkratka CNTs – Carbon Nanotubes) byly pozorovány o 24 let déle v roce 1976 vědcem Oberlinem a jeho spolupracovníky. Objev CNTs byl ale připisán vědci Iijimovi v roce 1991, který jako první popsal výrobní proces vícevěnných uhlíkových nanotrubiček (s anglickou zkratkou MWCNTs), tento objev byl náhodný výsledek jeho snahy o zdokonalení procesu přípravy fullerenů C₆₀. V této době však již existovala firma v USA, která byla schopna vyrábět defektní uhlíkové nanotrubičky, které v té době nazývaly uhlíkovými nanovláknami. Iijima s Ichiasim a nezávisle na těchto dvou Bethune s jeho spolupracovníky popsali v roce 1993 proces růstu jednotěnných uhlíkových nanotrubiček (SWCNTs). [5]

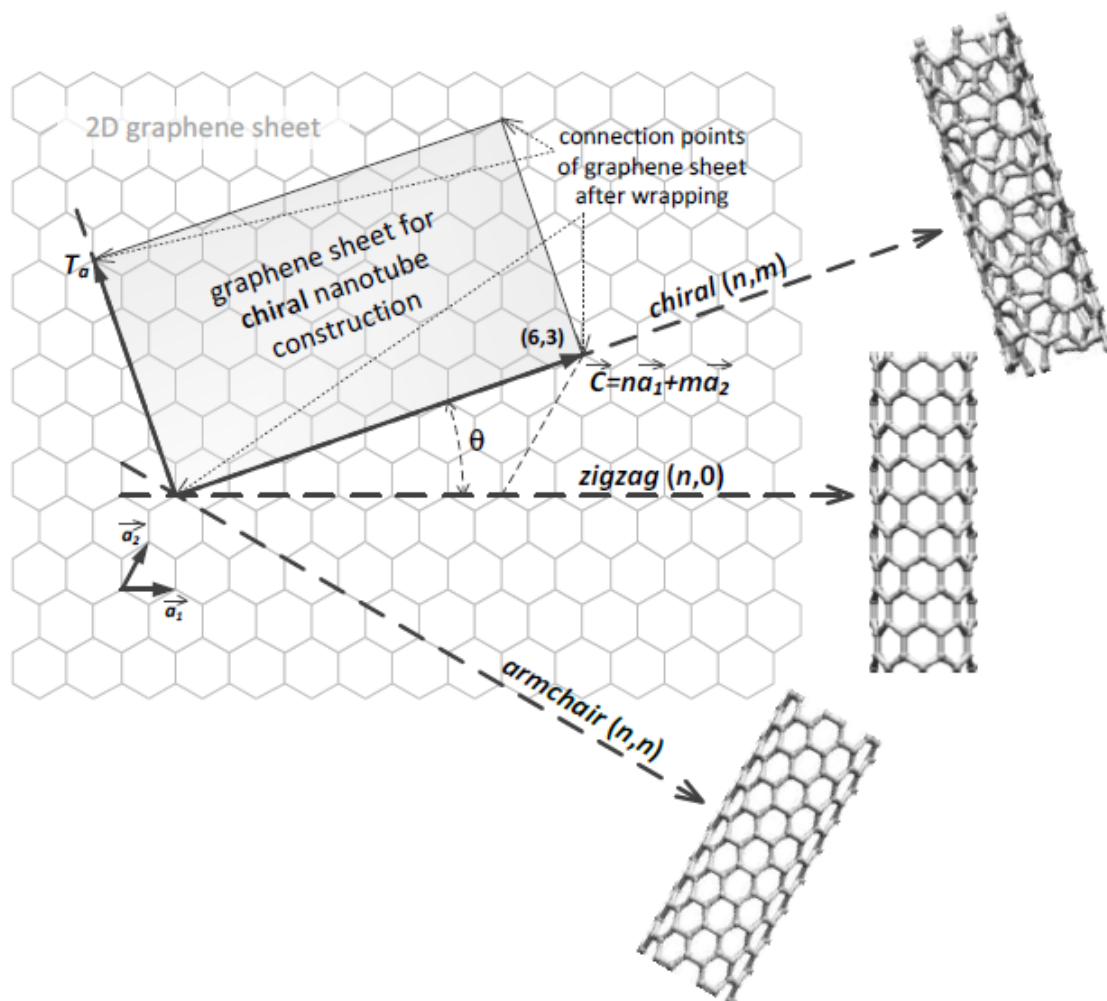
2.6.1 Struktura uhlíkových nanotrubiček

Struktura SWCNTs je velmi podobná srolovanému listu grafenu, znázorněno na obrázku č. 5. Šestiúhelníková struktura grafenu je podobná struktuře včelích pláství a směr jejího srolování je stanoven chirálním vektorem \vec{C} , tento vektor je výsledkem dvou celých čísel (n , m), které odpovídají grafenovým vektorům \vec{a}_1 a \vec{a}_2 , tento postup je ukázán na obrázku č. 6.

Existují dva základní typy SWCNTs konstrukce, které se dělí dle hodnoty čísel (n, m) . První struktura nese název "zigzag" vzniká při hodnotě čísel $(n, 0)$. Druhá struktura s názvem "armchair" vzniká při hodnotě čísel (n, n) , tedy v případě kdy $n = m$. Existuje i třetí nestandartní typ konstrukce SWCNTs, který je charakterizován rovnicí $n > m > 0$, která dostala název "chirální". Těmito strukturami SWCNTs jsou určeny jejich vlastnosti, a to elektrické, mechanické, chemické, optické a další. [5]

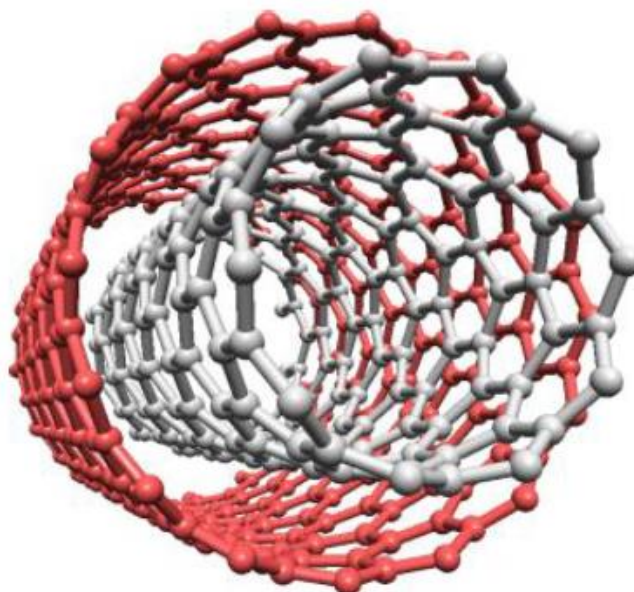


Obr. 5: Znárodnění srolování listu grafenu do SWCNT. (převzato z [5])



Obr. 6: Ukázka metod srolování listu grafenu do třech rozdílných struktur dle chirálního vektoru \vec{C} . (převzato z [5])

Existují dvě základní formy konstrukcí CNTs, a to forma jednostěnná a forma vícevěnná. První forma CNTs je složená z jedné srolované grafenové nanodestičky, tato forma nese název SWCNTs a její průměr se pohybuje v řádu jednotek nanometrů. Druhá forma je složena z více soustředěných srolovaných grafenových nanodestiček, které jsou vloženy do sebe a nese název MWCNTs. Její průměr se pohybuje v řádu desítek nanometrů. Délka samotných CNTs dosahuje obvykle řádu mikrometrů. Dvouvěnné uhlíkové nanotrubičky DWCNTs jsou nejjednodušší formou MWCNTs, tyto uhlíkové nanotrubičky disponují několika výhodami oproti SWCNTs, a to zejména vyšší tuhostí a stabilitou. [5]



Obr. 7: Struktura nejjednodušší MWCNT tedy DWCNT struktura uhlíkové nanotrubičky. (převzato z [5])

2.6.2 Vlastnosti uhlíkových nanotrubic

Elektrické vlastnosti jsou u každé formy CNTs jiné, obecně ale vykazují elektrický odpor $10^{-4} \Omega/\text{cm}$ a jejich maximální proudová hustota dosáhne hodnoty až $10^{13} \text{ A}/\text{m}^2$. Uhlíkové nanotrubičky SWCNTs struktury "armchair" disponují vodivým charakterem. U zbylých dvou struktur "zigzag" a "chirální" závisí jejich elektrický charakter na rozdílu mezi n a m , pokud tedy je rozdíl $n-m$ dělitelný třemi, pak mají tyto dvě struktury charakter vodivý, ve zbylých případech je jejich charakter polovodivý. Uhlíkové nanotrubičky MWCNTs mají vodivý charakter, pokud má tento charakter alespoň jedna jejich vrstva. CNTs disponují také výbornou autoemisí vlastností, díky které mají nízké prahové napětí, a to v řádu několika V/mm . [5]

Uhlíkové nanotrubičky SWCNTs dosahují tepelné vodivosti 1750 - 5800 W/mK, u MWCNTs hodnoty tepelné vodivosti přesahují hodnotu 3000 W/mK. SWCNTs a MWCNTs disponují Youngovým modulem pevnosti v tahu větším než 1 TPa / 100 GPa, vratná deformace u nich dosahuje hodnoty 10 % – 30 % a jejich hustota je 1,35 g/cm³, což nám dokazuje, že CNTs mají velice dobré mechanické vlastnosti. [5]

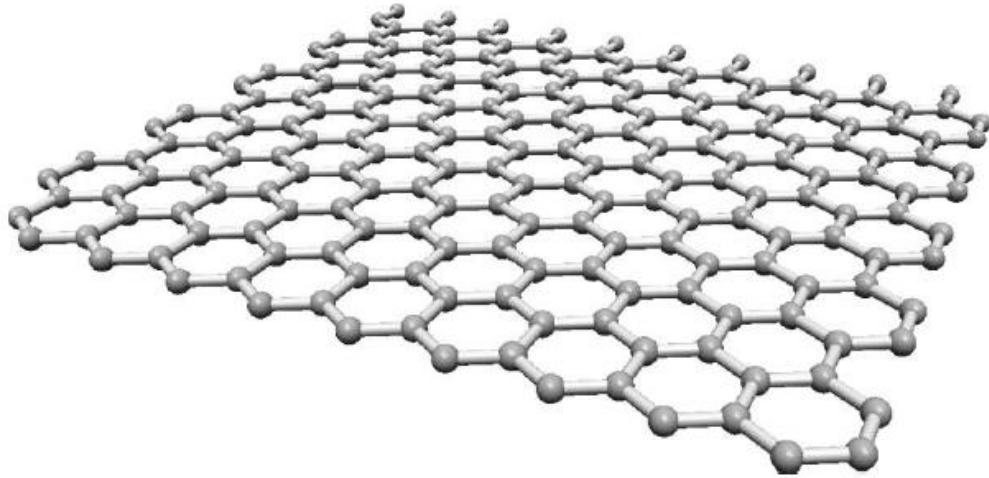
2.6.3 Využití uhlíkových nanotrubic

Uhlíkové nanotrubičky mají nesmírně vysokou povrchovou plochu přibližně 1000 m²/g, dobrou elektrickou vodivost a jejich lineární geometrie povrchu dovoluje velmi dobrý přístup elektrolytu. Toto z nich dělá velmi dobrý materiál k použití v bateriích a dokonce i v palivových článkách. Uhlíkové nanotrubičky jsou velmi dobrými vodiči tepla. Studie ukázala, že by se tato jejich vlastnost dala využít pro odvádění tepla z míst, ze kterých dnes nelze teplo snadno odvést, díky čemuž jsou součástky tepelně zatěžovány. Proto se tedy v tomto oboru mluví o takzvaném tepelném potrubí. Uhlíkové nanotrubičky se využívají zejména při konstrukci tranzistorů, a to díky jejich nízkému rozptylu elektronů a jejich zakázanému pásu, který závisí na průměru a chirálním úhlu daných CNTs. Zjistilo se, že jsou CNTs kompatibilní s architekturou unipolárních tranzistorů FET, první takový tranzistor vznikl v roce 1998. Objev tenkovrstvých TFT tranzistorů našel uplatnění v oboru světelné techniky, a to u dnes novodobých OLED diod, které se využívají pro nejnovější obrazovky. Uplatnění našli CNTs i ve formě vedení elektrického proudu a tepla, což by mělo umožnit rozvoj hybridních obvodů. Uhlíkové nanotrubičky nevynikají jen svou dobrou elektrickou a tepelnou vodivostí, mají také velmi dobré mechanické vlastnosti, což umožňuje jejich uplatnění i v oboru pokročilých kompozitů pro jejich ještě lepší mechanické vlastnosti.

2.7 Grafen

Struktura grafenu představuje jednu vrstvu grafitu, která byla popsána německým vědcem Hansem-Peterem Boehmem již v roce 1962. Grafen je ve své podstatě nanodestička, která se skládá pouze z jedné vrstvy sp² vázaných atomů uhlíku. Tyto atomy jsou složeny do šestiúhelníkové krystalové struktury, která se výrazně podobá struktuře včelích pláství. Šířka této struktury odpovídá šířce jednoho atomu uhlíku a meziatomová vzdálenost je zde 0,142 nm. Zpočátku se při studii grafenu předpokládalo, že díky své jednoatomární vrstvě bude nestabilní a bude mít vlastnost vytvářet jiné uhlíkové útvary. Nakonec se ve spolupráci Ruské Akademie věd a vědců Geima a Novoselova z Manchesterské university ve Velké Británii podařilo v roce

2004 vyrobil vhodnou grafenovou nanodestičku tvořící jednoatomární vrstvu atomů uhlíku s šestiúhelníkovou strukturou. [5]

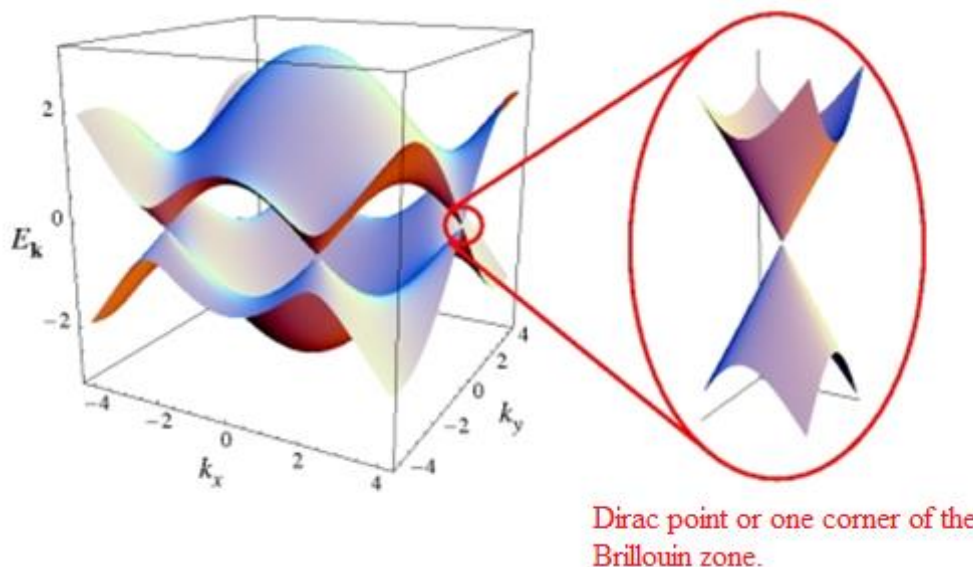


Obr. 8: Ukázka grafenové nanodestičky, která tvoří jednoatomární vrstvu atomů uhlíku s šestiúhelníkovou strukturou. Na obrázku je viditelná podobnost se strukturou včelích pláství. (převzato z [5])

Dva uhlíkové atomy v grafenové nanodestičce mají mezi sebou vazbu o délce přibližně 0,142 nm. Z grafenových nanodestiček se může vytvořit grafit, a to způsobem navršení několika nanodestiček na sebe ve vzdálenosti vrstev 0,335 nm. Pro lepší představu šířky grafenové nanodestičky, aby z nich byl vytvořen grafit o šířce 1 mm, musí se na sebe navršit téměř tři miliony nanodestiček. Grafit je tedy základní stavební prvek několika uhlíkových alotropů, a to například uhlíkové nanotrubičky a grafitu. [5]

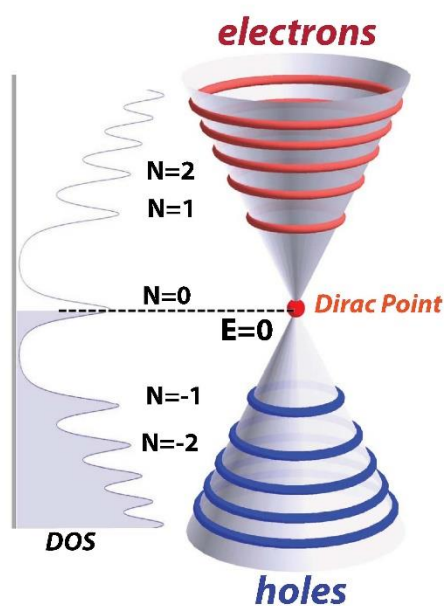
2.7.1 Vlastnosti grafenu

Atomy uhlíku mají celkem šest elektronů, dva ve vnitřním plášti a čtyři ve vnějším plášti. Elektrony ve vnějším plášti jsou v individuálním atomu k dispozici pro chemickou vazbu, ale v grafenu je každý atom spojen se třemi dalšími atomy uhlíku na dvourozměrnou rovinu, přičemž jeden elektron je volně k dispozici ve třetí dimenzi k vedení elektrického proudu. Tyto vysoce mobilní elektrony se nazývají P (π) elektrony a jsou umístěny nad a pod grafenovým listem. Tyto p orbitály se překrývají a přispívají ke zlepšení vazeb mezi uhlíkovými atomy ve struktuře grafenu. Elektrické vlastnosti grafenu jsou v podstatě dány těmito vazebními a antivazebními (valenčními a vodivostními pásy) p orbitály. [10]



Obr. 9: Spojení atomů uhlíku grafenu. Je zde šest Dirakových bodů, které jsou v místě spojení v takzvané Brillouinově zóně, která tím pádem tvoří pomyslný šestiúhelník. (převzato z [11])

Při výzkumech v posledních 50 letech se ukázalo, že v Dirakově bodu grafenu mají elektrony a díry nulovou efektivní hmotnost. K tomu dochází, protože energeticko-pohybový vztah (spektrum pro excitaci) je lineární pro nízkou energii poblíž šesti individuálních koutů Brillouinovy zóny. Tyto elektrony a díry se nazývají Dirakovy fermiony nebo také Graphiony a šest rohů Brillouinovy zóny jsou známy jako Dirakovy body. Vzhledem k nulové hustotě v místě Dirakových bodů je ve skutečnosti elektrická vodivost poměrně malá. Nicméně Fermiho hladina lze změnit dotováním (elektronů nebo děr) k vytvoření materiálu, který je potenciálně lepší elektrický vodič než například měď při pokojové teplotě. [10]



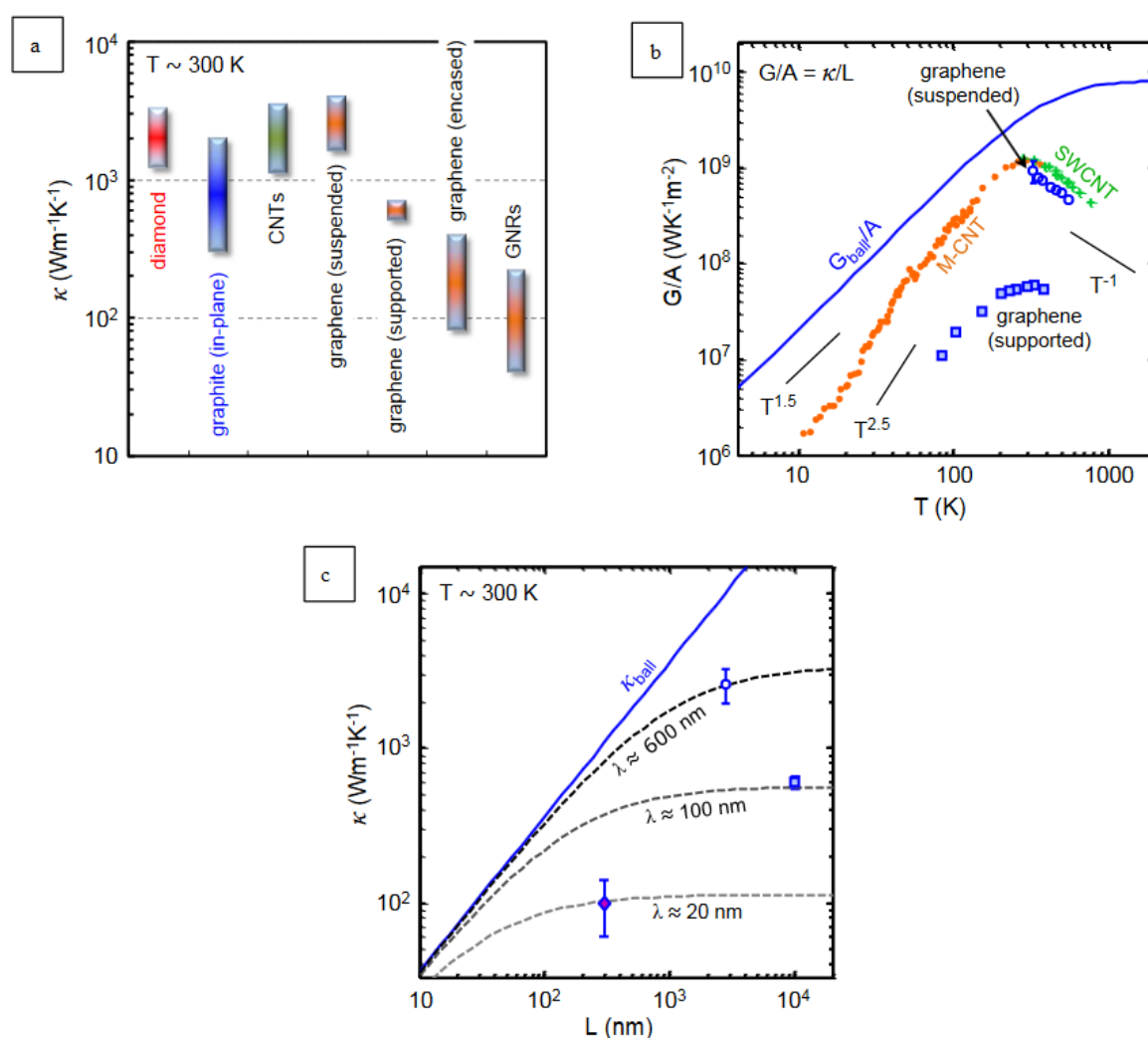
Obr. 10: Detailní ukázka Dirakova bodu neboli jednoho rohu Brillouinovy zóny. (převzato z [12])

Testy ukázaly, že pohyblivost nosičů náboje grafenu je velmi vysoká $15\,000\text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ a teoretický potenciální limit je až $200\,000\text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$, který je dán rozptylem akustických fotonů grafenu. Ukázalo se, že grafenové elektrony se chovají velmi podobně jako fotony v pohyblivosti vzhledem k jejich nedostatku hmoty. Tyto nosiče náboje jsou schopné cestovat sub-mikrometrovými vzdálenostmi bez rozptylu, tento jev je známý jako balistická doprava. Avšak kvalita grafenu a substrátu, které budou použity, jsou limitující faktory. Pokud je použit oxid křemičitý jako substrát, pohyblivost bude omezena na $40\,000\text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$. [10]

Další z vlastností grafenu je jeho vlastní síla. Vzhledem k síle jeho $0,142\text{ nm}$ dlouhým uhlíkovým vazbám, je grafen nejsilnější materiál, jaký byl zatím objeven. Jeho pevnost v tahu je 130 GPa , pro představu konstrukční ocel má pevnost v tahu 400 MPa nebo kevlar se svými $375,7\text{ MPa}$. Nejen pevnost grafenu je mimořádná, také jeho váha vyniká, a to hodnotou $0,77$ miligramů na čtverečný metr. Opět pro účel srovnání, například papír je 1000 krát těžší na jeden čtverečný metr než grafen. Uvažuje se, že pokud bychom použili list grafenu, který má šířku pouze jednoho atomu uhlíku a byl by rozlohou velký jako celé jedno fotbalové hřiště, vážil by méně než jeden gram. [10]

Navzdory vysokým hodnotám pokojové teploty pro volně uložené vzorky se tepelná vodivost v rovině grafenu výrazně snižuje, pokud je dvourozměrný (2D) materiál v kontaktu se substrátem nebo je omezen na grafenové nanopásky (GNRs – neboli graphene nanoribbons). Toto chování je neočekávané vzhledem k tomu, že šíření fononu v tenkém grafenovém plátu je pravděpodobně velmi citlivé na povrch nebo hranové odchylky. Při pokojové teplotě, tepelná vodivost grafenu obohaceného SiO_2 byla změřena jako $\sim 600\text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, u grafenu obaleného SiO_2 byla změřena jako $\sim 160\text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ a u obohacených GNRs byla odhadnuta jako $\sim 80\text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ pro $\sim 20\text{ nm}$ široké vzorky. Širší rozsahy dosud známých hodnot při pokojové teplotě jsou shrnuty na obrázku č. 11a. Mohou existovat rozdíly mezi touto studií, tyto rozdíly jsou způsobeny během výroby vzorků, výsledky nicméně ukazují jasný pokles tepelné vodivosti izolovaných (volně zavěšených) grafenů v souladu s teoretickou předpovědí. Pro grafen obohacený SiO_2 , dochází ke snížení tepelné vodivosti v důsledku spojení a rozptylu všech grafenových fononů se substrátovými vibračními módy, grafenové ZA větve se zdají být nejvíce postiženy. Tento pokles je vidět na obrázku č. 11b a je vyjádřený jako tepelná vodivost v průřezové ploše (G/A), což je vhodnější při měření vzorků, které se blíží balistickému limitu tepelného toku. Pro srovnání lze toto nahradit tepelnou vodivostí uhlíkových nanotrubic a teoreticky horní hranicí volného rozptylu balistické dopravy (G/A) koule vypočtené z fononové

disperze. Obrázek č. 11c ukazuje očekávanou závislost tepelné vodivosti při pokojové teplotě na délce vzorku L v kvazi-balistickém dopravním režimu, L se stává srovnatelná s vnitřním fononem, střední volná dráha λ_0 . Je-li grafen omezen na GNRs, které jsou užší než vnitřní fonon, je střední volná dráha ($W \leq \lambda_0$), fononový rozptyl s hranicemi a ostrostmí krajů dále snižuje tepelnou vodivost ve srovnání s ochuzeným a SiO_2 obohaceným grafenem. Pro srovnání tepelná vodivost tenké izolační křemíkové (SOI) folie je také výrazně snížena z celé velikosti Si ($\sim 150 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ při pokojové teplotě) na přibližně $25 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ pro $\sim 20 \text{ nm}$ tenkou vrstvu v důsledku povrchového rozptylu. Tato hodnota je dále snížena na $\sim 2 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ pro $\sim 20 \text{ nm}$ průměru Si nanovlákna s drsným povrchem. V kontrastu, a to navzdory substrátu nebo okrajovým efektům, grafen udržuje relativně vysokou tepelnou vodivost ve dvourozměrné (2D) jednovrstvé ploše, která má rozměr $h \approx 0,335 \text{ nm}$. [13]



Obr. 11: a) Rozdíl tepelné vodivosti při pokojové teplotě vzorků.; b) Pokles tepelné vodivosti, která je vyjádřena v průřezové ploše G/A . c) Očekávaná závislost tepelné vodivosti při pokojové teplotě na délce vzorku L . (převzato z [13])

2.7.2 Využití grafenu

Jedno z odvětví, kde se počítá s využitím grafenu a tím zlepšení dosavadních funkcí jsou baterie, kde nyní probíhají výzkumy kombinací grafenu s nynějšími materiály. Tímto bylo prozatím dosaženo ve výzkumných podmínkách zvýšení jejich kapacity a zkrácení doby potřebné k znovu nabití. Dále je s grafenem počítáno v oboru dotykových obrazovek, a to jak u mobilních telefonů, tak i tabletů a dalších dotykových zařízení. V tomto oboru vyniká flexibilitou, malým odporem a pohyblivostí elektronů. Grafen spolu s oxidem křemičitým, který působí jako aktivní složka, tvoří prozatím v experimentálních podmínkách transparentní technologii paměti. V roce 2010 byl firmou IBM vytvořen první grafenový tranzistor, který pracuje s dvojnásobnou rychlostí v porovnání s křemíkovým tranzistorem. Tato firma následně vytvořila s těmito tranzistory funkční obvody. Zatím jsou všechny tyto pokroky v elektronice ve stadiu prototypů.

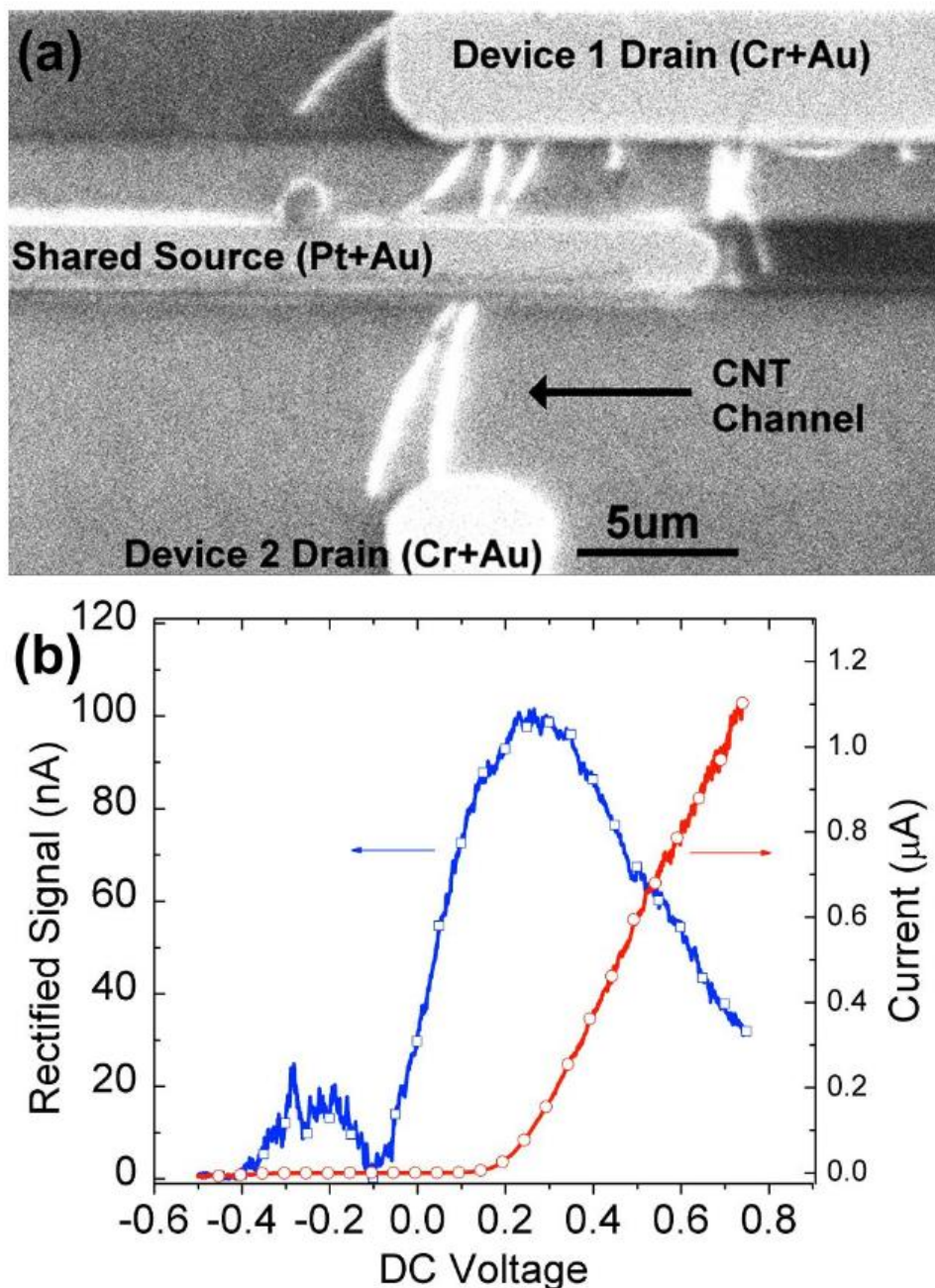
3 Součástky založené na uhlíkových nanostrukturách

3.1 Schottkyho dioda na bázi uhlíkových nanotrubic

Schottkyho diody na bázi uhlíkových nanotrubic byly vyrobeny ve fotolitografickém procesu s využitím rozdílných kontaktních kovů z vysokofrekvenčně kompatibilních substrátů. Diody vykazují téměř ideální chování, usměrní proud o velikosti 100 nA a pracují o frekvencích až 18 GHz. Závislost napětí na frekvenci se využívá k odhadu přechodové kapacity $\sim 10^{-18}$ F a vnitřní mezní frekvence ~ 400 GHz [14]

Vzhledem k vysoké pohyblivosti nábojů v uhlíkových nanotrubicích za pokojové teploty, byly navrženy pro výrobu elektronických zařízení v řádech THz. Nicméně, charakteristická vysoká impedance individuálních CNTs činí měření vysokofrekvenčních elektrických vlastností velmi obtížným. Jedním z řešení problémů měření vysokofrekvenčních elektrických vlastností CNT zařízení je vytvoření Schottkyho diody mezi CNT a kovovými elektrodami, která je použita jako usměrňovač pro produkci stejnosměrného proudu v reakci na mikrovlnné frekvence napětí. Je dokázáno, že tato CNT-SD (carbon nanotube Schottky diode) může usměrňovat velké proudy a pracuje na frekvencích do 18 GHz. Dále bylo zjištěno, že vnitřní mezní frekvence je přibližně 400 GHz a může být ještě mnohem vyšší, a to pokud by byl snížen sériový odpor uhlíkových nanotrubic. [14]

RF-kompatibilní zařízení CNT-SD byly připraveny na safírových a křemenných substrátech pomocí následujícího způsobu. Vzory z hliníku s příměsí $\text{Mo}_2(\text{acac})_2$ a $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ byly předem naneseny na safírové a křemenné substráty za použití polymethylmethakrylátu (PMMA) – fotorezistu dvojité fotolitografie. Uhlíkové nanotrubice (výstupní práce 4,5-5,1 eV) byly vytvořeny pomocí depozice chemických par (CVD) při 900 °C v trubkové peci pomocí metanu, vodíku a ethylenu. Nízko-ohmické kontakty byly naneseny pomocí elektronového paprsku odpařováním platiny (výstupní práce 5,6 eV), následované zlatem a zakončené opět platinou pro povrchovou tvrdost. Schottkyho kontakty byly uloženy po obou stranách centrálního ohmického kontaktu prostřednictvím teplého odpařování chrómu (výstupní práce 4,5 eV) a zlata. Obrázek č. 12a znázorňuje strukturu daného zařízení. Na obrázku č. 12b je ukázán graf zařízení, které obsahuje jednu polovodičovou nanotrubicí. [14]



Obr. 12: a) Struktura Schottkyho diody přibližena pod mikroskopem.; b) VA-charakteristika při 7 GHz, kde červená křivka znázorňuje napětí a modrá křivka usměrněný proud. (převzato z [14])

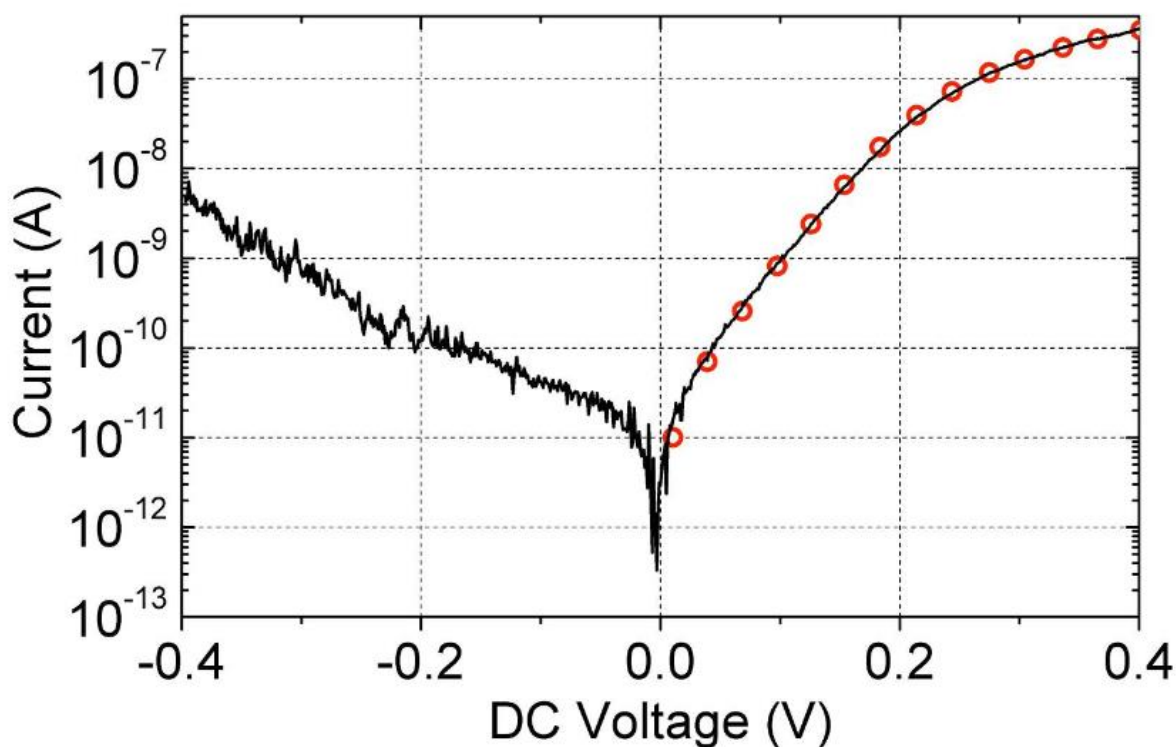
Obrázek č. 13 znázorňuje VA-charakteristiku pro jednotlivé CNT-SD. Při nízké frekvenci, se chová CNT-SD jako dioda v sérii s rezistorem:

$$I = I_S * [e^{(qV - IR_S/nkT)} - 1]$$

(1)

Kde I_S je reverzační saturační proud, R_s je sériový odpor, n je ideální činitel, k je Boltzmannova konstanta, q je elektrický náboj a T je teplota. Rozsah této rovnice

(0 mV až 400 mV) určuje $n = 1$ a sériový odpor $R_s = 420 \text{ k}\Omega$. Odpor diody a sériový odpor je přibližně stejný při $V_{dc} \approx 200 \text{ mV}$, kde je zřejmé koleno na VA-charakteristice. Při měření, kde byly nastaveny tyto parametry, byla zjištěna silná závislost na frekvenci. Tato silná závislost je připsána prozatím nedokonalému systému měření a nastavení daných veličin. [14]

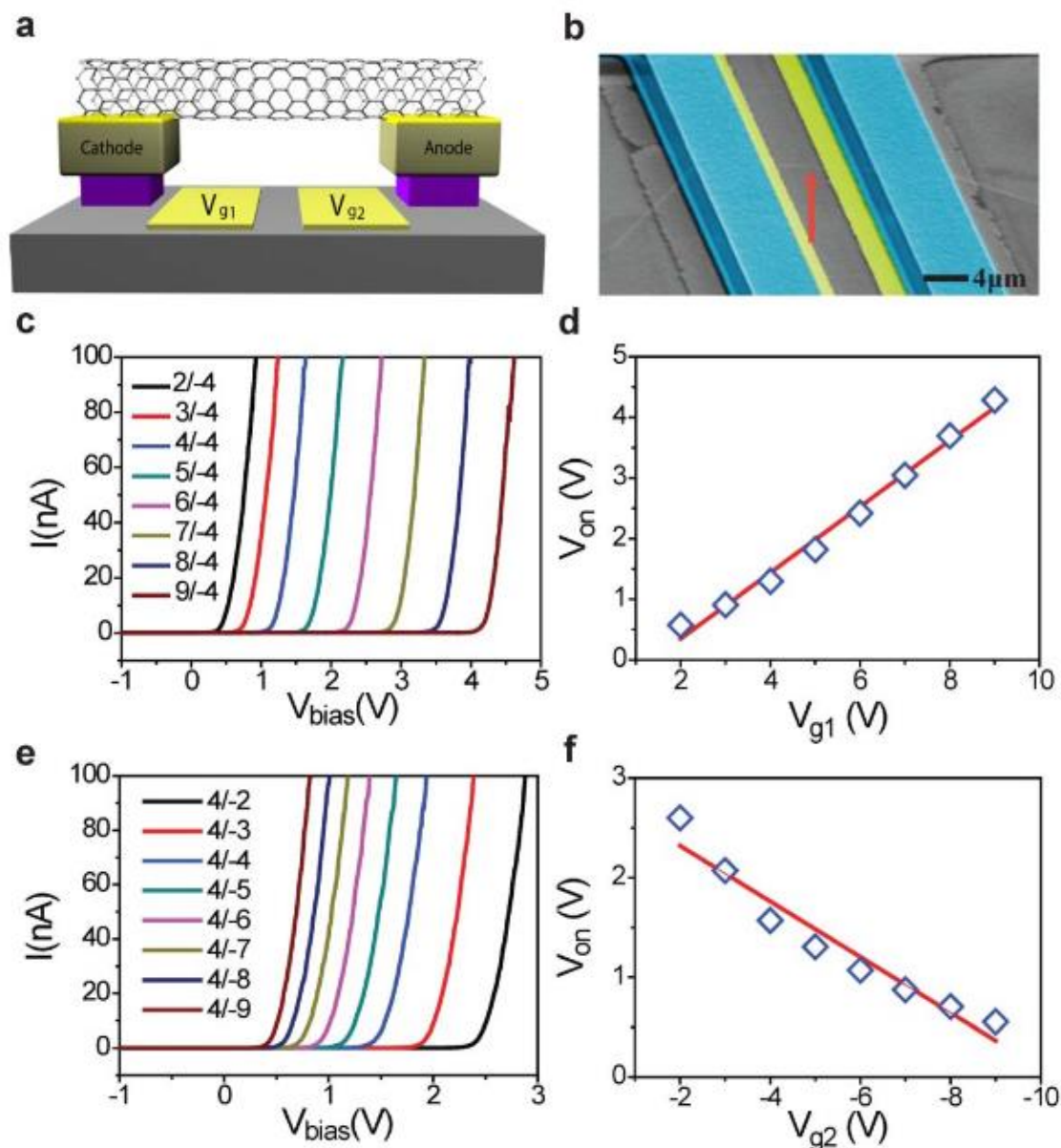


Obr. 13: Stejnoseměrná (DC) VA-charakteristika CNT-SD a červeně označené body, které odpovídají rovnici (1). Při tomto měření byly použity hodnoty $n = 1$ a $R_s = 420 \text{ k}\Omega$. (převzato z [14])

3.2 Plně laditelná dioda s jednotěnými uhlíkovými nanotrubicemi

Laditelná dioda s uhlíkovými nanotrubicemi může být jedinečným stavebním kamenem pro vývoj nové generace programovatelných nanoelektrických logických a integrovaných obvodů. SWCNTs jsou kvazi jednorozměrné struktury s příznivými elektrickými a optickými vlastnostmi. Vzhledem k tomu hustota stavů (DOS) klesá s rostoucí energií v jedné dimenzi. Dotované koncentrace v uhlíkových nanotrubicích mohou být snadno modulovány elektrostatickým řízením. Chování ideální diody bylo prokázáno na SWCNTs s elektrostatickým P-N dotováním a účinnou emisí světla. Fotoelektrické generování proudu bylo také prokázáno u SWCNTs diod. Navíc silné tunelování přes nanotrubicový Schottkyho přechod nebo P-N přechod může vést k tomu, že SWCNTs tunelové diody vykazují negativní vnitřní odpor. Prahové napětí diody lze plynule naladit až na 4,3 V pomocí ovládání řídicího napětí. Kromě toho je možné v této struktuře nakonfigurovat tuto diodu na inverzní diodu, a to doladěním tunelového proudu s řídicím napětím. [15]

Na obrázku č. 14a je znázorněno schéma SWCNT P-N diody. Nedotčené SWCNTs syntetizované chemickým napařováním jsou přímo převedeny z růstového substrátu na substrát zařízení s předem vzorkovanou katodou, anodou a dvěma spodními dělenými řídicími elektrodami. Elektrostatické dotování nanotrubic je dosaženo řízením dvou spodních řídicích elektrod V_{g1} a V_{g2} . Obrázek č. 14b ukazuje obraz SWCNT diody, který je pořízen skenovacím elektronovým mikroskopem (SEM – scanning electron microscopy). Obrázek 14c znázorňuje VA-charakteristiku reprezentativní SWCNT diody s řídicími elektrodami, které jsou od sebe ve vzdálenosti 4 μm při různých podmínkách. Pozitivní V_{g1} a negativní V_{g2} elektrostaticky dotují části nanotrubic, které se nacházejí nad nimi do N a P typu. Tvorba P-N přechodu vede k usměrnění VA-křivek po sepnutí diody. Je zajímavé, že když nastavíme V_{g2} na konstantní hodnotu -4 V a zvyšujeme V_{g1} od 2 do 9 V usměrněné VA-křivky se posouvají postupně po ose x a tím tedy zvyšujeme prahové napětí dané diody, při zachování stejné nelinearity. Extrahovaná prahová napětí ukazují lineární závislost na rozdílných řídicích napětí V_{g1} , což je viditelné na obrázku č. 15d, přičemž maximální hodnota byla vyšší, než 4,3 V. Při dalším zkoumání zůstává konstantní V_{g1} na 4 V a mění se V_{g2} od -2 do -9 V, znázorněno na obrázku č. 14e. Zde při zvyšování záporných hodnot V_{g2} snižuje prahové napětí diody od 2,6 do 0,5 V, extrahování prahových napětí znázorňuje opět lineární závislost na rozdílných řídicích napětích V_{g2} , což je viditelné na obrázku č. 14f, ale křivka má negativní sklon. U typické P-N diody je vestavěný potenciál určen rozdílem Fermiho hladiny v přechodu, která může být v tomto případě naladěna pomocí dvou řídicích elektrod. V důsledku toho bude větší potenciální rozdíl mezi V_{g1} a V_{g2} , který indukuje vyšší vystavěnou potenciální bariéru, a tudíž i vyšší prahové napětí diody. Kromě toho prahové napětí uhlíkové nanotrubicové diody může přesáhnout hodnotu 4 V. Nicméně, s malou řídicí kapacitou $\sim 7 \times 10^{-18}$ F/ μm odhadované podle geometrie, může být Fermiho hladina posunuta do prvního sub-pásma hrany pod 10 V řídicího napětí. [15]



Obr. 14: a) Schématický náčrt plně laditelné SWCNT diody. Nanotrubička je uložena mezi katodu a anodu a nachází se 1,5 μm nad dvěma řídicími elektrodami. 30 nm silné zlato se používá pro kontakt elektrod s nanotrubicí.; b) Skenovací elektronový mikroskop (SEM – scanning electron microscopy), který nám přiblížil strukturu diody, kde šipka znázorňuje pozici nanotrubičky, modré oblasti odpovídají anodě a katodě a žluté oblasti jsou řídicí elektrody.; c) VA-charakteristika naměřená pro různé hodnoty V_{G1} a konstantní hodnotu V_{G2} .; d) Závislost prahového napětí na V_{G1} .; e) VA-charakteristika naměřená pro různé hodnoty V_{G2} a konstantní hodnotu V_{G1} .; f) Závislost prahového napětí na V_{G2} . (převzato z [15])

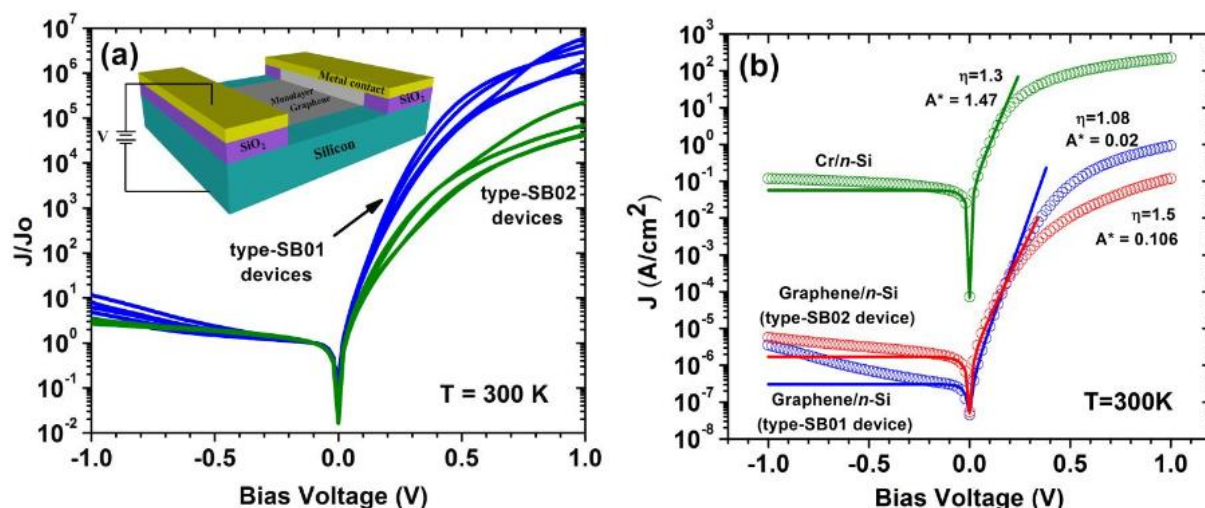
3.3 Ideální grafen/křemíkové Schottkyho přechodové diody

Grafen-Schottkyho přechod je systém, který je studován pro použití v solárních článcích, chemických a biologických senzorech. Grafen-Schottkyho přechod byl testován s několika různými polovodičovými materiály. Cílem je navrhnout zařízení s širokou škálou použitelnosti. Ideální faktor, který nese označení η , se používá pro označení míry vad při zprostředkování

dopravy nábojů. $\eta = 1$ odpovídá ideální Schottkyho diodě s čistým termionickým průchodem náboje přes bariéru. V dnešní době se hodnoty η pro grafen-Schottkyho přechod pohybují v rozmezí od 1,3 do 30. Některé nedávné studie zjistily existenci nehomogenity v grafen-polovodičovém přechodu jako jeden z důvodů pro ne-idealitu zařízení, což může vést k vysokým svodovým proudům a špatným hodnotám η . Tyto nečistoty v grafen-polovodičovém rozhraní mohou být zbytky kovových kontaminantů z měděných Cu substrátů používaných v LPCVD (Low-Pressure Chemical Vapor Deposition) k růstu grafenu. Bylo zjištěno, že nečistoty jako například Si, Ca, Ru a Pt jsou přítomny na povrchu Cu fólie, ještě před růstem grafenu a následně pravděpodobně zůstávají na grafenu i po dokončení a odebrání grafenu z Cu fólie. [16]

Ideálního chování grafen/n-Si Schottkyho přechodové diody s η , bylo dosaženo minimalizací kovových nečistot v grafenu pomocí leptání horních ~ 700 nm Cu roztokem persíranu amonného, při aplikaci po dobu 90 sekund. Růst grafenu se provádí pomocí techniky LPCVD. Pro výrobu Schottkyho přechodu s využitím grafenu byly připraveny 20 nm vrstvy SiO_2 na n-Si vrstvě s řadou rýh vyrytých v oxidu. Bezprostředně před nanesením grafenu, byl povrch oxidu i s rýhami dokonale očištěn. Fotolitografie je následně použita pro nanesení vzoru grafenu na připravený oxid. Aktivní oblast je definována jako oblast grafenu v přímém kontaktu s rýhou vytvořenou na křemíku. Grafen ležící uvnitř rýhy na oxidu, se poté uvede do styku s 7/70 nm silnou Cr/Au a zadní kontakt na křemíku je vytvořen ze 100 nm silného Al. Schéma typické konstrukce zařízení je znázorněno na obrázku č. 16a. Zařízení vyrobena tímto způsobem jsou označena jako typ-SB01. Podobným způsobem pomocí stejných n-Si vrstev byly vyrobeny ještě dva typy Schottkyho zařízení. U grafen/n-Si Schottkyho zařízení typ - SB02 je použito identických výrobních procesů, s výjimkou počátečního leptání Cu, které zde není provedeno. Poslední typ zařízení byl vyroben jako Cr/n-Si přechod. [16]

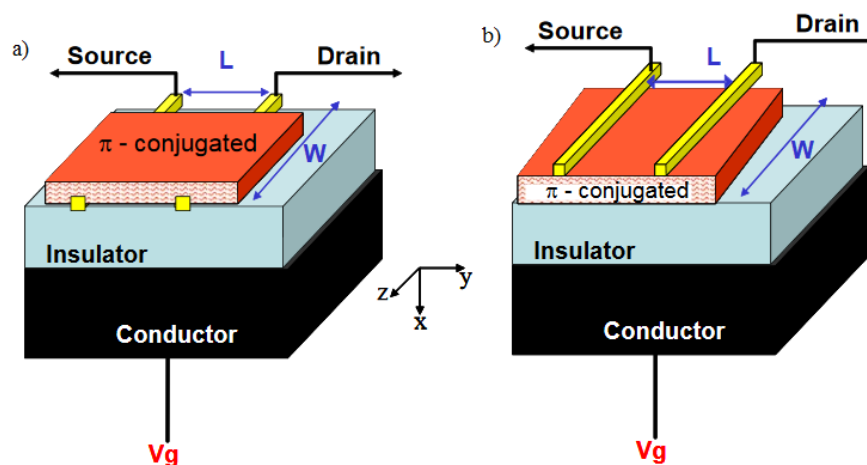
Měřená proudová hustota J byla normalizována s ohledem na reverzní saturační proud J_0 a tyto veličiny byly vyneseny jako $J/J_0 - V$ křivky, to je znázorněno na obrázku č. 15a pro několik typů zařízení SB01 a SB02. Z těchto křivek lze jasně pozorovat rozdíly mezi typem SB01 a SB02. Typ - SB01 vykazuje nižší ideální faktor a výrazný nárůst proudu, to je připsáno snížené chybovosti rozhraní. Nenormalizované J-V křivky jsou uvedeny na obrázku č. 15b pro každý typ zařízení. [16]



Obr. 15: a) Normalizovaná charakteristika grafen/n-Si Schottkyho diody pro typ SB01 a SB02. Vložený obrázek znázorňuje schéma zařízení.; b) Nenormalizované charakteristiky všech popisovaných zařízení, kde je viditelné, jak zařízení Cr/n-Si se výrazně odlišuje od zbylých dvou. A^* je efektivní Richardsonova konstanta v $A/cm^2/K^2$. (převzato z [16])

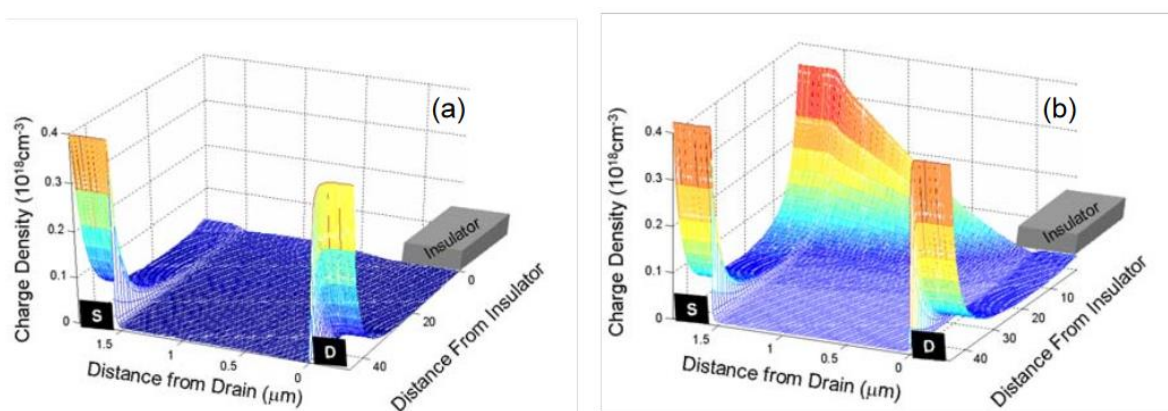
3.4 Organický tranzistor řízený polem

Základní operace organických FETs (OFETs – organic field effects transistors) a MOSFETs jsou v mnoha ohledech podobné, i když existují také významné rozdíly, které vznikají díky různým druhům zapojení struktur. Obecně se OFETs skládají ze tří částí, a to jsou kovové vodiče nebo dotované organické vodiče, izolátoru a π -konjugovaného polovodiče. OFETs jsou uvedeny na obrázku č. 16. Na rozdíl od MOSFET jsou source a drain elektrody připojeny přímo k π -konjugovanému polovodiči, který tvoří kanál. Na obrázku č. 16a jsou source a drain elektrody v přímém kontaktu s izolátorem a kanálem. Na obrázku č. 16b jsou source a drain elektrody na druhé straně π -konjugovaného materiálu. Tyto dva režimy nesou označení spodní a horní elektrodová konfigurace. [17]



Obr. 16: Schématický popis organického tranzistoru založeném na vodiči, izolátoru a π -konjugovaném materiálu (technologie $C\pi$). (převzato z [17])

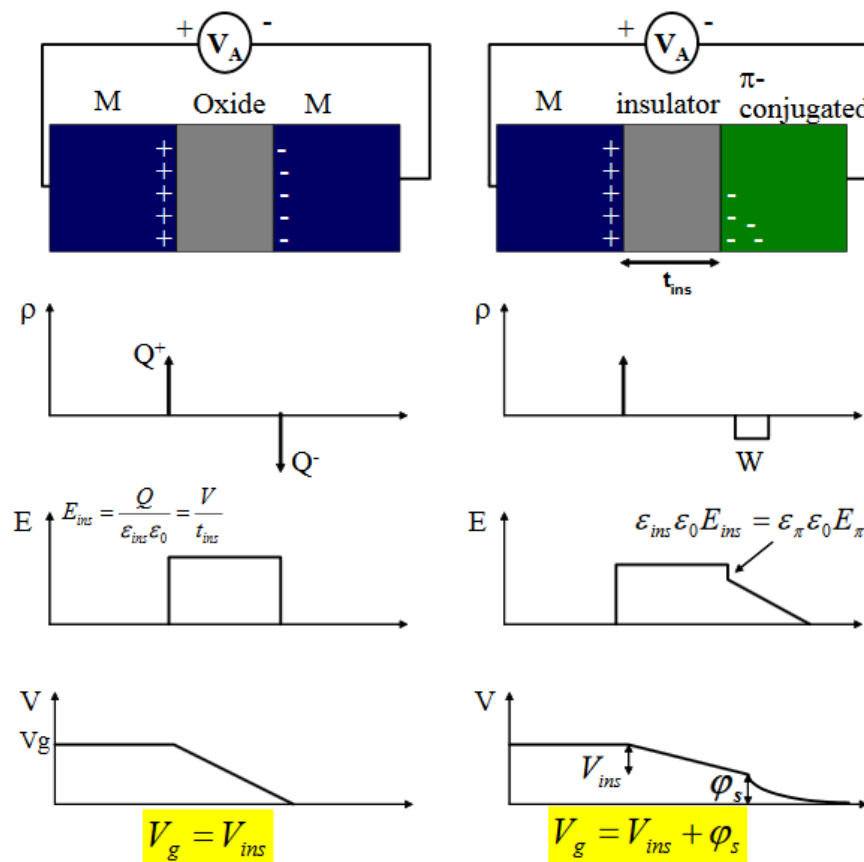
Na obrázku č. 17 je zobrazeno rozložení hustoty náboje v horní elektrodě OFET pro dvě hodnoty gate-source elektrody. Simulovaná struktura se skládá ze source-drain elektrod, které jsou uloženy ve vzdálenosti (L) $1,5 \mu\text{m}$, tloušťka vrstvy π -konjugovaného materiálu je 50 nm a izolátor je silný 100 nm . Na obrázku č. 17a je viditelné, že při nulovém řídicím napětí, kdy se nezvýší hustota náboje mezi source a drain elektrodami, dosahuje odpor velmi vysokých hodnot, což je typické pro zakázaný pás a nedotovaný organický materiál. Jakmile je na řídicí elektrodu přivedeno napětí, které přesáhne určitou prahovou hodnotu, zvedne se hodnota hustoty náboje. Tato hodnota se zvýší u izolačního rozhraní, což je znázorněno na obrázku č. 17b, čímž se výrazně sníží odpor mezi source a drain elektrodou. V důsledku toho začne téct proud velmi tenkou oblastí, která se nazývá kanál. [17]



Obr. 17: Simulace hustoty náboje profilu pro p-kanál horní kontakt OFET $V_{DS} = -1$. a) $(V_{GS}-V_T)=0$; b) $(V_{GS}-V_T)=-1$. Obrázek znázorňuje pouze π -konjugovanou vrstvu, source a drain elektrody a izolátor, které jsou zde schematicky znázorněny pro lepší orientaci. (převzato z [17])

Z výše uvedených informací je zřejmé, že proces tvorby kapacitního kanálu je pro provoz tranzistoru rozhodující. Kapacitní efekt určuje hustotu náboje v kanálu a tím i prahovou hodnotu napětí (V_T), při které se stává vodivost významná (zapnutí). Vysvětlit funkci OFETs lze nejlépe pomocí jednoduchého kov-izolant-kov kondenzátoru, který je znázorněn na obrázku č. 18, kde je izolační vrstva uložena mezi dvěma kovovými elektrodami. V tomto případě, přivedené napětí prochází přes odporovou vrstvu oxidu, což vede k rovnoměrnému rozložení objemu pole o velikosti $E_{ins} = V/d_{ins}$. Náhlé změny elektrického pole v izolátoru z E_{ins} na nulu, mají svůj původ u kovových elektrod, které mají extrémně vysokou hustotu náboje na povrchu a jsou tvořeny z mizivě tenkých plechů. V OFETs je jedna elektroda vyrobena z polovodičového materiálu, kterou proniká elektrické pole, které závisí na hustotě náboje. Elektrické pole se stává stále významnějším a tím i náboj zabírá větší oblast v blízkosti rozhraní. V tomto případě, je část přivedeného napětí určena pro tvorbu této nábojové vrstvy (hloubka kanálu) a tím se

sníží napětí, které přechází přes izolátor a v důsledku toho se snižuje celkový náboj, který se hromadí na polovodičovém rozhraní (efektivní kapacita se snižuje). [17]



Obr. 18: Schématické srovnání mezi kov-oxid-kov a kov-izolátor-polovodič kondenzátorů. (převzato z [17])

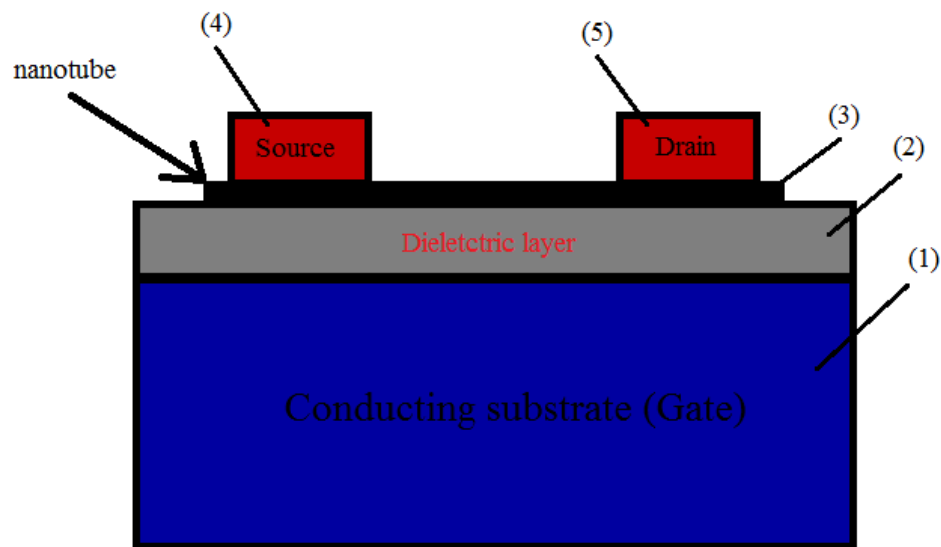
Tato kapitola popisuje funkci a strukturu OFET tranzistoru, který je založen na spolupráci kovových struktur s organickými. U dále popisovaných zařízení je princip velmi podobný s tím rozdílem, že organickou strukturu nahradíme uhlíkovými nanostrukturami, a to speciálně uhlíkovými nanotrubicemi nebo grafenem.

3.5 Uhlíkový nanotrubicový tranzistor řízený polem

Uhlíkový nanotrubicový tranzistor řízený polem obsahuje substrát, source elektrodu, drain elektrodu a uhlíkové nanotrubičky. Uhlíkové nanotrubičky tvoří kanál mezi source elektrodou a drain elektrodou. Tento tranzistor řízený polem obsahuje také řídicí elektrodu tedy gate, která je od uhlíkových nanotrubic oddělena malou vrstvou dielektrika a vstupní napětí je aplikováno na řídicí elektrodu. [18]

3.5.1 Uhlíkový nanotrubicový tranzistor řízený polem využívající back-gate geometrii

Obrázek č. 19 znázorňuje CNT-FET (Carbon nanotube field effect transistor), který obsahuje uhlíkové nanotrubice (3), které jsou naneseny na dielektrickou vrstvu (2), vrstva je tvořena například z oxidu křemičitého (SiO_2). Dielektrická vrstva (2) je nanesena na vodivém substrátu (1), který slouží jako řídicí elektroda. Vodivý substrát (1) může být zhotoven z křemíku (Si) nebo jiných typů vodivých materiálů. Source elektroda (4) a drain elektroda (5) se jako kontakty nanesou na uhlíkové nanotrubice (3). [18]



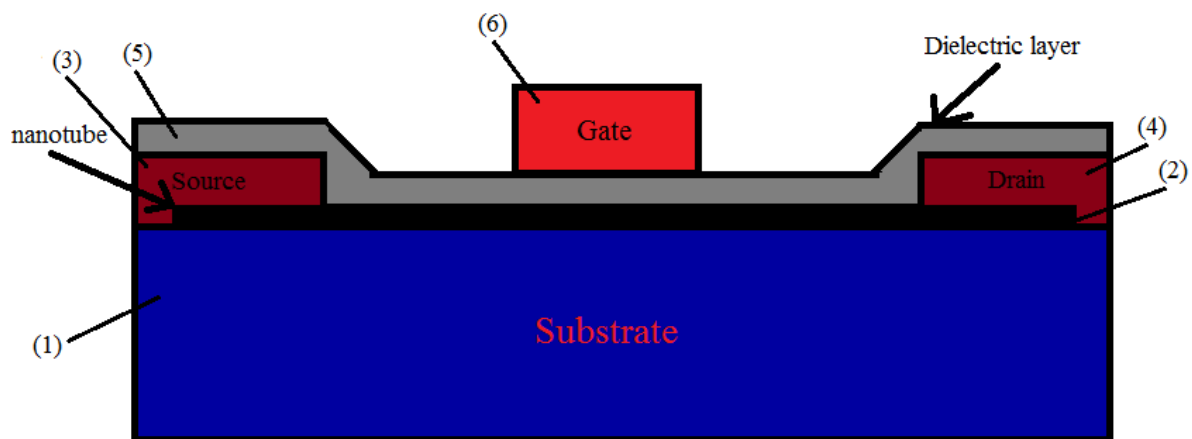
Obr. 19: Uhlíkový nanotrubicový tranzistor řízený polem využívající back-gate geometrii.

V provozu je napětí připojeno na source elektrodu (4) a na drain elektrodu (5). Po připojení teče napětí například ze source elektrody na drain elektrodu pomocí uhlíkových nanotubic (3). Napětí přivedené na řídicí elektrodu (1) moduluje proud, který teče přes uhlíkové nanotrubice. CNT FET s konfigurací back-gated pracuje dobře při stejnosměrném proudu (DC – direct current) a při frekvencích do 250 MHz. V této konfiguraci při zhotovení vodivého substrátu neboli řídicí elektrody například z křemíku (Si) je FET výkon omezen díky velkým gate-source a gate-drain kapacitám. Tyto velké parazitní kapacity mezi elektrodami mohou způsobit omezení rychlosti CNT FET. [18]

3.5.2 Uhlíkový nanotrubicový tranzistor řízený polem využívající top-gate geometrii

Obrázek č. 20 znázorňuje provedení vysokorychlostního CNT-FET se zabudovanými uhlíkovými nanotubicemi (2), které jsou naneseny na substrát (1). Substrát (1) může být

zhotoven z izolačního materiálu například z oxidu křemičitého (SiO_2) nebo může být zhotoven z vodivého materiálu, jako je například křemík (Si). Source elektroda (3) a drain elektroda (4) jsou naneseny na substrát. Z obrázku č. 20 je viditelné, že jsou tyto elektrody naneseny na substrát tak, aby zároveň vytvořily kontakt s uhlíkovými nanotrubicemi. Uhlíkové nanotrubice tedy tvoří vodivý kanál mezi těmito elektrodami. K propojení elektrod postačuje jedna uhlíková nanotrubice, ale můžeme použít i větší množství uhlíkových nanotrubic. Dodatečné uhlíkové nanotrubice se mohou ukládat na substrát v různých konfiguracích, a to například paralelně, křížově nebo dalšími možnými způsoby. Pokud je tedy na substrát naneseno více nanotrubic mohou nebo nemusí mít mezi sebou kontakt. Množství nanesených nanotrubic na substrát ovlivňuje šířku kanálu mezi elektrodami, šířka kanálu následně způsobuje například vyšší výstupní proud tranzistoru, čímž se zvyšuje trans-konduktance zařízení. Dielektrická vrstva (5) může být nanesena více způsoby. Na obrázku č. 20 je vidět, že je nanesena nejenom na uhlíkových nanotrubicích, ale i na elektrodách source a drain. Další možnost je nanést dielektrickou vrstvu pouze na uhlíkové nanotrubice a poslední možností je nanést dielektrickou vrstvu pouze na místo pod řídicí elektrodu (6). Řídicí elektroda neboli gate (6) může být nanesena jak na celý povrch uhlíkových nanotrubic nebo, jak je znázorněno na obrázku, pouze na jejich část nebo může být nanesena také na část elektrod source nebo drain, to však snižuje výkon zařízení. [18]



Obr. 20: Uhlíkový nanotrubicový tranzistor řízený polem využívající top-gate geometrii.

Substrát (1) může být vyroben z materiálů s nízkými RF (radiofrekvenčními) ztrátami, jako je safír (Al_2O_3), Galium Arsenid (GaAs), karbid křemíku (SiC), vysoko odporový Si nebo jejich kombinace. Dielektrická vrstva (5) může být také vyrobena z různých materiálů, jako jsou například oxid titaničitý (TiO_2), oxid zirkoničitý (ZrO_2), nitrid křemíku (Si_3N_4), oxid křemičitý (SiO_x) nebo jejich kombinací. Šířka dielektrické vrstvy (5) se může pohybovat od 1 nm až do 600 nm, zároveň má tato vrstva vysokou dielektrickou konstantu κ (relativní permitivita),

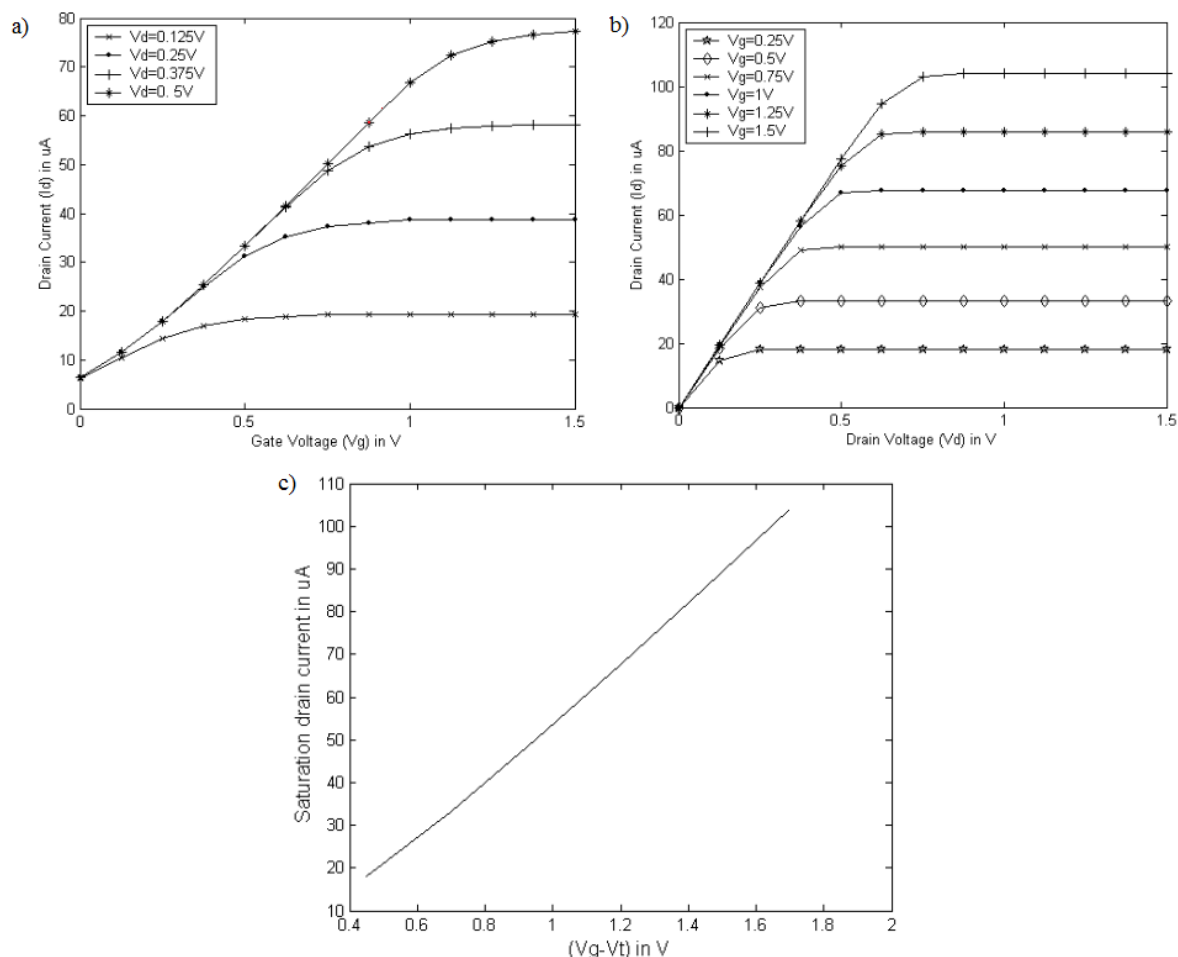
hodnota dielektrické konstanty dielektrické vrstvy se může pohybovat od 4 do 300. Použitím materiálů, které mají vysokou dielektrickou konstantu (TiO_2 , HfO_2 , ZrO_2 , Ta_2O_5 a BaSrTiO_3) lze zvýšit trans-konduktanci zařízení. Změnou tloušťky a dielektrické konstanty dielektrické vrstvy se mění parametry zařízení. [18]

Typ CNT-FET využívající top-gate geometrii, který je znázorněn na obrázku č. 20, může pracovat při vysokých rychlostech. Při působení vnějších vlivů jako jsou například radiové frekvence (RF), mikrovlnné frekvence a další, vykazuje zlepšení přenosu výkonu oproti konvenčním tranzistorům. Tento tranzistor také vykazuje frekvenční nezávislost výkonu pro frekvence dosahující až 23 GHz. Experimentální výpočty ukazují, že tranzistor může pracovat při rychlostech vyšších než 6 THz. [18]

V tomto provedení tranzistoru se tedy minimalizují parazitní kapacity mezi elektrodami gate-source a gate-drain, díky čemuž se maximalizuje provozní rychlost. V jednom provedení jsou k výrobě tranzistoru použity jednoděnné uhlíkové nanotrubic, které jsou naneseny na substrát (například Si) například za použití techniky depozic chemických par (CVD). CVD může být použita k uložení například nanotubic s průměrem 1,2 nm na RF kompatibilní křemíkové substráty, které zajišťují minimální ztráty na mikrovlnných frekvencích. Source a drain elektrody mohou být tvořeny ze dvou vrstev kovu a to například titanu a zlata, za použití standardního optického litografického lift-off procesu. Použitelné kovy na vytvoření elektrod tedy jsou titan (Ti), platina (Pt), zlato (Au), stříbro (Ag), hliník (Al) a jejich kombinace. Celková délka vodivého kanálu může být v CNT-FET přibližně 5 μm a řídicí elektroda pokrývá asi 1 μm . [18]

V tomto provedení tranzistoru přivedeme vstupní RF napětí (V_g) na řídicí elektrodu a stejnosměrný (DC) proud přivedeme na vodivý kanál, který je tvořen uhlíkovými nanotubicemi. Přivedením RF napětí se vytvoří výstupní RF napětí (V_{ds}) mezi source a drain elektrodou. Top-gate konfigurace CNT-FET, kde jsou uhlíkové nanotrubic naneseny na izolační substrát, funguje dobře při vysokých frekvencích. Při zvyšování frekvence vstupního RF napětí (V_g), CNT-FET udržuje stabilní výkonnost, a to až do frekvence 6 THz. Dále tato konfigurace tranzistoru minimalizuje parazitní kapacity a vodivé ztráty při vysokých frekvencích. Použití izolačních substrátů jako je například křemík podstatně snižuje ztráty způsobené mikro a mm frekvenčními vlnami. Navíc jsou křemíkové substráty potenciálně levnější a dostupnější než ostatní substráty, které jsou kompatibilní s RF. [18]

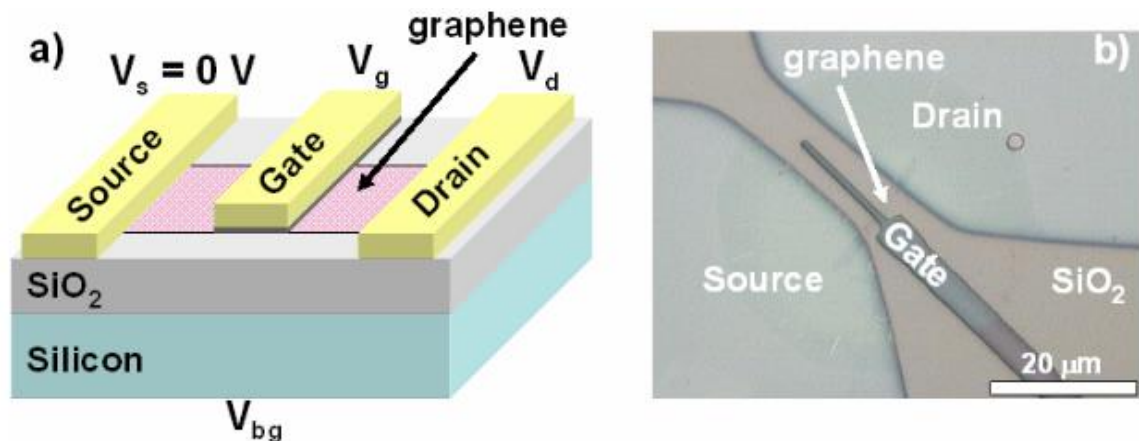
Na obrázku č. 21a je graf se závislostí výstupního proudu na vstupním napětí pro různé výstupní napětí. Na obrázku 21b je graf, kde je ukázána závislost výstupního proudu na výstupním napětí pro různé vstupní napětí. Z grafu je viditelné, že vzdálenosti mezi křivkami jsou téměř stejné, což znamená, že saturační proud vykazuje lineární závislost s $(V_g - V_t)$. Tato závislost je znázorněna na obrázku č. 21c. [19]



Obr. 21: a) Závislost výstupního proudu na vstupním napětí.; b) Závislost výstupního proudu na výstupním napětí.; c) Závislost výstupního saturačního proudu na $(V_g - V_t)$. (převzato z [19])

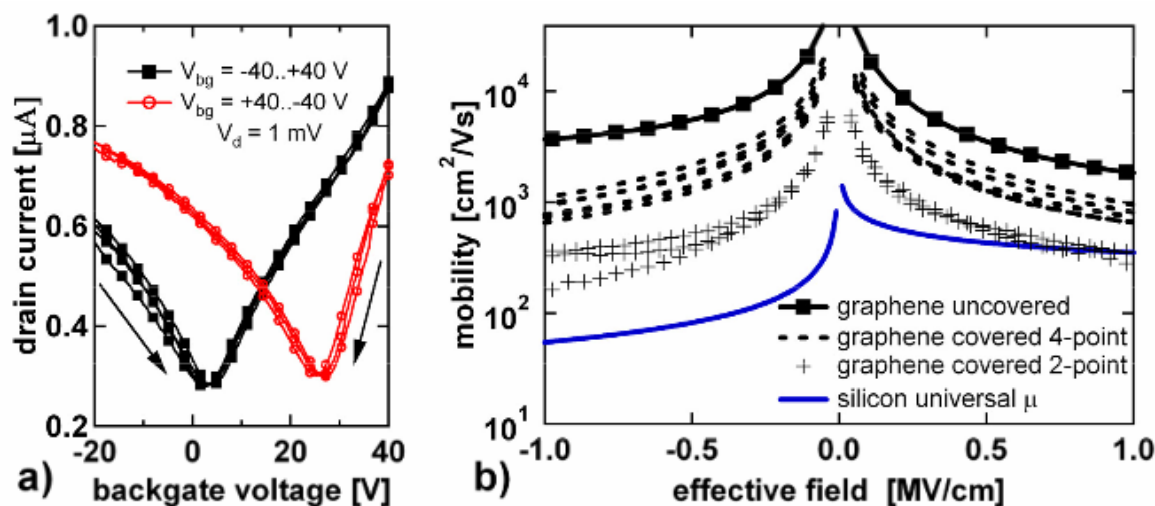
3.6 Grafenový tranzistor řízený polem

Obrázek č. 22a znázorňuje schéma grafenového tranzistoru řízeného polem (G-FET – graphene field effect transistor) včetně jeho horní řídicí elektrody (Gate), dielektrické vrstvy, source a drain elektrody. Obrázek č. 22b znázorňuje půdorys grafenového tranzistoru řízeného polem na oxidu křemičitém (SiO_2) zobrazeného pod optickým mikroskopem. Zhotovení G-FET se řídí podle standardní křemíkové technologie. Tento proces tedy zahrnuje použití fotolitografie nebo elektronické litografie, reaktivního iontového leptání a depozici tenkých vrstev pro dielektrickou vrstvu a kontakty. [20]



Obr. 22: a) Schématický průřez G-FET; b) Optický pohled shora pod mikroskopem na G-FET (převzato z [20])

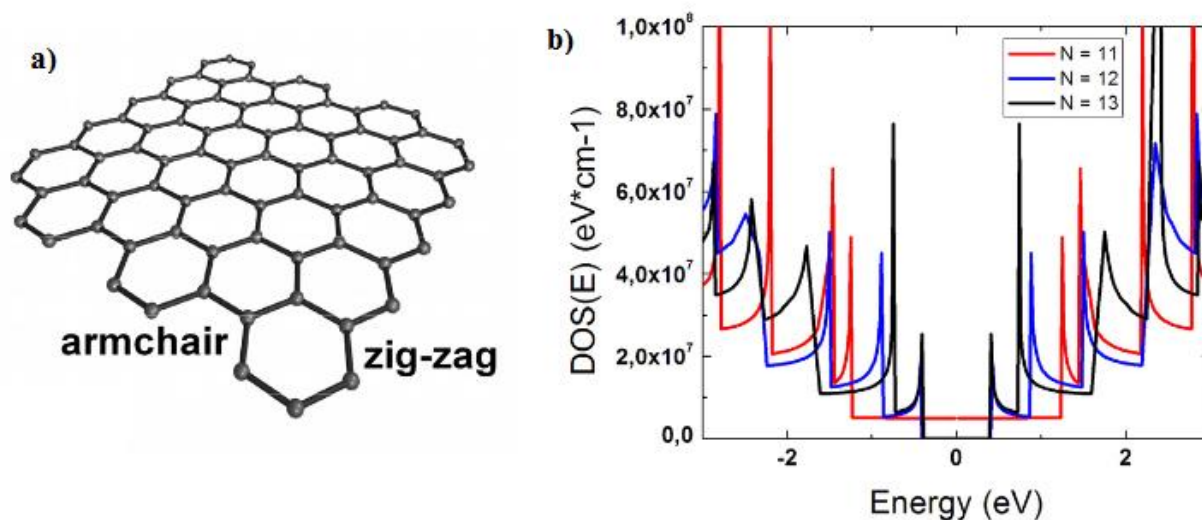
Přenosová charakteristika (závislost drain proudu I_d na back gate napětí V_{bg}) typického grafenového tranzistoru je znázorněna na obrázku č. 23a. Absence energetického zakázaného pásu ($E_g = 0$ eV) výrazně omezuje modulační proud v G-FET. Ve skutečnosti byla u modulačního proudu dosažena nejlepší hodnota asi 30 A, a to při měření v kryogenních teplotách. Grafenové tranzistory vedou značný proud i ve svém bodě s minimální vodivostí, který je označován jako Dirakov bod, což brání tomu, aby nahradily křemíkové MOSFETs v budoucích typech CMOS logických obvodů. Obrázek č. 23a dále ukazuje hysterezi napětí na back gate elektrodě měnícího se z negativního na pozitivní směr a naopak. K tomuto typickému chování dochází i navzdory měření ve vakuových podmínkách ($P = 5 \times 10^{-3}$ mbar) a je silným ukazatelem nabitých částí v blízkosti rozhraní mezi grafenem a izolátorem. Zatímco u grafenu, který byl na substrát nanesen a ne na něm vytvořen, měřeném v ultra vysokých vakuových podmínkách bylo prokázáno, že má pohyblivost přesahující 200 000 cm²/Vs, reálné G-FETs jsou omezeny výkonově díky substrátu a horní gate elektrodě. Nicméně pohyblivost nosičů v horní gate elektrodě zařízení převyší pohyblivost nosičů v křemíku a jsou typicky v řádu několika stovek až tisíců cm²/Vs, i když rozhraní mezi grafenem a izolátorem nebyly ještě vůbec optimalizovány. Obrázek č. 23b znázorňuje elektronovou a děrovou pohyblivost získanou z několika zařízení, a to jak 2-bodových, tak 4-bodových měřících konfigurací. [20]



Obr. 23: a) Závislost I_d na U_{bg} u G-FET. Změna směru má za následek značnou hysterezi $\Delta V = 22 \text{ V}$.; b) Závislost pohyblivosti na elektrickém poli v G-FET. Pokrývání grafenu dielektrickou vrstvou vede ke snížení pohyblivosti. Kontakty mají značný vliv na G-FET. Univerzální pohyblivost křemíku zahrnuta jako reference. (převzato z [20])

3.7 Grafenový nanoribbon tranzistor

Potenciální metoda k vytvoření zakázaného pásu v grafenu spočívá v rozložení do úzkých pásů menších než několik desítek nanometrů (grafenové nanoribbons neboli grafenové nanopásky, GNRs). Nicméně GNRs se dělí do dvou typů dle zakončení pásů, které můžeme vidět na obrázku č. 24a, první typ je "armchair" a druhý typ "zig-zag". Oba typy GNRs mohou být polovodičového nebo vodivého typu. U pásů se zakončením "armchair" přechod od dvourozměrného (2D) grafenu na jednorozměrný (1D) GNRs vede ke kvantovému omezení a zakázanému pásu, který je zhruba nepřímo úměrný šířce nanopásů ($E_g \sim 1/W$) podle simulací. Dále se předpokládá, že přesná velikost zakázaného pásu je závislá na počtu N atomů uhlíku napříč pásem. Tento postup je znázorněn na obrázku č. 24b, kde je závislost simulované hustoty stavů (DOS – density of states) na energii pro tři zakončení "armchair" GNRs s $N = 11, 12$ a 13 atomů napříč šířkou GNRs. Zatímco GNRs s $N = 11$ jsou vodivé, pásy s $N = 12$ a 13 atomy jsou polovodičové. V případě GNRs se zakončením "zig-zag" je situace komplikovanější. Bylo dokázáno, že lokalizované stavy v blízkosti Fermiho hladiny vedou k vodivému chování bez ohledu na počet atomů uhlíku. Na druhé straně bylo vypočteno, že magnetizace způsobuje střídavý sub-mřížový potenciál na grafenové mřížce, který indukuje zakázaný pás. Prozatím jsou tyto tranzistory v raném vývojovém stádiu. [20]



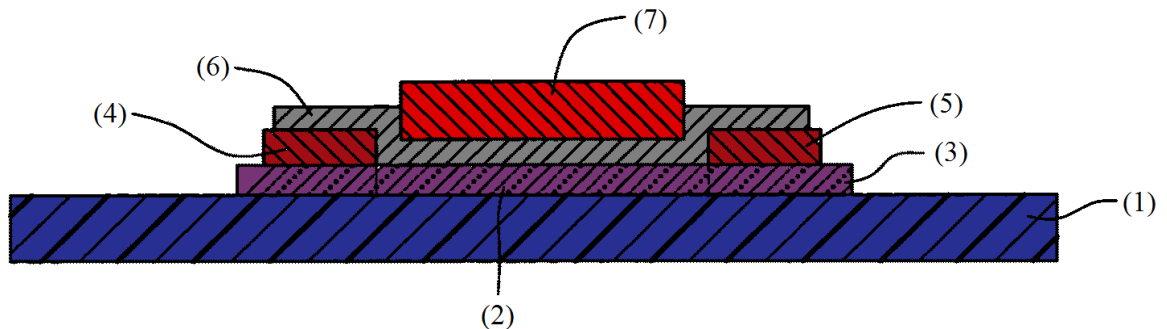
Obr. 24: a) Znárodněna mřížka grafenu, kde jsou označeny typy "armchair" a "zig-zag"; b) Závislost simulované hustoty stavů (DOS) na energii pro tři různé "armchair" GNRs. (převzato z [20])

3.8 Tenkovrstvý tranzistor

Tento tranzistor provádí spínání modulací množstvím nosičů nahromaděných na rozhraní mezi izolační a polovodičovou vrstvou, a to ze stavu nabitého do stavu vyčerpaného a s přivedeným napětím na řídicí elektrodu se mění množství proudu procházejícího mezi source a drain elektrodou. Obvykle je polovodičová vrstva tvořena materiály jako jsou amorfnní křemík (a-Si), poly-křemík (p-Si) nebo organický polovodičový materiál. Izolační vrstva je z materiálů nitridu křemíku (Si_3N_4) nebo oxidu křemičitého (SiO_2). Materiály, které se používají na source, drain elektrody a řídicí elektrodu jsou kovy nebo slitiny. Nicméně konvenční tenkovrstvé tranzistory nejsou flexibilní, a tudíž nevhodné pro použití ve flexibilní elektronice. Dále jsou řídicí source a drain elektrody vyrobené z kovů nebo slitin, které se roztaví při vysokých teplotách. Proto tenkovrstvé tranzistory nemohou být použity v extrémních podmínkách a prostředích. [21]

Obrázek č. 25 znázorňuje právě tuto strukturu. Izolační substrát (1) může být vyroben stejně jako substrát desky s tištěnými spoji z pevných materiálů, jako jsou například p-typ nebo n-typ křemíku, křemík s vrstvou oxidu křemičitého nebo mohou být použity i flexibilní materiály, jako například plast nebo pryskyřice. Tvar a velikost izolačního substrátu je libovolná. Více tenkovrstvých tranzistorů může být uloženo na izolačním substrátu (1) a tím se vytvoří tenkovrstvý tranzistorový panel. Polovodičová vrstva (3) může být tvořena z amorfnního křemíku (a-Si), poly-křemíku (p-Si), organického polovodičového materiálu nebo

z polovodičových uhlíkových nanotrubic. V tomto provedení je tvořena polovodičová vrstva z uhlíkových nanotrubic. [21]



Obr. 25: Příčný řez tenkovrstvým tranzistorem s top-gated strukturou (převzato z [21])

Polovodičová vrstva tvořená uhlíkovými nanotrubicemi obsahuje množství jednostěnných a dvoustěnných nanotrubic nebo jejich kombinaci. Průměr jednostěnných nanotrubic se pohybuje v rozmezí přibližně 0,5 - 5 nm. Průměr dvoustěnných uhlíkových nanotrubic se pohybuje v rozmezí 1 - 50 nm. Konkrétně polovodičová vrstva tvořená uhlíkovými nanotrubicemi může být pouze CNT-filmem nebo může obsahovat množství navrstvených CNT-filmů. CNT-film je tvořen početnou sítí uhlíkových nanotrubic, které jsou buď uspořádány, nebo nemusí být uspořádány, ale musí mít stejnou tloušťku. V neuspořádaném CNT-filmu jsou uhlíkové nanotubice neuspořádané nebo izotropní. V uspořádaném CNT-filmu jsou uhlíkové nanotubice primárně orientovány podél paralelního směru k povrchu každého CNT-filmu. CNT-film má větší množství uhlíkových nanotrubic spojených svými konci pomocí Van der Waalovi přitažlivé síly. Když vrstva vytvořená z uhlíkových nanotrubic obsahuje větší množství uspořádaných CNT-filmů, mohou být uhlíkové nanotubice v různých filmech vyrovnány podél stejného směru nebo podél paralelního směru. Úhel α mezi směry zarovnání uhlíkových nanotrubic v každých dvou sousedních fóliích se pohybuje v rozmezí od 0° do 90° . [21]

Délka polovodičové vrstvy (3) může být v rozmezí přibližně od 1 μm do 100 μm , její šířka se pohybuje v rozmezí 1 μm až 1 mm a její tloušťka se pohybuje v rozmezí přibližně 0,5 nm až 100 μm . Délka kanálu (2) se pohybuje v rozmezí od 1 μm do 100 μm a šířka je v rozmezí 1 μm až 1 mm. Materiál izolační vrstvy (6) může být z tuhého materiálu (nitrid křemíku (Si_3N_4), oxid křemičitý (SiO_2)) nebo z ohebného materiálu (polyethylen tereftalát (PET), benzocyclobutenes (BCB) nebo akrylové pryskyřice). Tloušťka izolační vrstvy (6) může být v rozmezí přibližně od 5 nm do 100 μm . [21]

4 Porovnání součástek na bázi uhlíkových nanostruktur s konvenčními součástkami

Proč vůbec po objevení různých uhlíkových nanostruktur vznikly pokusy integrovat je do elektronických součástek? Odpovědí je skutečnost, která je založená na faktech výzkumu a vývoje konvenčních součástek, které jsou dnes na takové úrovni, že fyzikální možnosti těchto součástek jsou na svých mezích, tedy v podstatě již neexistuje velké množství možností, jak je zdokonalovat.

Z hlediska výkonosti jsou konvenční součástky omezeny frekvenčně, napět'ově i proudově, a to díky svým fyzikálním vlastnostem, zejména díky pohyblivosti náboje uvnitř jejich struktur a tepelné vodivosti. Proto jsme dnes při sestavování mikroprocesorů, hybridních obvodů a mnoha dalších zařízení omezeni teplotně. Součástky a jejich struktury nemají dostatečnou tepelnou vodivost na to, aby se byly schopny chladit ve větším množství nebo ve stísněnějších prostorech. Jejich aplikace je omezena možností uchladiť je natolik, aby nebyly tepelně poškozovány nebo dokonce vyřazeny z provozu. Nové součástky na bázi uhlíkových nanostruktur ukazují, že jejich vlastnosti budou umožňovat tyto meze překročit, a to ve všech dosud zmíněných směrech. Mez jejich frekvence byla při experimentech stanovena až na hodnotu překonávající THz hranici, následně i proud s napětím se mohou vyšplhat do vyšších řádů než u konvenčních součástek. Tyto vlastnosti umožňuje jejich velice dobrá vodivost elektrického náboje a jejich výborná tepelná vodivost, kterou umožňují nové uhlíkové nanostruktury. Díky tomu jsou součástky schopné uchladiť samy sebe daleko lépe než součástky konvenční, což by umožňovalo vytvářet zařízení s mnohem větším uskupením součástek, které se budou schopny uchladiť i v úzkých prostorech, díky jejich velmi dobré tepelné vodivosti.

Další z hlavních výhod uhlíkových nanostruktur je jejich flexibilita a stabilita, kdy součástky z nich vyrobené, by měly mít větší rozsah použitelnosti než součástky konvenční. Jedna z největších dosavadních nevýhod konvenčních součástek se skrývá v tom, že se již dají jen velmi těžko zmenšovat jejich rozměry. V podstatě konvenční součástky jsou na své rozměrové hranici, tento problém je dán jejich fyzikálními vlastnostmi. Konvenční součástky potřebují ke svojí funkci Fermiho hladinu, ta byla v dnešní době zmenšena na takovou úroveň, že již její zmenšení není téměř možné na úkor funkčnosti součástek. Pokud by se zmenšila pod danou úroveň, součástky by nadále nesplňovaly svojí hlavní funkci. Již počáteční výzkumy a testy ukazují, že součástky na bázi uhlíkových nanostruktur budou schopny tuto hranici

překonat, což umožní vyrábět součástky v menších velikostech než dosavadní konvenční součástky, čímž se zvýší výkon dosavadních zařízení nebo se zmenší jejich stávající velikost.

Co se týče výroby porovnávaných součástek, je opět z nových výzkumů a výroby uhlíkových nanosoučástek viditelné, že by výroba měla být jednodušší než výroba dosavadních součástek. K čemuž přispívá fakt, že uhlíkové nanostrukturny mohou být pěstovány na substrátech a poté použity k výrobě pouze jejich přenesením na vybrané součástky. Další výhoda tohoto oboru dnes spočívá ve velmi probírané finanční stránce věci, kde by měla být hromadná výroba součástek na bázi uhlíkových nanostruktur levnější než hromadná výroba dnešních konvenčních součástek. Prozatím je tento fakt potvrzen pouze v případech, kdy jsou součástky vyráběny ve stejných velikostech, protože při výrobě součástek na bázi uhlíkových nanostruktur, které dosahují rozměrově menších hodnot než dosavadní konvenční součástky, je výroba mnohem složitější a tedy i cenově náročnější.

Ovšem, pokud se budou porovnávat tyto dvě součástky mezi sebou, vyjdou stále ve výsledku lépe konvenční součástky a to z důvodu, že jejich vlastnosti, struktury a techniky výroby jsou dokonale poznané a pomocí dlouhodobých výzkumů optimalizované do dnes známých mezí. Kdežto součástky na bázi uhlíkových nanostruktur jsou pouze na svém počátku vývoje a vše co se o nich zjistilo a to, na co by mohly být použity, bylo vyzkoušeno a změřeno pouze v laboratorních podmínkách. I tak se však ukazují v natolik dobrém světle, že ve svých počátcích překonávají svoje předchůdce. Jejich hromadná výroba a uvedení na trh nejsou prozatím možné, proto jsou konvenční součástky stále nejdůležitějšími a nejvýhodnějšími stavebními prvky dnešní elektroniky.

Jedna z největších otázek dnešní doby, týkající se počítačové techniky, se pohybuje v oboru mikroprocesorů, kde nyní jejich vývoj zásadně zpomalil, již zmiňovaný problém s velikostí konvenčních součástek, díky němuž dle očekávání nebude možno zvyšovat počet tranzistorů na mikročipech. S řešením tohoto problému přišla nedávno firma IBM, která oznámila, že by měla mít funkční prototyp mikroprocesoru s tranzistory na bázi uhlíkových nanostruktur, tedy přesněji tranzistory s uhlíkovými nanotrubicemi do roku 2020.

Závěr

Tuto práci jsem si vybral z důvodu rozšíření vědomostí v zadané problematice, která zde pojednává o novodobých uhlíkových nanostrukturách zaváděných do elektroniky, kde se nám díky jim otevírají nové možnosti k tvorbě zcela nových a průlomových zařízení nebo ve zdokonalování stávajících, která s dnešními konvenčními součástkami dosahují téměř svého maxima.

Nanotechnologie ve spojení s uhlíkem je dnes prozatím v rané fázi, ale i tak se jejich nově objevené výborné vlastnosti ukazují ve velmi dobrém světle. Objevení uhlíkových nanotrubic a jejich základu grafenu přináší v této době nové možnosti a vylepšení v mnoha oborech nejenom v elektrotechnice, ale i ve zdravotnictví, stavebnictví a dalších oborech. Ve své podstatě tento objev otevřel dveře pro zdokonalení odvětví dnešní vědy, které může přinést naprosto novou a převratnou evoluci téměř ve všech odvětvích.

V této práci zabývající se problematikou elektronických součástek na bázi uhlíkových nanostruktur, je jasně viditelný pokrok, kdy součástky tvořené touto strukturou dosahují v některých případech lepších vlastností než dnešní konvenční součástky. Jejich problematika není samozřejmě prozatím dokonale zvládnuta a popsána, vše je zatím ve svých počátcích, ale i tak je jejich přínos do moderní techniky zřejmý, protože jsou uhlíkové nanosoučástky na počátku svého vývoje, konvenční součástky stále vítězí.

Dokonalé poznání a zvládnutí problematiky součástek na bázi uhlíkových nanostruktur bude trvat ještě nějaký čas. Pokud budeme do této problematiky pronikat a poznávat všechny její vlastnosti, čímž se budeme pomalu blížit k jejím mezím, budou se nám otevírat stále nové možnosti, jak zlepšovat či objevovat nová a lepší zařízení, která nám budou opět dále umožňovat pokrok v dnes poznaných, či prozatím nepoznaných oborech vědy.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] **Kubínek, Roman a Stránská, Vendula.** *Úvod do problematiky nanotechnologií.* Dostupné z: [<http://exfyz.upol.cz/didaktika/oprlz/nanotechnologie.pdf>]
- [2] **FENIX.** *laminaty pro architektky.* [Online] Schneedorfer Technologies, 2016. [Citace: 14. 4 2016.] Dostupné z: <http://www.laminatyproarchitekty.cz/arpa/fenix.aspx>.
- [3] **Rafael.** Nanotechnology Applications for Electronics. Part 1-Introduction. *BRIGHT HUB ENGINEERING.* [Online] RC Davison, 9. 7. 2009. Dostupné z: <http://www.brighthubengineering.com/diy-electronics-devices/7761-nanotechnology-applications-for-electronics-part-one-introduction/>.
- [4] **Grégr, Jan.** *Moderní pohled na formy a modifikace uhlíku.* Liberec : Technická univerzita v Liberci. Dostupné z: [http://centrum.tul.cz/centrum/centrum/3Aplikace/3.2_publikace/\[3.2.51\].pdf](http://centrum.tul.cz/centrum/centrum/3Aplikace/3.2_publikace/[3.2.51].pdf)
- [5] **Prášek, Jan.** *Uhlíkové nanočástice: Grafen, nanotrubičky, fullereny.* Brno : NANOTEAM, 2011. cz.1.07/2.3/00/09.0224. Dostupné z: <http://www.umel.feec.vutbr.cz/nanoteam/data/soubory/CTN,%20grafen,%20fullerenCNTs+grafen+fullereny.pdf>
- [6] **Saito, Riichiro, Dresselhaus, Gene a Dresselhaus, Mildred S.** *Physical properties of carbon nanotubes.* London : Imperial College Press, c1998. ISBN 18-609-4093-5.
- [7] Hybridizace. *Moxo.com.* [Online] Studiumchemie. Dostupné z: www.chemvazba.moxo.cz/Lekce/lekce7.html.
- [8] **Hauer, Tomáš.** Úvod do organické chemie. *slideplayer.* [Online] 2013. [Citace: 14. 4 2016.] Dostupné z: <http://slideplayer.cz/slide/2876966/#>.
- [9] **Boundless.** Properties of Carbon. *Boundless.com.* [Online] 21. Červenec 2015. Dostupné z: <https://www.boundless.com/chemistry/textbooks/boundless-chemistry-textbook/nonmetallic-elements-21/carbon-150/properties-of-carbon-579-3570/>.
- [10] **Fuente, Jesus de La.** Graphenea. *Graphenea.com.* [Online] CEO Graphenea, 26. Únor 2014. Dostupné z: <http://www.graphenea.com/pages/graphene-properties#VxyRGXqcM9q>.
- [11] **Mckenzie, Ross H.** Students should learn the method of steepest descent. *Condensed concepts.* [Online] Posts (Atom), 30. 4 2013. [Citace: 20. 4 2016.] Dostupné z: http://condensedconcepts.blogspot.cz/2013_04_01_archive.html.
- [12] **Luican-Mayer, Adina a Andrei, Eva Y.** *Probing Dirac Fermions in Graphene by Scanning Tunneling Probes.* Dostupné z: [<http://www.physics.rutgers.edu/~eandrei/DF-13.pdf>] Piscataway : Rutgers University. NJ 08854.
- [13] **Pop, Eric, Varshney, Vikas a Roy, Ajit K.** *Thermal properties of graphene: Fundamentals and applications.* Dostupné z: [<https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1301/1301.6181.pdf>] MRS Bulletin, 2012. 1273-1281.
- [14] **Cobas, Enrique a Fuhrer, Michael S.** *Microwave Rectification by a Carbon Nanotube Schottky Diode.* Dostupné z: [<https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/0805/0805.1899.pdf>] Maryland : University of Maryland. MD 20742-4111.
- [15] **Liu, Chang-Hua, Wu, Chung-Chiang a Zhong, Zhaohui.** *A Fully Single-Walled Carbon Nanotube Diode.* Dostupné z: [<https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1012/1012.2410.pdf>] Michigan : University of Michigan. 48109.
- [16] **Sinha, Dhiraj a Lee, Ung.** *Ideal Graphene/Silicon Schottky Junction Diodes.* Dostupné z: [<https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1405/1405.3954.pdf>] New York : College of Nanoscale Science and Engineering. NY-12203.
- [17] **Tessler, Nir a Roichman, Yohai.** *Organic Field Effect Transistors.* Dostupné z: [http://webee.technion.ac.il/labs/orgelect/Info_Files/Transistors_tutorial_Nir_Tessler.pdf] Israel : Israel Institute of Technology. Haifa 32000.

- [18] **Pesetsky, Aaron Anthony, a další, a další.** Carbon nanotube field effect tranzistor. [Online] 11. 5 2010. Dostupné z: <https://www.google.com/patents/US7714386>. US7714386 B2.
- [19] **Sahoo, Rasmita a Mishra, R. R.** *Carbon Nanotube Field Effect Tranzistor: Basic Characterization and Effect of High Dielectric Material*. Dostupné z: [<http://ijrte.academypublisher.com/vol02/no07/ijrte02074042.pdf>] Pilani : Birla Institute of Technology and Science, 2009.
- [20] **Lemme, Max C.** *Current Status of Graphene Transistors*. Dostupné z: [<https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/0911/0911.4685.pdf>] Cambridge : Harvard University. MA02138.
- [21] **Jiang, Kai-Li, Li, Qun-Qing a Fan, Shou-Shan.** Thin film transistor. *Patenty*. [Online] Tsinghua University, 24. 5 2011. Dostupné z: <https://www.google.com/patents/US7947977>. US 7947977 B2.