

Multifunkční kompozit na bázi uhlíkových nanotrubic a jeho aplikace jako senzorického členu a antény

Polášková Kristýna

Bakalářská práce
2013



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav inženýrství polymerů

akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Kristýna Polášková**

Osobní číslo: **T11546**

Studijní program: **B2808 Chemie a technologie materiálů**

Studijní obor: **Chemie a technologie materiálů**

Forma studia: **kombinovaná**

Téma práce: **Multifunkční kompozit na bázi uhlíkových nanotrubic
a jeho aplikace jako senzorického členu a antény**

Zásady pro vypracování:

Vypracování literární rešerže na dané téma.

Návrh, analýza a optimalizace multifunkčního kompozitu na bázi uhlíkových nanotrubic.

V praktické části vyhodnocení možností využití kompozitu.

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. **Carbon Nanotube Thin Films: Fabrication, Properties, and Applications** Liangbing Hu,* David S. Hecht, and George Gruner*
2. **Rupesh Khare***, Suryasarathi Bose, **Carbon Nanotube Based Composites- A Review**
3. **Peter J.F. Harris**, **Carbon nanotube science**, Cambridge university press 2009

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Robert Olejník

Centrum polymerních materiálů

Datum zadání bakalářské práce:

11. února 2013

Termín odevzdání bakalářské práce:

31. května 2013

Ve Zlíně dne 11. února 2013


doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan




doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
ředitel ústavu

Příjmení a jméno: POLAŠKOVÁ KRISTÝNA

Obor: CHEMIE A TECHNOLOG.
MATERIÁLŮ

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 24.5.2013

Polásková

¹⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevdělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

²⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

³⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Cílem bakalářské práce je příprava senzorů z uhlíkových nanotrubic. Ty jsou pro zlepšení vlastností oxidovány. To nám na jejich povrch umožní navázání karbonylových a karboxylových funkčních skupin, které nám zlepší jejich citlivost. Následně byla pomocí vakuové filtrace přes polyuretanovou membránu z nanovláken vytvořena síť nanotrubic. Ty jsou vloženy do par etanolu a heptanu. Cílem měření je zjistit citlivost senzorského členu. Měřením byla zjištěna citlivost používaného materiálu. U materiálu, který byl vložen do polárních par etanolu, citlivost stoupala v pořadí China, China-HCl, China-piraňa a China-HNO₃. U nepolárních par heptanu citlivost ve stejném pořadí klesala.

Další možnosti používaného materiálu jsou multifunkční kompozity, jako je například anténa pro příjem signálu. V našem případě jsme zjistili, že anténa ze sítě uhlíkových nanotrubic bude přijímat signál na frekvenci 1,284 GHz při zisku -11,48 dB.

Klíčová slova: Uhlíkové nanotrubic, vakuová filtrace, detekce par, anténa

ABSTRACT

The aim of this Bachelor thesis is the preparation of sensors from carbon nanotubes. The nanotubes are oxidized to improve their properties. The oxidation enables to bind carbonyl and carboxyl functional groups, which will increase the sensitivity of the nanotubes. Subsequently, by using vacuum filtration through a polyurethane membrane from nanofibres, a nanotube network is made. This network is positioned into ethanol and heptane vapours. The aim of the measuring is to discover the sensitivity of the sensory element. The measuring discovered the sensitivity of the used material. When the material was positioned to polar vapours of ethanol, the sensitivity was increasing in the following order: China, China-HCl, China-piranha, and China-HNO₃. When non-polar vapours of heptane were applied, the sensitivity was decreasing in the same order.

The used material may be applied further to multifunctional composites, e. g. an antenna to receive signals. In our study we discovered that an antenna made from a carbon nanotube network is able to receive signals of the frequency 1.284 GHz, gaining 11.48 dB.

Key words: Carbon nanotubes, vacuum filtration, vapour detection, antenna

Tímto bych chtěla poděkovat CPS a mému vedoucímu práce Ing. Robertu Olejníkovvi, jehož rada a pomoc mi byla velkým přínosem a pochvala byla impulzem do další práce. Dále bych chtěla poděkovat panu Ing. Jiřímu Matyášovi za analýzu vzorků pro antény a panu Ing. Davidovi Petrášovi za výrobu polyuretanové filtrační membrány.

Čestně prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné. Dále prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracovala samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce a všechny materiály jsou citované.

OBSAH

ÚVOD.....	9
I TEORETICKÁ ČÁST.....	10
1 ELEKTROSTATICKÉ ZVLÁKŇOVÁNÍ.....	11
2 UHLÍKOVÉ NANOTRUBICE.....	14
2.1 VÝROBA.....	15
2.2 STRUKTURA.....	18
2.3 VLASTNOSTI.....	19
2.4 DEFEKTY UHLÍKOVÝCH NANOTRUBIC.....	21
2.5 DISPERZE UHLÍKOVÝCH NANOTRUBIC.....	23
2.6 FUNKCIONALIZACE.....	23
3 CHARAKTERIZACE UHLÍKOVÝCH NANOTRUBIC.....	26
3.1 TRANSMISNÍ ELEKTRONOVÁ MIKROSKOPIE (TEM).....	26
3.2 SKENOVACÍ ELEKTRONOVÁ MIKROSKOPIE (SEM).....	27
3.3 INFRAČERVENÁ SPEKTROSKOPIE (IR).....	27
3.4 RAMANOVA SPEKTROSKOPIE.....	28
3.5 RENTGENOVÁ DIFRAKCE (XRD).....	29
4 SÍŤ UHLÍKOVÝCH NANOTRUBIC.....	30
4.1 VZNIK.....	30
4.2 VLASTNOSTI.....	33
4.3 POUŽITÍ.....	34
5 DETEKCE PAR.....	37
5.1 DETEKCE NA PÁRY.....	37
5.2 PRINCIP.....	37
5.3 POUŽÍVANÉ PLYNY.....	38
II PRAKTICKÁ ČÁST.....	40
6 CÍLE PRÁCE.....	41
7 PŘÍPRAVA MATERIÁLU.....	42
7.1 ELEKTROSTATICKÉ ZVLÁKŇOVÁNÍ.....	42
7.2 OXIDACE UHLÍKOVÝCH NANOTRUBIC.....	43
7.3 PŘÍPRAVA DISPERZE Z UHLÍKOVÝCH NANOTRUBIC.....	44
8 ODEZVY NA ORGANICKÉ PÁRY.....	45
9 MĚŘENÍ ANTÉNY.....	49
10 MĚŘENÍ A VÝSLEDKY.....	52
10.1 ANALÝZA SEM MIKROSKOPEM.....	52
10.2 OBSAH KYSLÍKU.....	53
11 POUŽÍVANÉ MATERIÁLY A PŘÍSTROJE.....	56
ZÁVĚR.....	61
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	62
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	67
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	71
SEZNAM TABULEK.....	74

ÚVOD

Uhlíkové nanotrubicе poprvé popsal Iijima v roce 1991 a po něm přišli se stejnými poznatky další vědci. Jejich objev je považovaný jako významný krok pro vědu a brzy se staly oblíbeným materiálem pro výzkum. Jejich výroba je možná několika způsoby, nejčastější z nich jsou obloukový výboj, laserová ablace a chemická depozice par (CVD).

Uhlíkové nanotrubicе se vyznačují velmi vysokým poměrem (délka x šířka) a projevují se velmi velkou plochou povrchu [1]. Májí unikátní vlastnosti, které umožňují široké využití. Jedna z nich je jejich schopnost prostorového růstu, tzv. "Nanotube wire", ale ani elektrické a mechanické vlastnosti nejsou zanedbatelné. To vše umožňuje jejich použití v nejrůznějších oblastech výzkumu a výroby. Polovodivé nanotrubicе mohou tvořit základ pro extrémně malé, rychlé a flexibilní tranzistorové obvody. Tranzistory s chemicky upravenými uhlíkovými nanotrubicemi (CNTs) jsou používány jako citlivé a výběrové chemické a biologické senzory [2]. Také se dají využít pro: nanoelektroniku, senzory, emisní pole, displeje, skladování vodíku, baterie, polymerní kompozity a elektrody [3].

Náš zájem o uhlíkové nanotrubicе souvisí především s výrobou kompozitu, jako materiálu vhodného pro výrobu senzorů a jejich detekci na organické páry. Možná je také výroba multifunkčních kompozit s dalšími možnými aplikacemi. Jedna z nich je výroba antén. To úzce souvisí s možností síťování a výrobou vodivých vrstev. My jsme je vyrobili metodou vakuové filtrace přes membránu. Vznikl nám dokonalý homogenní disk, jakožto vhodný výchozí materiál pro další použití.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 ELEKTROSTATICKÉ ZVLÁKŇOVÁNÍ

Elektrostatické zvlákňování je účinná technika pro zhotovení polymerních nanovláken. Různé polymery byly rozpuštěny v roztoku nebo v tavenině elektricky stočeny do extrémně čistých vláken. Potenciál aplikace založený na takových vláknech byl zjištěn k jejich užívání jako výztuhy ve vývoji nanosložení. Tyto výjimečné vlastnosti dělají z polymerních nanovláken optimální kandidáty pro mnoho důležitých aplikací. Pro jejich přípravu se používá celá řada výrobních technik jako tažení, šablonová syntéza, fázové dělení, vtírání, elektrostatické zvlákňování. [4]

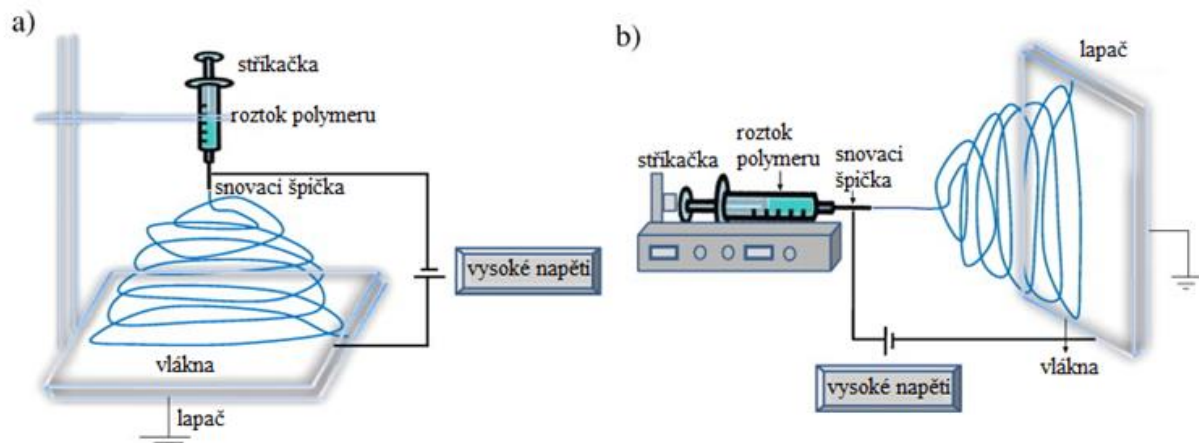
Šablonová syntéza se využívá k výrobě pevných (vlákénka) nebo dutých (trubička) tvarů nanovláken skrz nanopropustnou membránu, která slouží jako šablona. Důležité je, že nanometr trubičky nebo vlákénka může být vytvořený z různých surovin, jako jsou elektronicky vodivé polymery, kovy, polovodiče a uhlíky. Na druhé straně, metoda nemůže vytvořit souvislá nanovlákná z jednoho vlákna.

Fázové dělení záleží na rozpuštění, gelovatění, extrakci použitím jiného rozpouštědla, tuhnutí a sušení a má za následek nanoscale pórovitou pěnu. Proces převedení pevného polymeru do nano-pórovité pěny je časově náročný. Sestavování je proces, ve kterém se jednotlivé, preexistující složky organizují do požadovaných vzorů a funkcí. Sestavovací fázové dělení je časově náročné pro zpracování souvislých polymerních nanovláken.

Elektrostatické zvlákňování je pravděpodobně jediná metoda, která podporuje vývoj hromadné výroby ze souvislého nanovlákná z různých polymerů. [4]

Proces elektrostatického zvlákňování

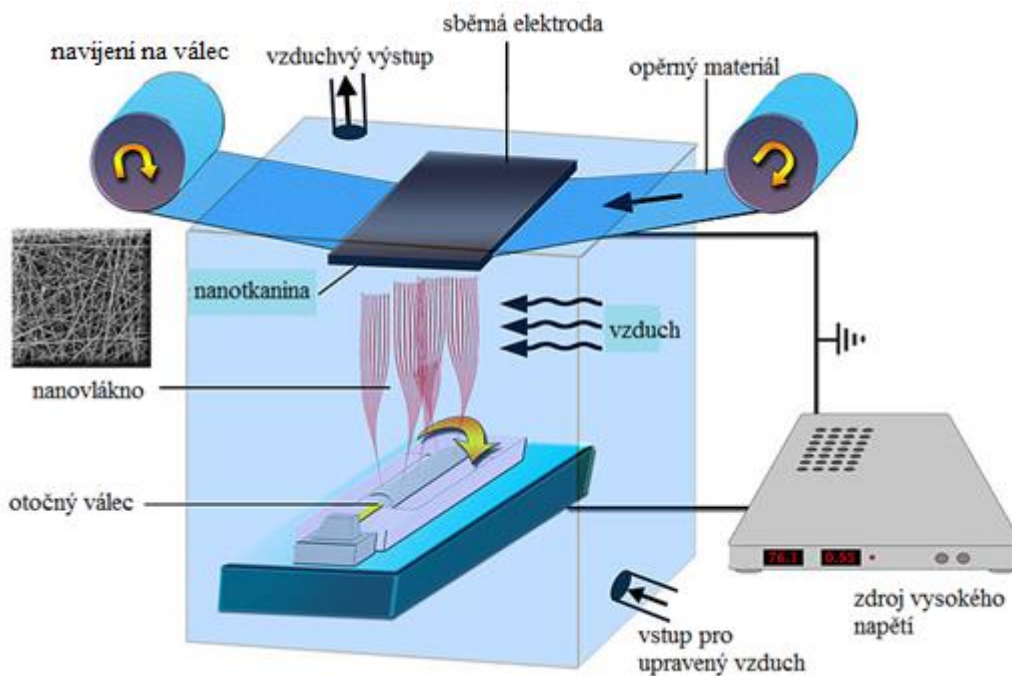
Elektrostatické zvlákňování je prováděno s připojením vysokého napětí ke kapiláře naplněné polymerní kapalinou, která se stáčí za pomoci elektrody. Výsledná vlákna jsou sebrána na uzemňovací desce, která může být pokrytá např. tkaninou. Kapilára může být umístěna kolmo a polymerní kapalina se nechá padat pomocí gravitace a dole ležícího lapače Obr. 1a. Pro ovládaný tok, může být kapilára v určitých případech nakloněna v definovaném úhlu. V jiném případě byla kapilára horizontální a pro spuštění kapky bylo použito čerpadlo Obr. 1b. Čerpadlo bylo také použito v případě vertikálního plnění. Elektroda může být také vložena v polymerní kapalině nebo umístěna na špičku kapiláry, pokud je použita stříkačka s kovovou jehlou. [5]



Obr. 1. Blokové schéma aparátu pro elektrostatičké zvlákňování a) vertikální a b) horizontální [6]

Nanospider

Textilní nanovlákná se používají jako substrát produkovaný pomocí moderní metody Nanospider Obr. 2. Tato technologie byla propracovaná na Technické Univerzitě v Liberci, na katedře netkaných textilií a nanovláčenných materiálů a již byl patentovaný. Tyto komerční metody na produkci polymerních nanovláčken jsou použité v průmyslovém rozsahu a zdokumentoval je Jirsák.

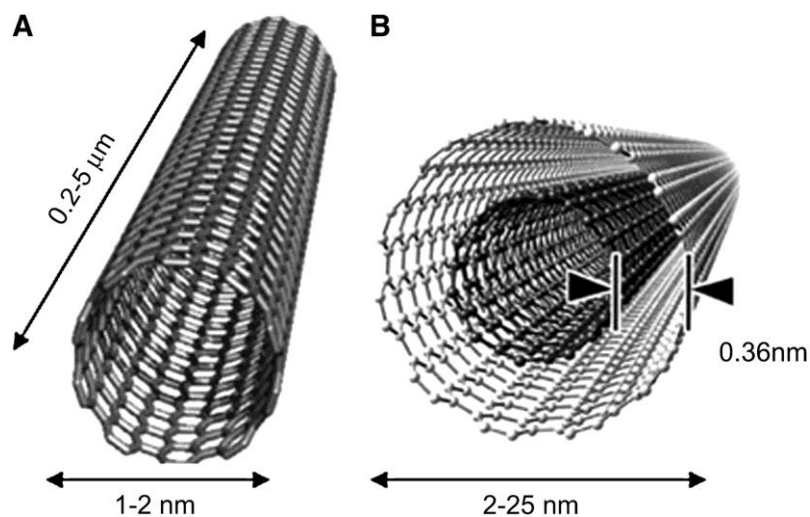


Obr. 2. Elektrostatičké zvlákňování pomocí válečku [7]

Nanospider je upravená metoda elektrostatického zvlákňování. Je to jednoduchá a všestranná metoda pro výrobu ultratenkých vláken z různých materiálů, které zahrnují i polymery. Tato technika používá vysokonapěťové elektrostatické pole k vytvoření elektricky nabitého proudu z polymerního roztoku nebo taveniny. V typickém procesu je vysoké napětí používané mezi uzemněným lapačem a kapilární trubičkou. Kapička kapalného polymeru je přinesená k hrotu kapiláry a po přijetí napětí vytvoří kapičky Taylor-kužel. Když použité elektrické pole překonává povrchové napětí kapičky, nabitá tryska vypudí kapalinu ze špičky kužele. Během proudění se rozpouštědlo postupně vypařuje a nabité polymerní vlákno se nahromadí na uzemněný terč. Inovační představa Nanospider je založená na produkci nanovláken z tenkých vrstev kapalného polymeru. V tomto případě Taylor kužely (zdroj nanovláken) jsou vytvořené na povrchu rotačního válečku, ponořeného v roztoku polymeru. Nanospider má schopnost zpracovávat široký okruh polymerů v průměrech 50-300 nm do netkaných sítí o 0,1-5 g/m². [8]

2 UHLÍKOVÉ NANOTRUBICE

Uhlíkové nanotrubičky mají rozměr nanometrů a do širšího povědomí vstoupily v posledních 21 letech. Poprvé je popsal Iijima v roce 1991 [9], když studoval syntézu fullerenu pomocí elektrického obloukového výboje. Uhlíkové nanotrubičky, které Iijima pozoroval, byly tzv. vícevrstevné uhlíkové nanotrubičky (MWNTs), jak je znázorněno na Obr. 3b. Obr. 3a zobrazuje jednovrstevnou uhlíkovou nanotrubičku (SWNT), kterou syntetizovali v roce 1993 Iijima, Ichihashi [10] a Bethune s kolegy [11]. SWNTs byly syntetizovány stejně jako MWNTs, jen s přidáním katalyzátoru na uhlíkové elektrody. Vzhled SWNT je docela odlišný od MWNT. SWNT má velmi malé průměry (1-2 nm) a skládá se z jednoho složeného archu uhlíku. V roce 1992, předpověděly dvě výzkumné skupiny elektronické vlastnosti jednotlivých SWNTs [12–14]. Zjistili, že SWNTs mohou být vodivé nebo polovodivé v závislosti na jejich úhlu stočení. Později byly tyto dedukce experimentálně potvrzeny [15,16]. Mezitím se objevilo mnoho recenzí, které poskytují komplexní přehled popisující syntézu, charakterizaci, aplikaci a základní mechanické a elektrické vlastnosti uhlíkových nanotrubiček.



Obr. 3. a) Jednovrstevná uhlíková nanotrubička SWNT, b) vícevrstevná uhlíková nanotrubička MWNT [17]

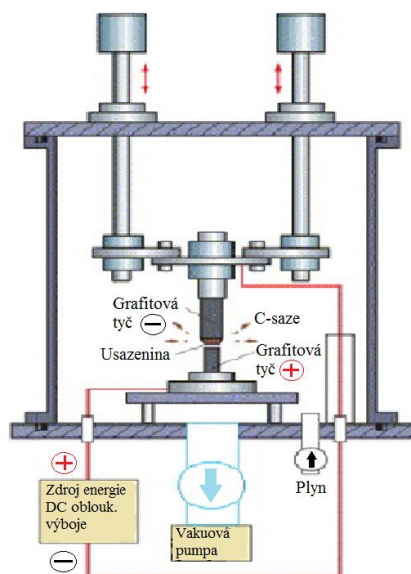
2.1 VÝROBA

Uhlíkové nanotrubičky mohou být vyrobeny pomocí tří hlavních technik: obloukový výboj, laserová ablace a chemická depozice par (CVD). Každá z nich může být upravena tak, aby vyhovovala specifickému výzkumnému účelu.

Obloukový výboj

Obloukový výboj je první známou technikou výroby MWNTs [9,18] a SWNTs [10,11,18]. V této technice se používají dvě vysoce čisté grafitové elektrody - anoda a katoda, které jsou uloženy v ochranném prostředí helia nebo argonu. Vysoká teplota, která vzniká během procesu mezi tyčinkami, dovoluje sublimaci uhlíku. Elektrodami, které jsou drženy ve vakuové komoře, prochází stejnosměrný proud ($\sim 100\text{A}$) a pod tlakem 660 mbar je do ní dodáván inertní plyn [19]. Stejným způsobem optimalizovali růst SWNT Journet a spol. [18]. Účelem inertního plynu je zvýšit rychlost usazování uhlíku. Zpočátku jsou elektrody drženy odděleně. Tlak je stabilizovaný, napájení je zapnuté (asi 20 V) a kladná elektroda se postupně přibližuje k záporné elektrodě, aby vytvořila elektrický oblouk [18,19].

Zatímco SWNTs může růst jen v přítomnosti katalyzátoru (Fe, Co, Ni nebo Y), MWNTs ho pro růst nepotřebuje. MWNTs produkovaný obloukovým výbojem je vysoce krystalický a je vázaný pomocí silných van der Waalsových sil [18]. Množství a kvalitu CNTs získáváme v závislosti na různých parametrech: koncentraci kovů, tlaku inertního plynu, typu plynu, proudu a geometrii systému [19]. Experimentální nastavení přístrojů obloukového výboje je zobrazené na Obr. 4.



Obr. 4. Schéma přístroje obloukového výboje [20]

Laserová ablace

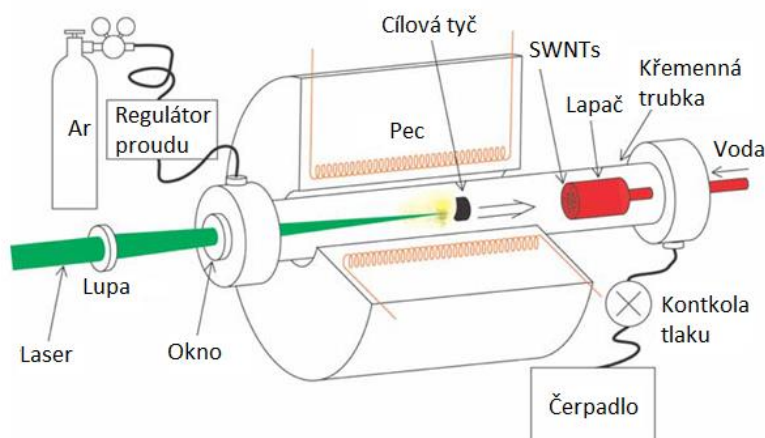
V roce 1992, Smalley a spol. vyvinuli metodu laserové pece vybavené žíhacím systémem. V roce 1996 Thess a spol. aplikovali tyto objevy na produkci CNT_s, zvláště pak pro uspořádané svazky SWNT_s. [18,20]

K odpařování uhlíku z grafitu se používá velmi výkonný laser a vysoká teplota. Touto technikou může být vyrobený jak MWNTs tak i SWNTs. Aby mohly vznikat SWNTs, musí být do grafitu přidán katalyzátor, výsledek je podobný jako v technice obloukového výboje [19]. Množství a kvalita vyrobených uhlíkových nanotrubic závisí na několika faktorech: množství a typ katalyzátoru, výkon laseru a vlnová délka, teplota, tlak, typ inertního plynu, dynamika kapalin v blízkosti cílového uhlíku [18]. Schéma laserového ablačního zařízení je na Obr. 5.

Laserový paprsek (většinou YAG-pevnotlátkový laser nebo CO₂ laser) je vedený skrz okno a zaměřený na cílovou tyč. Ta je vypařovaná za vysokých teplot ochranného plynu Ar a vytváří se SWNT_s. Ar teče rychlostí 1 cm.s⁻¹ při tlaku 500 torr. Vytvořené SWNT_s jsou nesené ochranným plynem k jímači, kde jsou sesbírány.

Metoda má několik výhod, jako je vysoká kvalita produkce SWNT, kontrola průměru, výzkum dynamiky růstu a produkce nových materiálů. Pomocí této metody, která je zakončena čistícím procesem, jsou vyrobené vysoce kvalitní SWNT_s s minimálními defekty a kontaminujícími látkami (amorfni uhlík a katalytické kovy). Laser má dostatečně vysokou koncentraci energie, díky které se cílová tyč neštěpí na částice tuhy, ale vypařuje se na molekulové úrovni. Pára tuhy je převedena do amorfniho uhlíku jako výchozí materiál pro SWNT_s. [20]

Když SWNT_s syntetizuje, jsou produkty v případě obloukového výboje i laserové - ablační techniky fulereny, uhlíkové mnohostěny s katalyzátorem a amorfni uhlík. [18]

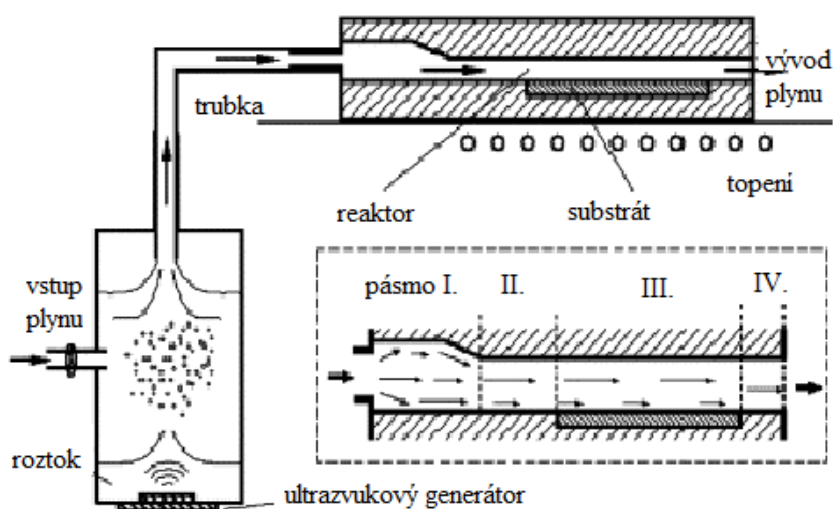


Obr. 5. Schéma výroby laserovou ablací [20]

Chemická depozice par (CVD)

CVD metoda byla užívána pro produkci uhlíkových vláken od roku 1959. Stejnou technikou, brzy po objevu CNT_s od Iijima [9], oznámil Endo a spol. [20,21] CNT růst z pyrolýzy benzenu v 1100°C, zatímco José - Yacamán a spol. vytvořili jasný spirálovitý MWNT_s v 700°C z acetyleny. V obou případech, byly jako katalyzátory použité Fe nanočástice. Později, byl MWNT_s také vytvořený z etylenu, metanolu a mnoha jiných uhlovodíků. SWNT_s vyrobil jako první Dai a spol.[20,22], který tyto poznatky přizpůsobil na CO substrát při 1200°C, jako katalyzátor byly použity Mo částičky. Následně byly SWNT_s vyrobený z benzenu, acetyleny, etylenu, a metanolu používáním různých katalyzátorů [20].

V CVD technice, jsou CNT_s syntetizované pomocí energie, která je propůjčena uhlovodíkům. Při vysoké teplotě (550–750°C), jsou uhlovodíky rozbité na reaktivní radikály (vodík a uhlík), vyskytující se čisté molekule uhlíku. Tyto reaktivní formy rozptýlí dolů k substrátu, který je ohříván a potažen katalyzátorem (obvykle přechodové kovy první třídy např.: Ni, Fe, či Co), kde se naváží. Běžně používané zdroje uhlovodíku jsou metan, etylen a acetylen; jako zdroj energie se používají paprsky elektronů a odporové teplo. Ačkoli CVD technikou může být dosaženo vynikajícího uspořádání a polohové kontroly ve struktuře nanometru, vznikají tímto procesem ve strukturách MWNT vysoké defekty hustoty. Je to nejspíš způsobeno nedostatkem tepelné energie při žihání CNT_s, protože relativní růstová teplota je nízká [18]. Schéma chemické depozice par je znázorněno na Obr. 6.



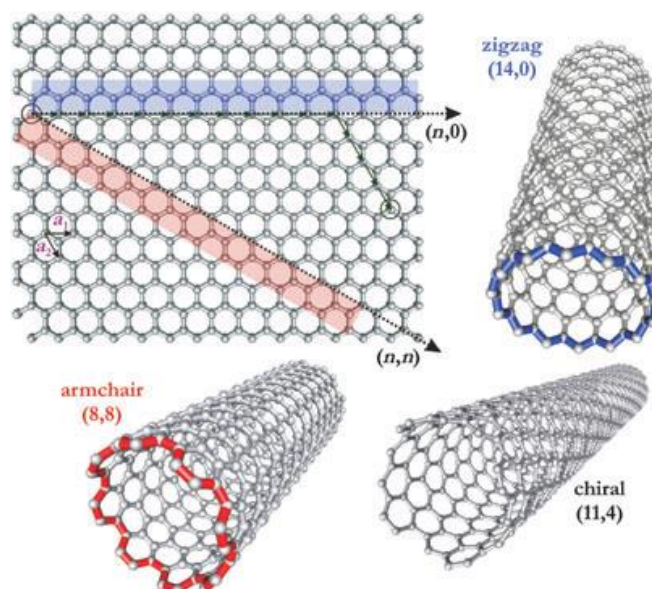
Obr. 6. Schéma parního-CVD přístroje. Vložený obrázek naznačuje hraniční vrstvy modelu, které se skládají ze čtyř zón [23]

Srovnání mezi těmito třemi technikami ukazuje, že laserová ablace produkuje vysoké výnosy (>70%) SWNT_s, ale cena výroby CNT_s metodou obloukového výboje je nižší. CVD technika nabízí kontrolovanou syntézu uspořádané a řízené CNT_s. I když CVD proces se jeví technologicky snadnější, požadovaná kvalita může být vyrobena také metodou obloukového výboje. [18]

2.2 STRUKTURA

CNTs jsou dlouhé, tenké listy atomů uhlíku, které jsou stočeny Obr. 7. Mají schopnost vést elektřinu a předávat tuto vlnu energie po své struktuře, což je ideální pro rozvoj vysoce citlivých komponentů senzorů. Pevnost v tahu a modul pružnosti do struktury trubice umožňuje širší rozsah použití tohoto materiálu v různých průmyslových odvětvích [24].

Strukturně jsou SWNT_s považovány za jednotlivé bezešvé, uhlíkové archy. Uhlíkové archy se sestávají z hexagonální mřížky atomů uhlíku. Jednotěnné nanotrubičky se skládají z jednoho takového archu s typickým průměrem 1–1,5 nm, zatímco vícevěnné nanotrubičky se skládají z mnoha takových archů, s vrstvami stočenými a vloženými do sebe, s průměry 5–100 nm. Průměr takových produkovaných trubek je silně závislý na velikosti částecek použitého katalyzátoru [25].



Obr. 7. Rovinný grafitový arch a jeho stočení do třech různých modifikací [26]

2.3 VLASTNOSTI

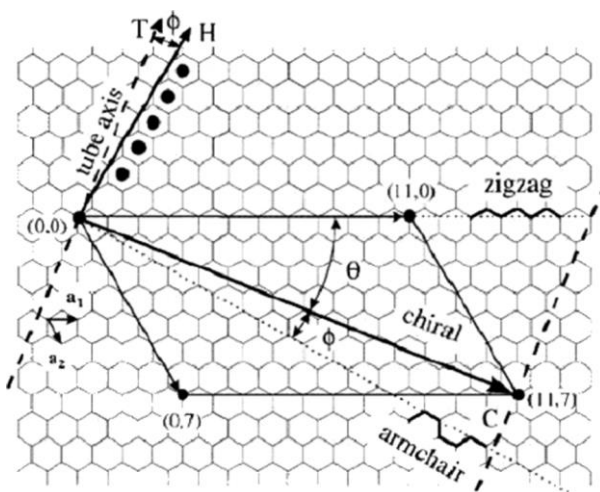
Uhlíkové nanotrubicice vynikají díky svým mimořádným vlastnostem, které byly částečně odvozené z modelování a výpočtů jednotlivých nanotrubic a brzy inspirovaly vědce a futurology směrem k futuristickým aplikacím. Nejznámější příklad je pravděpodobně "Nanotube wire", který mohl umožnit prostorový růst. [27]

Pro své elektrické vlastnosti byly CNTs uvažovány jako možná náhražka křemíku v základních obvodech [25,28]. Skutečnost, že jednotlivé nanotrubicice mohou být vodivé nebo polovodivé dovoluje, aby byly použity ke konstruování tranzistorů a spojení mezi nimi, což tvoří součásti integrovaných obvodů. [25]

Jejich mechanické vlastnosti umožňují využití enormní síly při spojení grafitu ve vláknové geometrii. Jednotlivé MWNTs jsou extrémně pevné tyčinky velmi nízké hustoty a mohou snášet enormní zakřivení. Tyto vlastnosti jsou závislé na uspořádání grafitových archů. Na rozdíl od MWNTs postrádají SWNTs vícenásobné válečkovité uspořádání, a proto by měly díky zakřivení vykazovat lepší mechanické vlastnosti. [29]

Elektrické vlastnosti

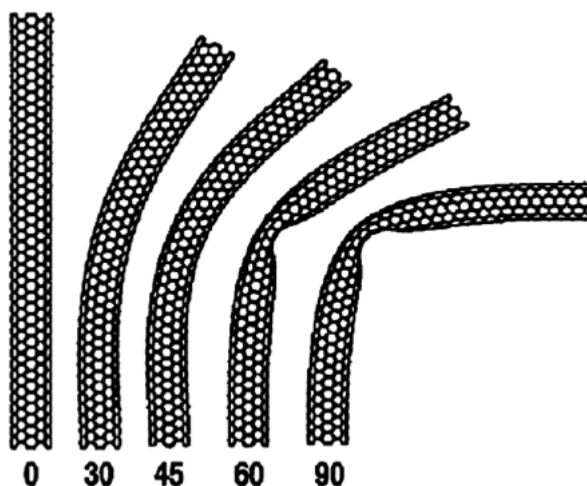
Bylo prokázáno, že vlastnosti nanotrubic jsou citlivě závislé na průměru trubice a chirálním úhlu, oba jsou funkcí n a m na chirálním vektoru C . Armchair nanotrubic ($n = m$) je vodivý. Pro všechny další trubky, jsou dvě možnosti. Když $n - m = 3N$ (kde N je celé číslo), je pravděpodobné, že trubky budou vodivé; jinak jsou trubky polovodivé s energetickou mezerou přibližně 0,5 eV. U polovodivých je energetická mezera závislá na průměru trubky, větší průměr vede ke snížení energetické mezery viz. Obr. 8. [25]



Obr. 8. Rovinný grafitový arch. CNTs mohou být vyrobeny stočením archu podél vektoru zabalení C . Počátek je v bodě C , vytvořenou nanotrubicí znázorňují indexy $(11,7)$ [25]

Mechanické vlastnosti

Grafit je extrémně silný s ohledem na v-rovinné deformace a může podporovat velmi velké napětí [25]. Nejenže jsou nanotrubičky pevné, ale jsou také extrémně pružné. Mohou být opakovaně zakřivené do velkých úhlů a jejich pevnost v tahu (1 Tpa) je nesrovnatelná s jinými známými materiály. Simulace z mechanických vlastností nanotrubiček vedly k závěru, že 1 nm široká nanotrubička může být považována za dutý váleček, vystavený zákonům mechaniky spojitosti. Toto platí na ohýbání, kroucení a stlačování [25,30]. Struktura trubice je schopna zvládat značné deformace při extrémním napětí. Mechanické vlastnosti nanotrubiček pomohly určit četné experimentální studie. Tyto vlastnosti CNT_s jsou velkou měrou nezávislé na jejich chiralitě, a také se významně liší mezi SWNT_s a MWNT_s. [25]



Obr. 9. Struktury izolovaných ohnutých nanotrubiček užívané v Rochefort výpočtech; čísla představují zakřivení úhlů (úhel mezi svislou a zakřivenou částí) [25]

Elektromechanické vlastnosti

Kvůli možnému zapojení CNT_s do elektromechanických zařízení (zvláště u senzorů), byl efekt mechanických deformací na elektrických vlastnostech CNT_s předmětem horlivého zájmu. Většina výzkumu v této oblasti se zaměřila na vodivé CNT_s, protože je to hlavně jejich změna ve vodivosti, kdy je požadována specifická deformace, což je zajímavé pro vývoj senzorů nanoelektromechanických systémů (NEMS). [25]

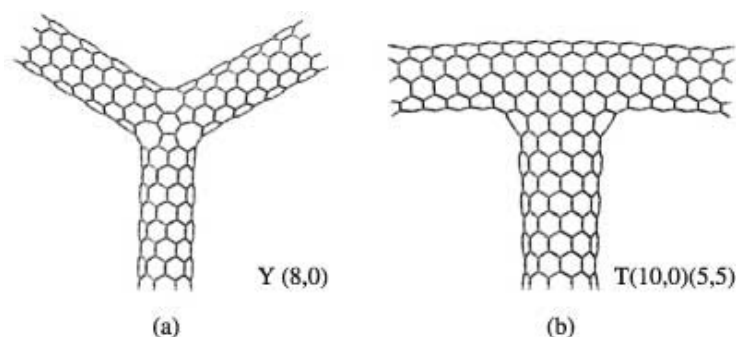
Několik studií bylo uzavřeno tím, že zakřivení CNT_s by mohlo mít zanedbatelné účinky na jeho elektrické vlastnosti. Nicméně, to bylo omezené jen malým zkroucením.

Velké deformace a uzly jsou způsobené v důsledku van der Waalsových sil mezi nanotrubicemi a substrátem, na kterém jsou umístěny. [25]

2.4 DEFEKTY UHLÍKOVÝCH NANOTRUBIC

Po ideálních strukturách bez vad, se bavíme o možných žádoucích či nežádoucích defektech [31]. Je možné spojit dvě nanotrubice s různými chiralitami pouhým zavedením páru sedmiúhelník a pětiúhelník v jinak dokonalé šestiúhelníkové mříži tuhy [32]. Tímto nahrazením vznikají ohyby a zvláštní spojení nanotrubic. Mohou být vnitřní nebo vnější, a také elektrické vlastnosti mohou být těmito defekty vážně změněny. Další třída defektů může být způsobena nečistotami, které jsou začleněny během nebo po růstovém procesu nanotrubic. Sloučeniny, které mohou být zahrnuté do struktury, jsou například částičky katalyzátoru [31].

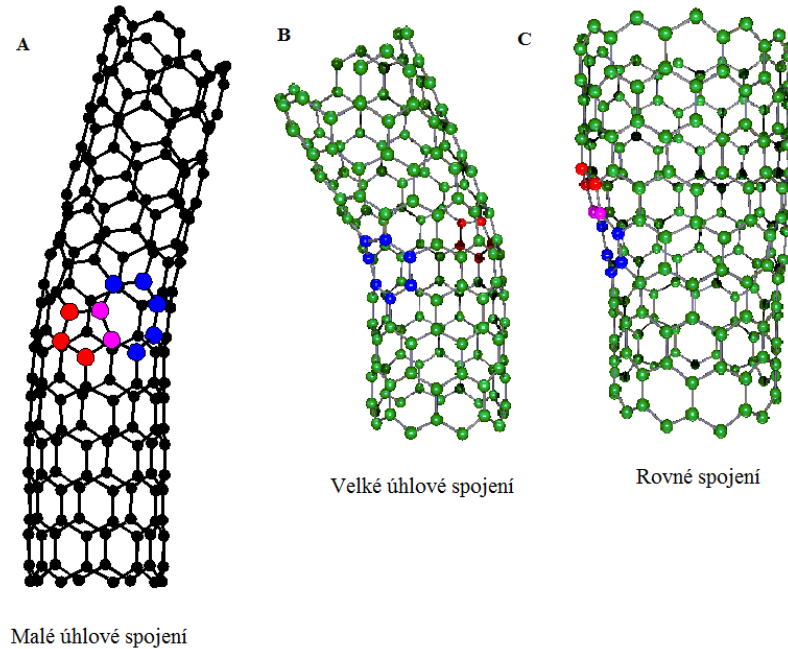
Defekty mohou mít za následek také různé nové struktury jako Y – větve, T - větve nebo SWNT spojení Obr. 10. Za jistých okolností, mohou defekty vznikat „řízenou“ cestou. To má za následek zvláštní struktury, které budou mít jiné, ale ještě více zajímavé vlastnosti než jejich původní formy. [31]



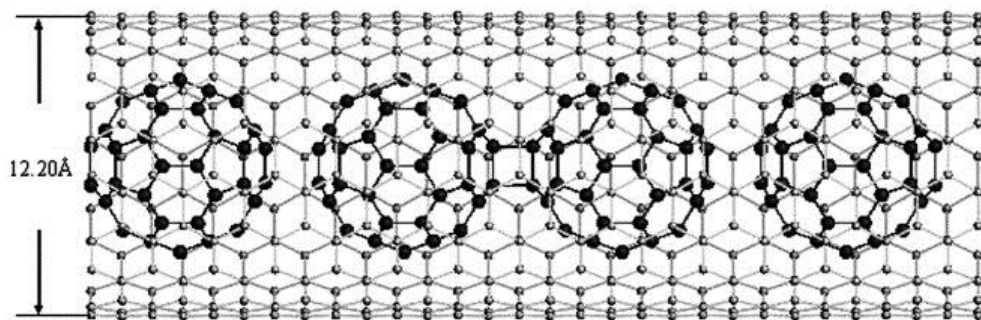
Obr. 10. Nahoře: Y - větve, T – větve [33]

V některých případech mohou být defekty vytvořeny pomocí pětiúhelníků a sedmiúhelníků vložených uhlíkové struktury. Jsou-li umístěny na dvou diametrálně protilehlých stranách struktury, osy obou připojených nanotrubic svírají úhel okolo 35° . Zakřivené úhly této velikosti byly experimentálně pozorovány transmisí elektronovou mikroskopií. Úhel může být menší, pokud je pětiúhelník a sedmiúhelník umístěny blíž u sebe a je dokonce možné připojit dvě různé nanotrubice bez ohýbání struktury zarovnáním pětiúhelníku a sedmiúhelníku podél jedné strany. [32]

Uvedu několik příkladů možného spojení:



Obr. 11. a) Spodní polovina tohoto hybridu je polovodičová, horní část je vodivá chirální nanotrubičice. Úhel ohybu spojení je 12° ; b) (9,0) - (5-5) „koleno“, průměry obou polovin nanotrubic jsou kolem 0,35 nm. Struktura nanospojení vodič-vodič byla optimalizována na zjednodušeném molekulárním mechanickém modelu, úhel ohybu je 36° , c) (11,0) - (12,0) spojení je hybrid polovodič-vodič. Dvě nanotrubičice s paralelní (nebo cik-cak) orientací jsou spojeny hranou sdílející pětiúhelník (červená) a sedmiúhelník (modrá) orientovány rovnoběžně k ose trubice. Elektronická struktura byla vypočítána pomocí pevné vazebné rekurze [32]



Obr. 12. Zvláštní typ struktury je tzv. hrachový lusk, uhlíkové nanotrubičice s C_{60} (9,9) molekulami uzavřenými v nanotrubičici [31,34]

2.5 DISPERZE UHLÍKOVÝCH NANOTRUBIC

Disperzní metoda, musí být vybraná v souladu s výrobními podmínkami základního CNT materiálu. Jsou dva výrazné postupy pro disperzi uhlíkových nanotrubic: mechanická metoda a metody, které jsou navrženy k tomu, aby změnilly povrchovou energii hmot v tuhé fázi, buď fyzikálně (nekovalentní úprava) nebo chemicky (kovalentní úprava). Mechanické metody disperze, jako ultrazvukové a extrémní směsné stříhání, oddělí nanotrubi- ce od sebe, ty se ale mohou také rozpadnout. Chemické metody užívají povrchovou funk- cionalizaci CNT_s, která zlepší jejich chemickou kompatibilitu s rozpouštědlem nebo s po- lymerním roztokem/taveninou. Agresivní chemická funkcionalizace představuje použití kyselin za vysokých teplot, což by mohlo způsobit nepravidelnost mřížky mající za násle- dek horší vlastnosti trubky. Nekovalentní úprava je zvláště atraktivní kvůli možnosti ad- sorbování různých skupin na CNT_s povrchu bez rušení π systému grafitových archů. V posledních letech byla nekovalentní povrchová úprava tenzidy nebo polymery široce uží- vána v přípravě vodných a organických rozpouštědlech. Ačkoliv elektrické vlastnosti na- notrubic jsou oslabené funkcionalizací, jejich užitečnost pro reologické modifikace materi- ální směsi zůstává důležitá. Je také několik možností boční kovalentní funkcionalizace trubic. Ty zahrnují organokovové sloučeniny pro vyprodukování MWNT s chlórovaným polypropylenem, fluorace s molekulou fluóru, náhradou alkyl skupinami a přidáním nitre- nů, karbenů nebo radikálů. [35]

2.6 FUNKCIONALIZACE

CNT_s odpuzuje vodu a proto nemůže být smáčený kapalinami a většina kovových nanočástic se na jeho povrchu neudrží. Pro zlepšení přilnavost kovu je materiál nejdříve při pokojové teplotě vyčištěn směsí koncentrovaného HNO₃ – H₂SO₄ (v poměru 1:3) a po 12- ti hodinách předběžné úpravy je CNT_s půl hodiny rozptylovaný ultrazvukem. Následně je úprava opakována, ale s použitím H₂O₂ (30%), který nahrazuje oxidační činidlo. To způ- sobuje, že použitý proces úpravy neprodukuje teplo, takže můžeme předpokládat, že ani struktura není těžce poškozená a udržela si dobrou vodivost. Současně jsou na vnějším povrchu vytvořeny nové skupiny karboxylové, hydroxylové a jiné reaktivní skupiny, jed- noduše může působit jako podklad pro ukládání kovových nanočástic. [36]

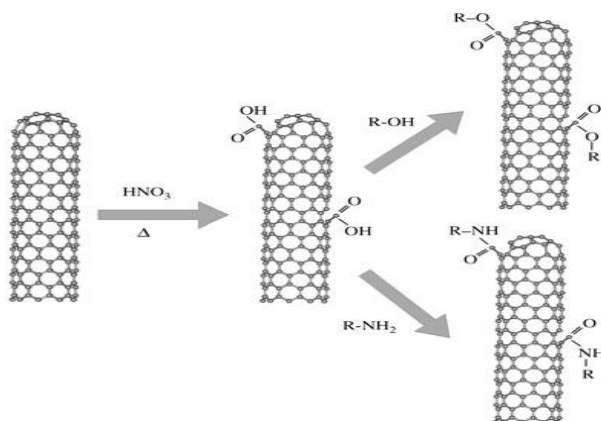
CNT_s jsou obvykle u sebe drženy pomocí van der Waalsových sil, což komplikuje rozptyl a řazení v polymerové matici. Funkcionalizace je efektivní způsob jak předejít

shlukování, a tak pomoci lepšímu rozptýlení a stabilizaci CNT_S uvnitř polymerní matrice. Je možná kovalentní funkcionalizací a nekovalentní funkcionalizací. [37]

Kovalentní funkcionalizace

V případě kovalentní funkcionalizace, je translační souměrnost CNT_S porušena výměnou sp^2 atomů uhlíku na sp^3 atomy uhlíku a jsou ovlivněny jeho vlastnosti (elektronická struktura a transportní vlastnosti). Tato funkcionalizace může zlepšit rozptyl v rozpouštědlech a polymeru. Reaktivní skupiny – COOH nebo – OH jsou na CNT_S vytvořené během oxidace kyslíkem, vzduchem, koncentrovanou kyselinou sírovou, kyselinou dusičnou, vodným peroxidem vodíku a kyselé směsí. Rozsah indukování – COOH a – OH závisí na oxidačních procedurách a oxidačních činidlech. [37]

Jednou z možností kovalentní funkcionalizace je oxidace. Může probíhat na bočních stěnách nebo na koncích [26]. Kovalentní připojení kyslíku k boční stěně je náročnější, ve srovnání s připojením na konci [38]. Pro oxidaci se používají kyseliny (kyselina dusičná a směs kyseliny sírové a peroxidu vodíku) a základní činidla (amonný ion hydroxylová skupina/peroxid vodíku). Kyselé prostředí způsobí degradaci grafitové sítě [26,39] a vzniká teplo za uvolňování CO. Chemická modifikace probíhá v místě defektu, kde se tvoří reaktivní skupiny. Konečné produkty mají na konci a bočních stěnách vysokou hustotou různých skupin obsahujících kyslík (hlavně karboxylové skupiny) [26].

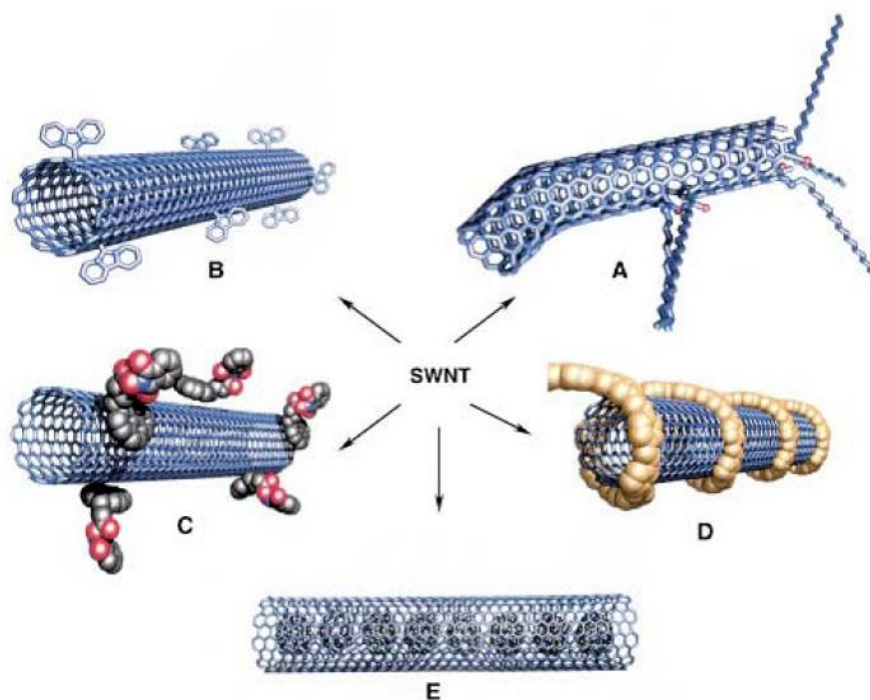


Obr. 13. Chemická modifikace nanotrubic pomocí tepelné oxidace a následovaná esterifikace nebo amidace na karboxylové skupiny [26]

V praktické části se budeme používat vodné disperze oxidovaných trubic.

Nekovalentní funkcionalizace

Nekovalentní funkcionalizace nanotrubic má svou specifickou výhodu, protože nedělá kompromis mezi fyzikálními vlastnostmi CNT_s, ale zlepšuje dispergovatelnost a zpracovatelnost. Tento typ funkcionalizace zahrnuje hlavně tenzidy, biomakromolekuly nebo zabalení trubic v polymeru. V případě nedestruktivních purifikačních metod, mohou být nanotrubice přenesené do vodní fáze za přítomnosti tenzidů. V tomto případě, jsou nanotrubice obklopené nesmáčivým povrchem odpovídajícím micelám. CNT_s může být dobře rozptýlený ve vodě s použitím aniontů, kationtů a neionogenních tenzidů. Aniontové tenzidy jako dodecylsulfát sodný (SDS) a dodecylbenzensulfonát sodný (NaDDBS) se používají ke snížení shlukování ve vodě. Interakce mezi tenzidy a CNT_s závisí na povaze tenzidu, jako je délka řetězce alkylu a náboji. Silná $\pi - \pi$ interakce mezi řetězcem polymeru a povrchem nanotrubice vedl k rozpustným SWNT_s. Hlavní nevýhoda nekovalentního spojení je, že síla mezi obalem molekuly a nanotrubicí by mohla být slabá a stejně tak u plniva v sloučenině může být účinnost přenosu náboje nízká. [37]



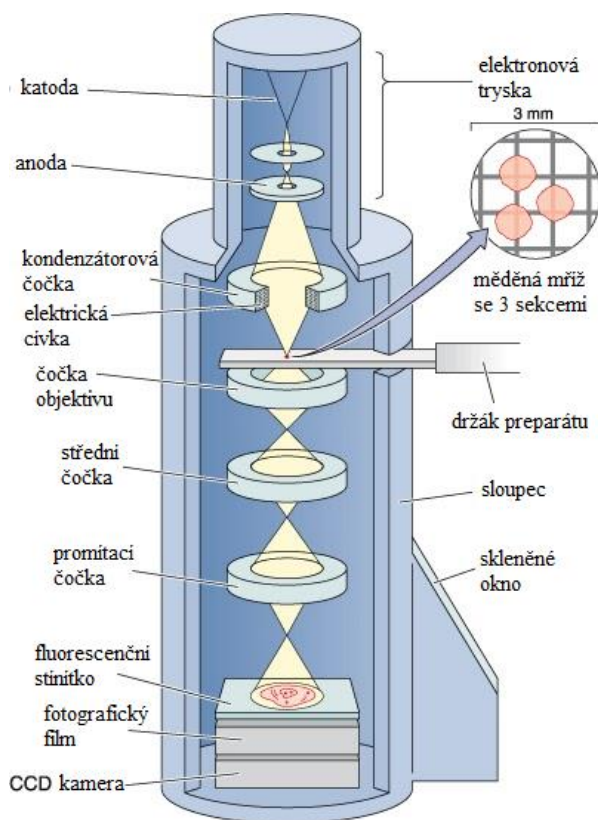
Obr. 14. Možné funkcionalizace SWNTs: A) funkcionalizace vadných-skupin, B) kovalentní funkcionalizace, C) nekovalentní funkcionalizace s povrchově aktivní látkou, D) nekovalentní funkcionalizace s polymery a E) plnění dutiny trubice SWNT např. C₆₀ [40]

3 CHARAKTERIZACE UHLÍKOVÝCH NANOTRUBIC

Optické spektroskopické metody často poskytují důležitou informaci, kterou by bylo obtížné získat jinou cestou. Pro charakterizaci nanotrubic se používá několik metod, např.: skenovací elektronová mikroskopie (SEM), transmisní elektronová mikroskopie (TEM), rentgenová difrakce (XRD), skenovací tunelová mikroskopie (STM), RAMAN spektroskopie a další. V textu se budeme zabývat hlavně skenovací elektronovou mikroskopií (SEM) a transmisní elektronovou mikroskopií (TEM).

3.1 TRANSMISNÍ ELEKTRONOVÁ MIKROSKOPIE (TEM)

Transmisní elektronová mikroskopie je jedinečná technika pro strukturovanou charakterizaci [41]. Paprsky elektronů dopadají na ultratenký vzorek. Základní model TEM se skládá z následujících částí: jako zdroj elektronů slouží elektronová tryska, kondenzace čoček zaměřuje elektronový paprsek na preparát umístěný v držáku, objektiv a dvě čočky zaostří přenesený elektronový paprsek na fluorescenční stínítko a pozorovatel nebo (CCD) kamera zaznamenávají obraz. Rozlišovací schopnost a obrazová kvalita je závislá na objektivu a jeho odchylkách. Střední a promítací čočka poskytují široký okruh zvětšení až do 1 000 000 x. [42].

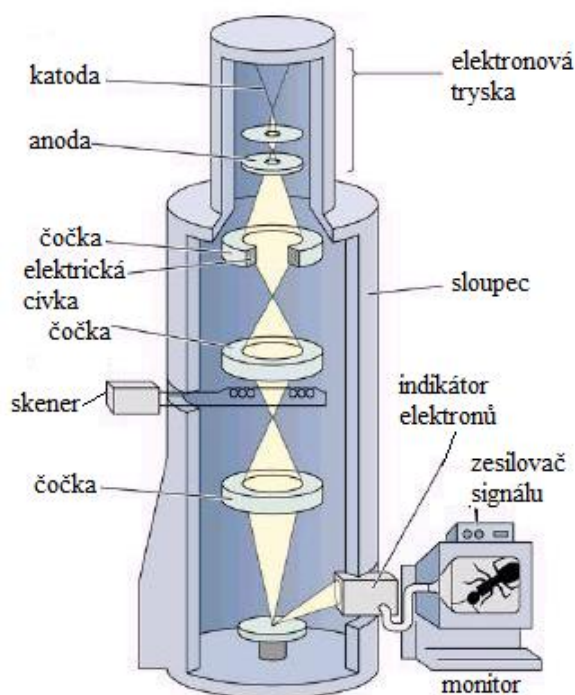


Obr. 15. Transmisní elektronový mikroskop (TEM) [43]

3.2 SKENOVACÍ ELEKTRONOVÁ MIKROSKOPIE (SEM)

Elektronový zdroj, který se v této metodě používá, může být wolframové vlákno, Lanthan hexaborid (LaB_6), Schottkyho dioda nebo wolframový vyzařovací hrot. Způsob tvoření obrazu, který využívá skenovací princip: primární elektrony jsou soustředěny do malého průměru elektronové sondy, která je snímána napříč vzorkem, využívají toho, že elektrostatické nebo magnetické pole, aplikované v pravém úhlu k paprsku, může změnit jeho směr. Pomocí souběžného skenování ve dvou kolmých směrech, plošné nebo pravoúhlé oblasti vzorku (známého jako rastru) a obraz této oblasti je vytvořený sbíráním sekundárních elektronů z každého bodu na vzorku. [44]

Oba mikroskopy pracují ve vysokém vakuu, aby se paprsek elektronů nerozptýlil v molekulách vzduchu [41].

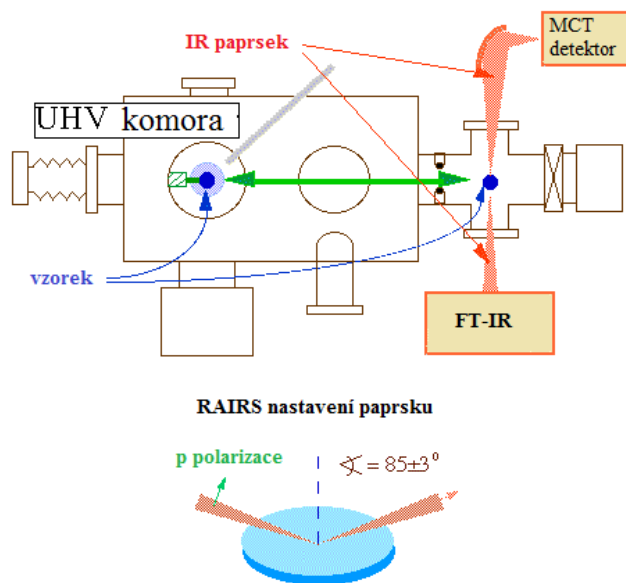


Obr. 16. Skenovací elektronový mikroskop (SEM) [43]

3.3 INFRAČERVENÁ SPEKTROSKOPIE (IR)

Vícerozměrná nelineární infračervená spektroskopie zobrazuje molekulární struktury s vysokým časovým rozlišením. K důležitým aplikacím této metody patří identifikace dynamických struktur v kapalinách a konformace dynamiky molekul, peptidů a malých bílkovin v roztocích. Optimální IR metody musí zahrnovat schopnost kontroly reakce,

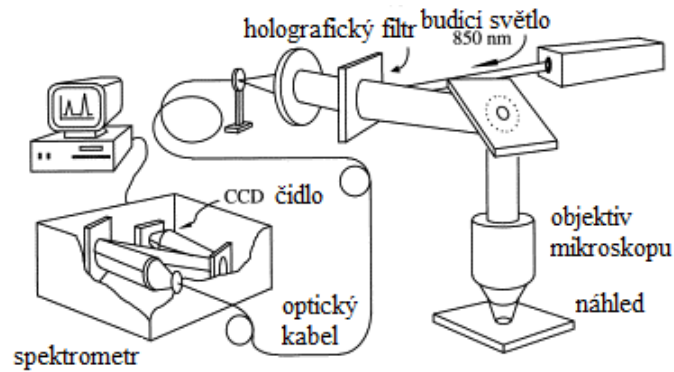
zejména vibrační přechody v závislosti na jejich vzájemné vazbě. V magnetické rezonanci se provádí rozpletení složitého spektra několika pulsních sekvencí. Analogický přístup IR spektroskopie vyžaduje více IR impulsů, které mají dobře definovanou spektrální šířku pásma, fáze a amplitudy. Od takových experimentů můžeme očekávat, že se vibrační spektra mohou šířit do různých směrů, aby mohla být určena vazba mezi módy na různých místech v prostoru. [45]



Obr. 17. Schéma infračervené spektroskopie [46]

3.4 RAMANOVA SPEKTROSKOPIE

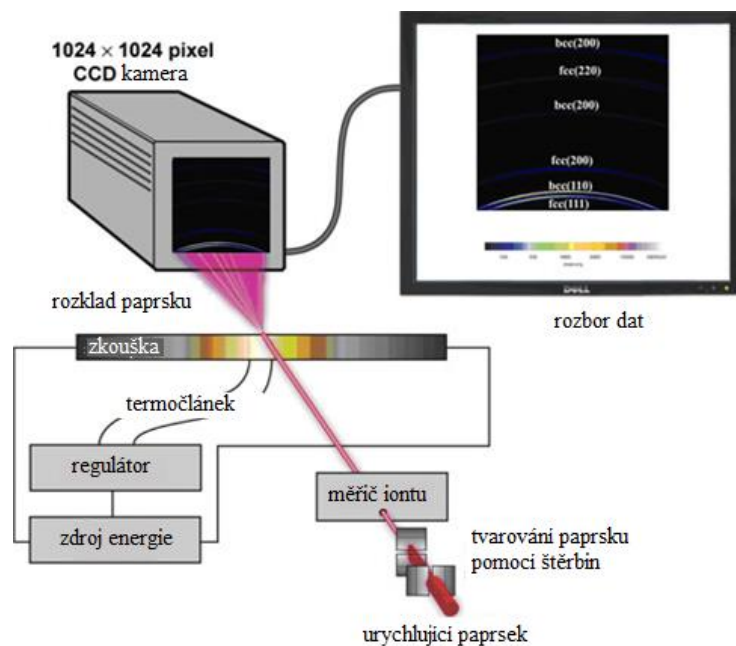
Ramanova spektroskopie poskytuje důležité náhledy do struktury nanotrubic [47]. Tato technika umožňuje stanovení prostorového složení pevných a polopevných materiálů [48]. Je jedním z nejmocnějších nástrojů pro charakterizaci uhlíkové nanotrubičky. I bez úpravy vzorků je s ní možná rychlá a nedestruktivní analýza. V Ramanově spektroskopii je možné analyzovat všechny alotropické formy uhlíku např.: fullerenes, uhlíkové nanotrubičky, amorfni uhlík, polykrystalický uhlík. Pozice, šíře a relativní síla skupin je upravená podle uhlíkových forem [49].



Obr. 18. Blokové schéma systému Ramanovy spektroskopie [50]

3.5 RENTGENOVÁ DIFRAKCE (XRD)

Měření charakterizuje uhlíkové nanotrubic. XRD zobrazí jen (hk0) a (00l) odrazy nanotubic, ale už nezobrazí hlavní (hkl) odraz [47]. Vzorky pro XRD jsou rozetřeny na skleněnou destičku umístěnou v laboratorním zařízení a obklopenou argonem. Aby se během rentgenových měření předešlo reakci s vodou nebo kyslíkem, jsou vzorky pokryté plastovou páskou [51].



Obr. 19. Schéma rentgenové difrakce [52]

4 SÍŤE UHLÍKOVÝCH NANOTRUBIC

Důležitým úspěchem v této oblasti bylo zhotovení optických transparentních a elektricky vodivých tenkých vrstev SWNT_s. [53]

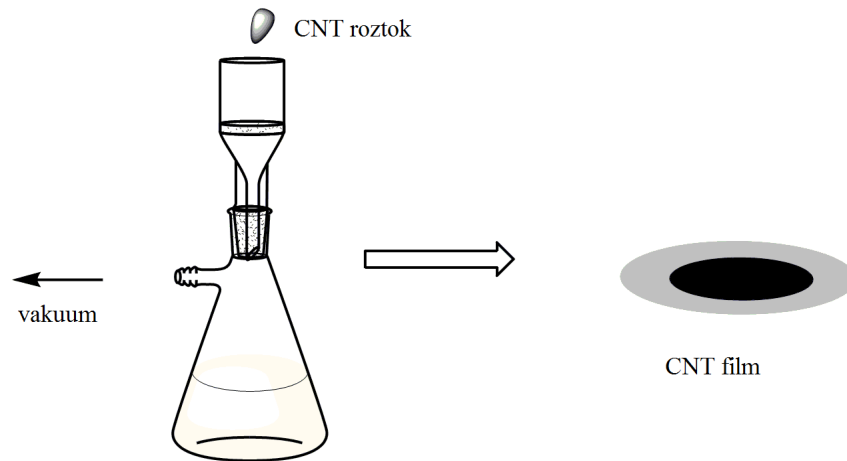
Pro získání transparentních vodivých nátěrů, jsou tenké sítě uhlíkových nanotubic rozprášeny na skleněné nebo plastové substráty. Průhlednost a vodivost jsou vyhodnoceny při pokojové teplotě za pomoci jiného CNT materiálu. CNT_s nátěry si zachovávají své vlastnosti za mechanického namáhání, dokonce i po vrásnění substrátu. V 90% průhlednosti (pro viditelné světlo) sledujeme plošný odpor 1 kΩ/sq, což je slibná hodnota pro jiné aplikace. [54]

4.1 VZNIK

Filmy nanotubic mohou být vytvořeny vakuovou filtrací, přenosovým tiskem na různé substráty, růstem svisle orientovaných nanotubic, rotačním vrstvením, kvazi-Langmuir-Blodgett depozicí, natíráním ponorem, řízeným CVD růstem, vzduchovým postřikem, nátěrem prutu vinutým drátem a drážkovým nátěrem. Většina procesů nemůže být doposud použita ve velkovýrobě. Výjimku tvoří postřik vzduchem, který má nevýhodu při tvarovaném rozptýlení a v relativně nerovnoměrné síti prutů a drážkových nátěrů, což jsou použitelné metody, ale je nutná funkcionalizace CNT_s. [53]

Vakuová filtrace

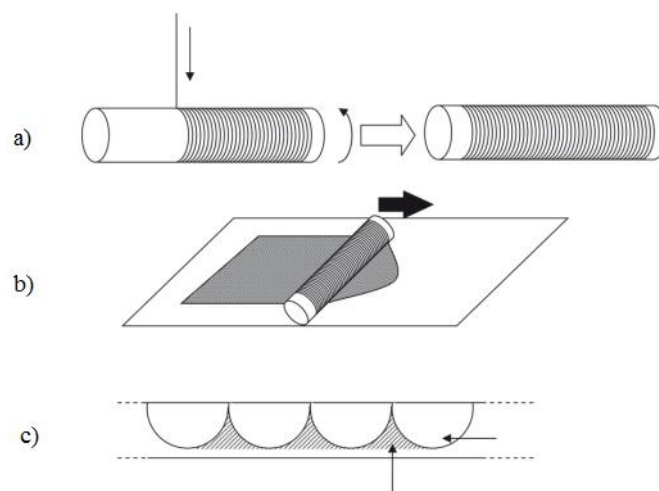
Této metody bylo použito pro produkci homogenních filmů z jednotěnných nanotubic. Zředěná suspenze nanotubic v rozpouštědle se filtruje pomocí vakua přes pórovitou filtrační membránu. Rozpouštědlo proniká póry a nanotubice zůstávají na povrchu sítě. Hustota této sítě může být ovládána změnou objemu zředěné suspenze filtrované přes membránu. Metoda má výhodu v rychlosti filtračního procesu a vytvoření opticky stejnorodých filmů. Další faktor, který pomáhá v homogenitě je vytvoření husté struktury, která se chová jako blokáda proudění tekutiny skrz filtr. Metoda je levná, dostupná pro různé aplikace a počítá s přenosem filmu na další povrchy nebo s rozpuštěním membrány. [55]



Obr. 20. Schéma vakuové filtrace [56]

Nátěr prutu vinutým drátem

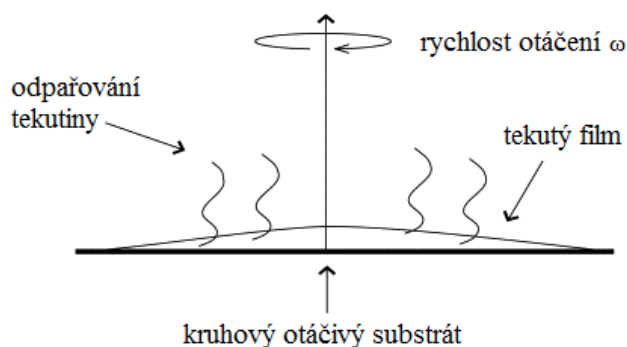
Tato technika nátěru je široce využívána laboratořemi v průmyslu pro nepřetržitě a řízené zpracování kapaliny do tenkých vrstev. Aparát nátěru se skládá z nerezavějící ocelové tyče, kolem které je pevně stočený nerezavějící ocelový drát a hladké skleněné podložky. Substrát je přidrženy na tenké skleněné podložce použitím vysoce výkonných svozek obr. 21. a), b). Část kapaliny proteče rýhami stočeného drátu a vytvoří tenký kapalný film Obr. 21. c). Průměr točitého drátu určuje velikost rýh a také výslednou tloušťku natíraného kapalného filmu. Tato technika může být užívána pro přímý nátěr na polyetylenteftalát (PET), sklo a jiné substráty za pokojové teploty. [53]



Obr. 21. a) Struktura vinutého drátu, b) schéma nátěru a c) boční pohled na b). [57]

Rotační nanášení

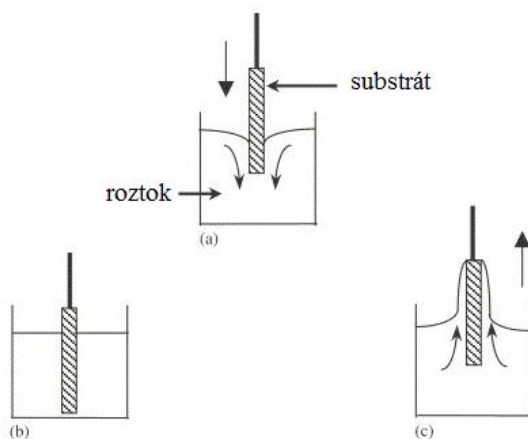
Rotační nanášení produkuje jednotné tenké vrstvy sítí organických materiálů s tloušťkou mikrometrů a nanometrů. V mnoha případech je pokrytí materiálem polymerní a je aplikované ve formě roztoku, z kterého se vypařuje rozpouštědlo. Odstředivé síly vytlačují kapalinu paprskovitě ven. Viskozita a povrchové napětí vytvoří tenký film, který zůstává na substrátu. Parametry spojené s rotačním nanášením: objem disperze, rychlost otáčení (ω), tloušťka filmu, viskozita roztoku, koncentrace roztoku (c) a čas rotace. Tvoření filmu je závislé na dvou nezávislých parametrech: viskozitě a rychlosti otáčení. [58]



Obr. 22. Schéma rotačního nanášení [59]

Natírání ponorem

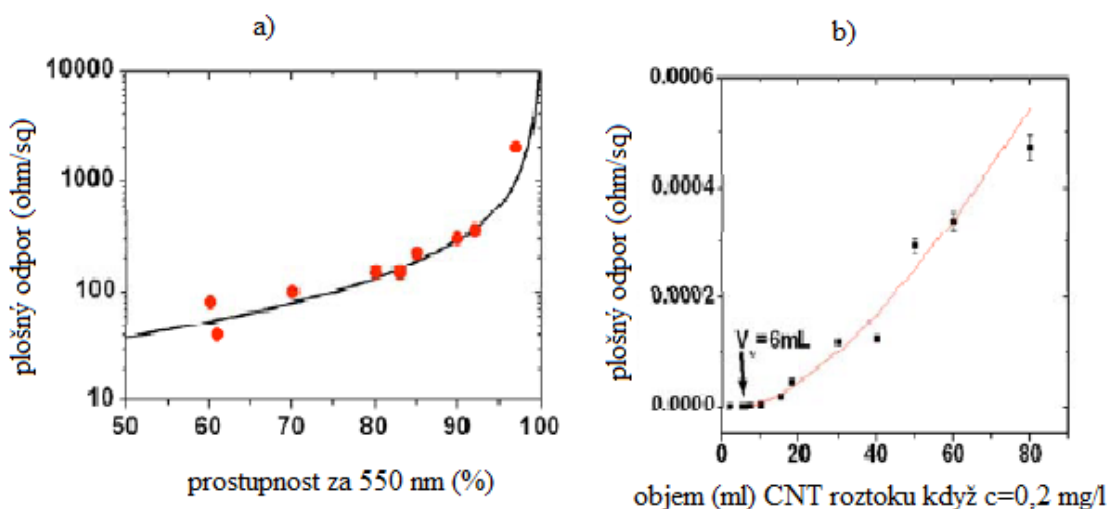
Tento proces nátěru spočívá v dostatečně dlouhém ponoření substrátu do nádrže s roztokem. Když je substrát úplně smočený, vyjme se z roztoku. Rozpouštědlo se vypaří a vytvoří se pevný film uložený na povrchu substrátu. Při nanášení filmu působí několik sil: viskózní vlečení, gravitační síla, kapilární síla (výsledná síla povrchového napětí) a setrvačné síly. [60]



Obr. 23. Schéma natírání ponorem [60]

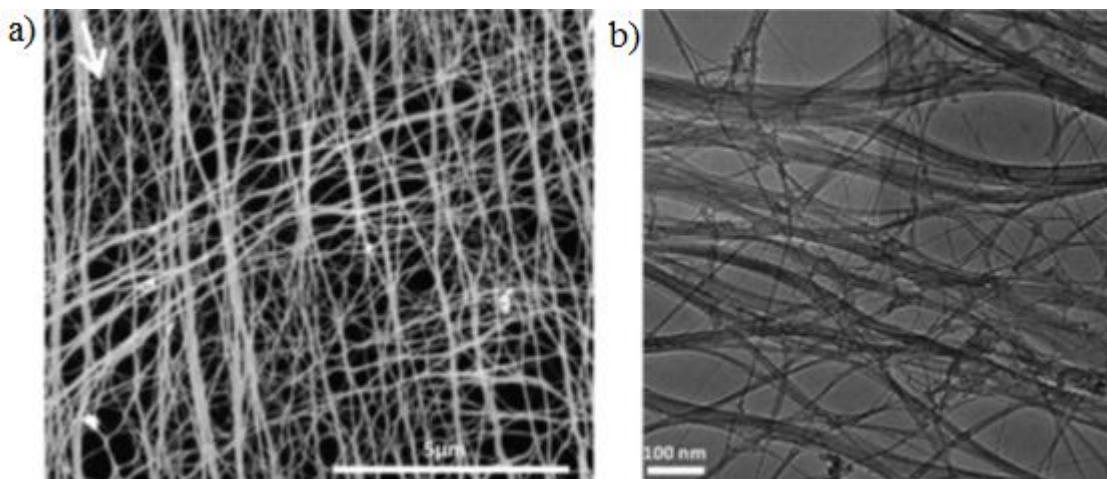
4.2 VLASTNOSTI

Při velikosti asi 3nm, obsahuje svazek přibližně deset trubic. Podle odhadu z AFM obrazu je základní střední kvadratická drsnost filmu 8 nm. Měřením okraje filmu, získáme hodnotu 25 nm, která vede k vodivosti 1600 S/cm. Naměřená vodivost dovoluje určit celkovou kvalitu filmů, oproti filmům vytvořených jinými metodami. Filmy vytvořené přímo na povrchu mají významně větší svazky nepřesahující hodnotu vodivosti 200 S/cm. Pro uhlíkové nanotrubic zesíťované na PET substrátu je velikost svazku přibližně 3 nm. Na rozdíl od toho, filmy vyrostlé na povrchu používáním CVD vedou k dobře oddělitelným individuálním svazkům CNT_S s vysokou vodivostí. Je možné řídit tloušťku, průhlednost a odpor, což je znázorněno na Obr. 24a), b) [61].



Obr. 24. a) závislost optické prostupnosti na plošném odporu CNT_S sítí, b) závislost plošného odporu na objemu disperze [61]

Aplikace nátěru SWNT_S se používá k vytvoření transparentního elektrického vodiče, který představuje velmi důležitou součást mnoha optoelektronických součástek. Jsou to např. ploché displeje a sluneční články. Kdy ve srovnání s komerčně dostupnými flexibilními transparentními vodiči mají filmy z uhlíkových nanotrubic Obr. 25. několik výhod: vysokou environmentální stabilitu a flexibilitu. SWNT_S jsou zpravidla netečné k podkladu, vlhkosti a vysokým teplotám. Zakřivení filmů nanotrubic vykazuje jen malé změny odporu. SWNT_S mají vysokou prostupnost pro světlo ve viditelné oblasti a neutrální barva je výhodnější než ITO v aplikacích na displeje. [62]



Obr. 25. SEM obrázky (a) a TEM obrázky (b) filmů přenesených na TEM mřížky: přítomnost izotropní sítě individuálních CNT_s a svazků je pravděpodobně odpovědná za izotropní elektrické vlastnosti filmů. Filmy se pomocí chloroformu srazily dřív, než byly oddělené od podložního sklíčka s vodní lázní [63]

4.3 POUŽITÍ

Možnosti aplikací jsou založené na vysoce průhledných a vodivých filmech nebo na vrstvách obsahující energii (sluneční články), elektronika (pasivní a aktivní matrice displeje, chytré okna), spotřebiče (odmrazovací okna, dotykové obrazovky) a bezpečnost (RFID visačky, elektromagnetické stínění a senzory). [61]

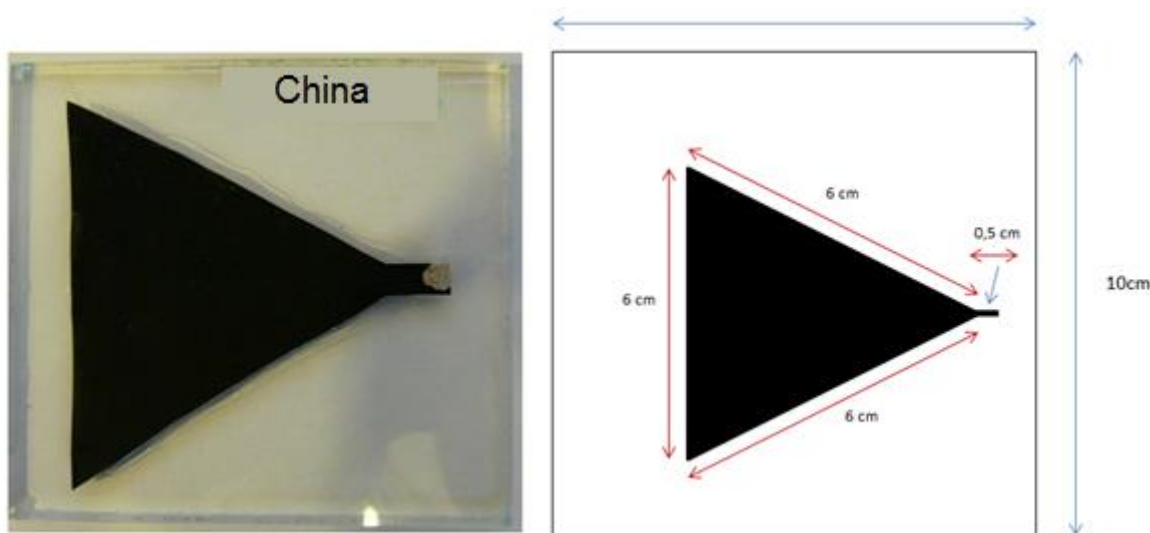
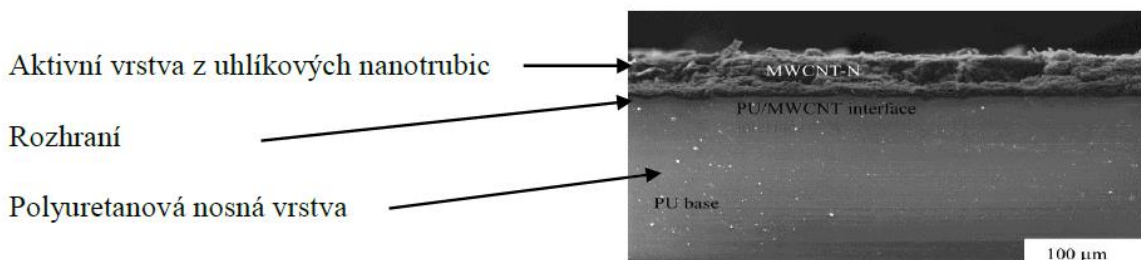
Aplikace nanotrubic u antén pro RFID tagy

Sdělovací technika a elektronika přináší možnost implementovat nanotechnologie do některých součástek. Nejčastěji se nanotrubičky používají z důvodu zkvalitnění funkce pasivních komponent, mezi které patří i pasivní antény. Kompozitní materiály využívající nanotrubičky mají své přednosti z hlediska nových možností zpracování a implementace. Často je při konstrukci nejrůznějších elektronických zařízení kladen důraz na tvar, cenu nebo velikost, kterou nelze jednoduše docílit bez použití nanotrubic.

Zajímavou oblastí je možnost implementace antény, vytvořené za pomoci nanotrubic do bezkontaktní identifikace. Technologie Radio Frequency Identification (RFID), identifikace na rádiové frekvenci je technologie používaná často k identifikaci zboží a také u mnoha jiných aplikací. RFID technologie je nástupcem čárových kódů, kde na rozdíl od

nich je možné číst tagy pomocí radiové frekvence u některých frekvencí i na daleko větší vzdálenost, než u klasických čárových kódů.

Součástí RFID tagů je vždy pasivní anténa a velmi malý pasivní čip. Čipy jsou k dispozici v provedení pro čtení nebo pro čtení a zápis. Pro komunikaci využívají převážně nosnou frekvenci 125 kHz, 134 kHz a 13,56 MHz. Některé aplikace RFID technologie používají i vyšší frekvence například 860 MHz, 868 MHz a 915 MHz.



Obr. 26. a) foto mikropáskové antény na bázi sítě z uhlíkových nanotrubic jako aktivní vrstva nanosená na skleněném substrátu b) technický náčrt antény (černé části představují anténu)



Obr. 27. Komerčně vyráběný RFID tag s čipem pro pásmo UHF [64]

Použití experimentální RFID antény spolu s čipem pro RFID, je závislé na konkrétní aplikaci, vzdálenosti čtečky od antény a také na typu použitého čipu. Tyto aspekty ovlivňují velikost a tvar antény. Experimentální anténu na Obr. 26. by bylo možné po úpravách použít společně s RFID čipem jakožto pasivní anténu pro bezkontaktní identifikaci za předpokladu kompatibility s frekvencí použitého čipu a dodržení minimální a maximální vzdálenosti pro čtení.

5 DETEKCE PAR

Plynové senzory s vysokou citlivostí a selektivitou jsou požadované pro detekci úniku explozivních plynů, jako je vodík a k odhalení toxických nebo patogenních plynů v průmyslových odvětvích. Obecně, platí několik základních kritérií pro dobré a účinné plynové snímací systémy: vysoká citlivost a selektivita; rychlá časová reakce a doba regenerace; schopnost detekovat nízké koncentrace; nízká provozní teplota a teplotní nezávislost; stabilita v odezvěch. Běžně užívané materiály pro snímané plyny zahrnují polymery citlivé na páru, polovodivé oxidy kovů a jiné pórovitě uspořádané materiály jako např. pórovitý křemík. [65]

5.1 DETEKCE NA PÁRY

Elektrické reakce směsí na organické páry metylalkoholu, chloroformu a tetrahydrofuranu byly zkoumány při pokojové teplotě. Bylo zjištěno, že citlivé vlastnosti směsí na organické páry závisí jak na složení polymeru, tak na povaze páry. [66]

Uhlíkové nanotrubic jsou vhodný kandidát pro použití jako snímací materiál pro plyny díky svým základním vlastnostem, což jsou malá velikost (v průměru ~1–100 nm), dobré elektrické a mechanické vlastnosti [67] a dobrá elektrická vodivost [66]. Další důležité vlastnosti nanotubic, které podporují jejich použití v plynovém snímání je jejich vysoká specifická plocha povrchu ($1580 \text{ m}^2/\text{g}$). U pevných látek vyplývá detekce plynů z adsorpce (vzájemná vazba molekul plynu s povrchem). Kvůli vysoké specifické ploše nanotubic, může tento materiál poskytovat obrovský povrch pro plynovou interakci. [67]

Nejen že se polymery v sloučeninách chovají jako matrice pro dobrou dispergaci CNT_s a tvoření tenkého citlivého filmu, ale také hrají důležitou roli v zlepšování snímaných charakteristických rysů plynu skrz jejich interakci s adsorbovanými molekulami plynu a CNT_s. [66]

Základní způsob zjištění plynů je změna v elektrických vlastnostech detekčního materiálu vůči plynu. Například když vystavíme uhlíkové nanotrubic vlivu různých plynů (NO_2 a NH_3), změní se jejich odpor, jakož i další elektrické vlastnosti jako termoelektrický efekt a nevodivé vlastnosti. [67]

5.2 PRINCIP

Pro začlenění CNTs do různých struktur plynových senzorů je několik metod. Li a spol. vyvinul odporový plynový senzor pomocí jednoduchého natírání SWNT_s mezi elek-

trody (IDE_S). Elektrody byly zhotovené pomocí fotolitografie a vypařování Ti a Au (společná 60 nm tlustá vrstva) na oxidu křemičitém. Vzrostlé SWNT_S byly nejdříve čištěny kyselinou a potom vzduchovou oxidací. Následně byly integrovány do IDE_S. Díky tomu měly finální SWNT_S relativně vysokou čistotu až 99,6% a dopad nečistot na sensorové vlastnosti byl minimalizován. Čištěné nanotrubicе pak byly rozptýlené v dimetylformamidu (DMF) a kapáním nanášeny na oblast elektrody. Síť nanotrubic byla vytvořena po vypaření DMF.

Jednodušší metoda je screen-printing CNT_S na tvarované elektrody. Lee a spol. vložil screen-printing CNT_S společně s MWNTs, terpineolem, etylcelulózou a skleněnými frity na elektrodu pokrytou sklem, která sloužila jako plynový snímač pro odhalení NO₂. Organické pojivo bylo odstraněno žiháním v N₂ atmosféře.

CNT_S senzory mohou být také vyrobeny pomocí dielektroforézní metody (DEP). DEP je elektrokinetika pohybu dielektrických polarizovaných materiálů v nerovnoměrných elektrických polích a je užívána pro manipulaci s CNT_S na odloučení, orientaci a umístění. Tato metoda mohla vybudovat dobré elektrické spojení mezi CNT_S a elektrodami. Během výroby, byly vysoce čisté CNT_S vloženy na 60 min do etanolu a ultrazvuku. IDE_S mikroelektrody byly vzorované na skleněné podložce. Elektroda měla žebrovaný vzor k tomu, aby pravidelně tvořila vysoká a nízká elektrická místa. Tato elektroda byla uzavřena silikonovým těsněním v uzavřené komoře, ve které byly zavěšeny CNT_S kontinuálně napájené z nádrže pomocí peristaltického čerpadla. DEP zachycuje MWNT_S na mikroelektrodu, měření bylo provedeno se střídavým napětím. Po požadovaném časovém intervalu, byl DEP proces zastavený a etanol se v pokojové teplotě vypařoval. Metodou DEP byly vyrobeny CNT_S plynové senzory pro různé páry jako: NH₃, NO₂, SO₂, a HF. S touto technikou, množství chycených CNT_S může být řízeno monitorováním elektrické impedance senzorů a jako elektrody mohou být použity různé kovové materiály. K dosažení dobře uspořádaných CNT_S, které mají lepší sensorové chování, je požadovaný růst přímo z CNT_S podložky na sensorových substrátech. [65]

5.3 POUŽÍVANÉ PLYNY

Polovodivé plynové senzory jsou citlivé na redukující (H₂ a CO) a také oxidační plyny (NO₂ a O₃) a jsou užívány pro různé účely. První zmínky se objevily v roce 1962 od Seiyama a Taguchi, tato skupina senzorů byla celosvětově zkoumána pro vývoj nových aplikací jakožto i lepší porozumění senzorům. [68]

Senzory mohou být vystaveny běžným organickým páram C_6H_{14} , $CHCl_3$, CH_3OH , NH_3 , C_3H_6O , $C_6H_5CH_3$. Odezvy citlivosti senzorů pozorované na různých substrátech otvírají nové příležitosti k dalšímu zvětšení selektivity používáním klasických signálů-zpracování algoritmů. [69]

U pevných látek se používá plynový senzor, který může být užívaný pro zjištění přítomnosti počtu plynů (NH_3 , CO , N_2 , He , O_2 a Ar). Tento senzor může zjistit nízké koncentrace plynů a čas reakce je malý ve srovnání se současnými senzory, je selektivní, co se týče odhalení počtu plynů dávajících jinou rezonanční frekvenci, která se přesouvá k jiným plynům. Tento sensorový obvod může být použitý ve vzdáleném snímacím systému a může být použitý pro dálkové snímání parametrů z čidel v zapečetěných matných balících. [67]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

6 CÍLE PRÁCE

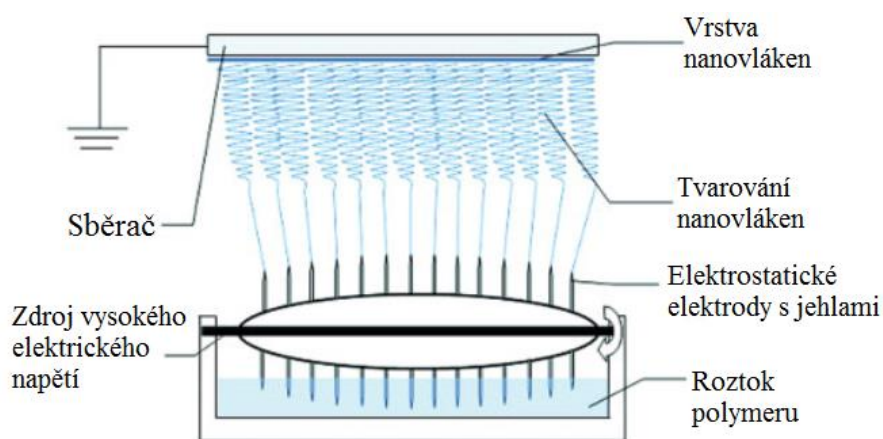
Cílem experimentu bylo oxidovat uhlíkové trubice. Oxidace byla prováděna za pomoci HCl, HNO₃ a směsi H₂O₂ a H₂SO₄, čímž vznikly 3 různé materiály vhodné pro další použití. Díky oxidaci se poruší struktura CNT_S a mohou se na jejich povrch navázat karbo-nylové a karboxylové funkční skupiny, které zlepšují jejich citlivost. Materiál vložený do organických par jsou schopny adsorbovat a po vyjmutí zase desorbovat molekuly plynu, čímž se mění jejich odpor. A je tak možné vyhodnotit jeho další zpracovatelnost.

Ze sítě uhlíkových nanotrubic (Sunnano) byl vyroben vzorek antény o rozměrech 15x60x0,3 mm. Účinnost vyrobeného vzorku byla nejdříve simulována a poté změřena na spektrálním analyzátoru, který výsledky simulace potvrdil. Spektrální analyzátor měří v šířce pásma 100 kHz - 3 GHz, což pro experiment postačuje.

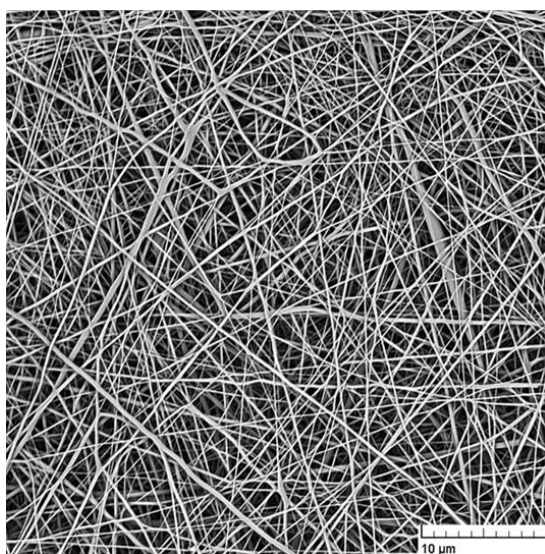
7 PŘÍPRAVA MATERIÁLU

7.1 ELEKTROSTATICKÉ ZVLÁKŇOVÁNÍ

Roztok PU v dimethylformamidu (DMF) tvoří koncentraci asi 13 wt%, viskozity $1,4\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$ a vodivosti $140\ \mu\text{S}/\text{cm}$ (upravený pomocí tetraethylamonium bromidu). Experimentální podmínky procesu zvlákňování s jedním druhem elektrody byly následující: relativní vlhkost vzduchu $\approx 29\%$, teplota 25°C , elektrické napětí 75 kV, vzdálenost mezi elektrodami 18 cm, rotace elektrody 7 r/min a rychlost antistatického polypropylenu z netkaného textilu pro sbírání nanovláken $0,16\ \text{m}/\text{min}$. Plošná hmotnost připravených nanovláken byla asi $900\ \text{mg}/\text{m}^2$.



Obr. 28. Schéma procesu elektrostatického zvlákňování s Nanospider strojem s rotační zvlákňovací elektrodou s jehlami



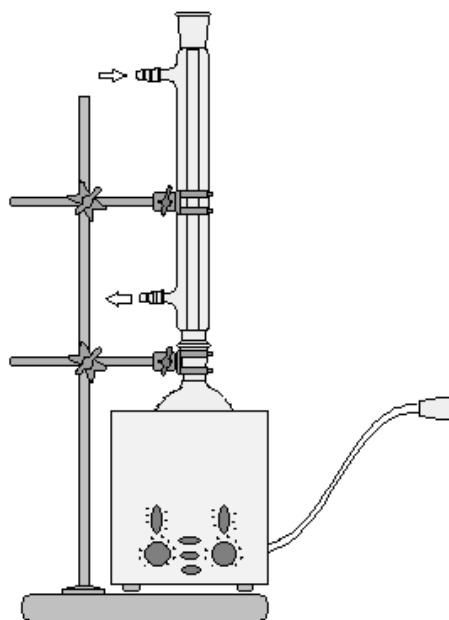
Obr. 29. Síť polyuretanových vláken

PU nanovlákna byla použita pro přípravu polyuretanové filtrační membrány. Jsou různě a nahodile kříženy a navzájem se proplétají. Je patrné, že vlákna nemají stejnou tloušťku. Na obrázku je možno spatřit velmi hustou síť těchto vláken a je možno spatřit i vrstvy, které vlákna tvoří.

7.2 OXIDACE UHLÍKOVÝCH NANOTRUBIC

Na analytických vahách bylo naváženo 0,6 g MWNT_S. Byly nachystány 3 dostatečně velké kádinky, do kterých bylo zvlášť odměřeno 70 ml H₂SO₄ a 30 ml H₂O₂. Tato směs se nazývá piraña. Poté byly nanotrubice přesypány do varné baňky. Poslední kádinka byla použita na smíchání obou kapalných roztoků. Smíchání bylo prováděno velmi pomalu, opatrně a za stálého míchání. Následně byly přidány k nanotrubicím. Vše bylo umístěno do ultrazvukové vodní lázně (BANDELIN sonorex digitec DT 103H), byl připojen chladič a vše se zahřívalo při 85°C po dobu 5 hod.

Při oxidaci HCl a HNO₃ bylo postupováno stejným způsobem, ale s použitím jiných kyselin. V jednom případě byly MWNT_S upraveny HCl a v případě druhém byly MWNT_S oxidovány v HNO₃.



Obr. 30. Sestavená aparatura pro oxidaci uhlíkových nanotrubic

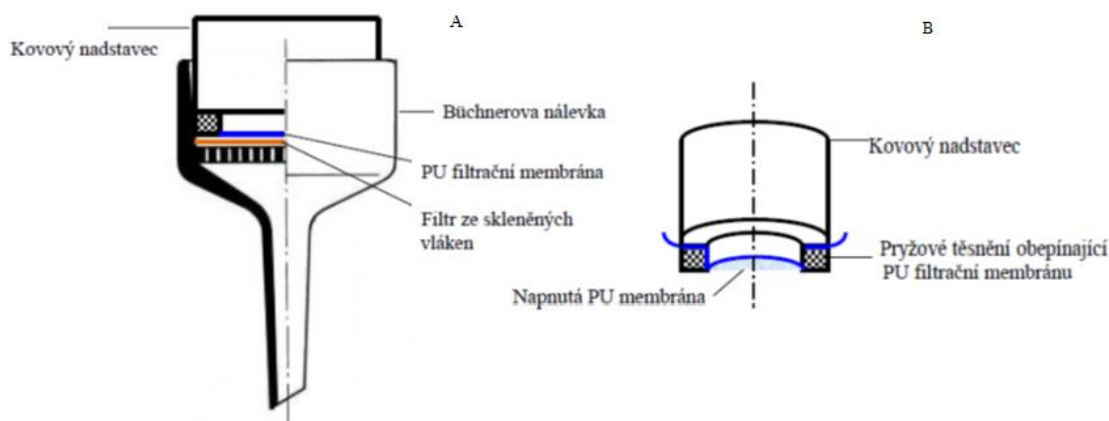
Mezitím byla připravena aparatura pro vakuovou filtraci a po uplynutí doby ohřevu byl připravený roztok přelit na filtrační papír, který byl umístěný do nálevky. Byla zapnuta voda, což způsobilo potřebné vakuum a začala filtrace. K materiálu byla postupně doplňována voda, dokud pH nekleslo na 7 (měří se pomocí lakmusového papírku). To nastalo, po odfiltrování asi 1,5-2 l vody. Po dosažení potřebného pH byl odfiltrovaný zbytek vody. Materiál nemusí být úplně suchý, vlhký se lépe sundává z filtračního papíru. Po sejmutí materiálu na misku se dal dosušit.

7.3 PŘÍPRAVA DISPERZE Z UHLÍKOVÝCH NANOTRUBIC

Na analytických vahách bylo naváženo 100 mg MWNT_S Sunnano, ke kterým bylo přidáno 30 ml surfaktantu (vodná disperze). Vzorek byl na 30 min umístěn do ultrazvukového sonikátoru UP400S, kde se vzorek dispergoval ultrazvukem. Po uplynutí doby byl vzorek vyjmut ze zařízení a filtrován vakuovou filtrací, přes polyuretanovou membránu z nanovláken. Na filtraci byla použita destilovaná voda o 65°C, která byla použita na promíchání. Destilovanou vodou byl materiál propírán 3x a 2x metanolem, dokud se nevymyl surfaktant. Membrána byla opatrně sundána a vše se dalo sušit mezi dva filtrační papíry, které byly zatíženy (zabráníme zvlnění membrány).

30 ml surfaktanta obsahuje :

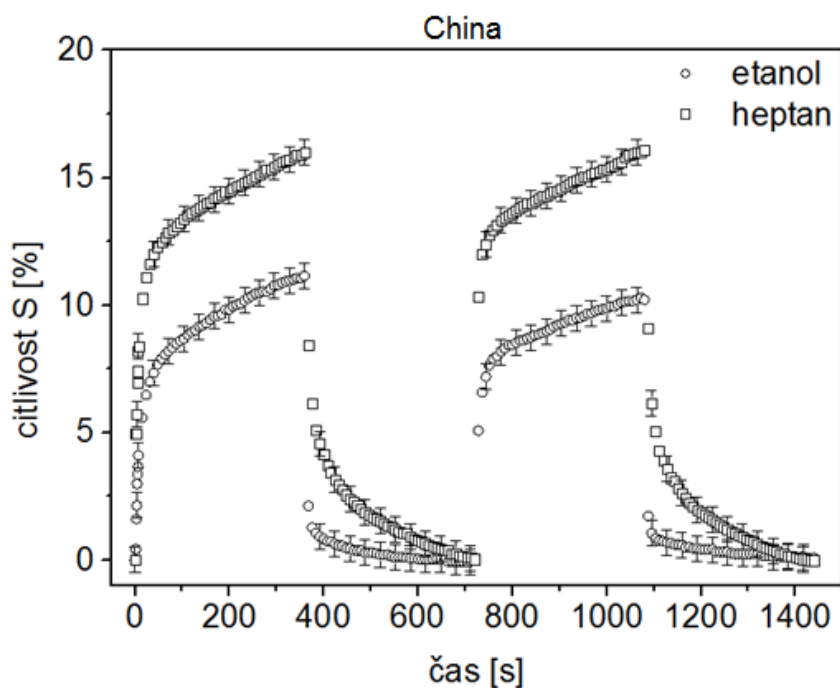
SDS	0,8717g
1-M NaOH	0,84906ml
1-pentanol	0,4528ml



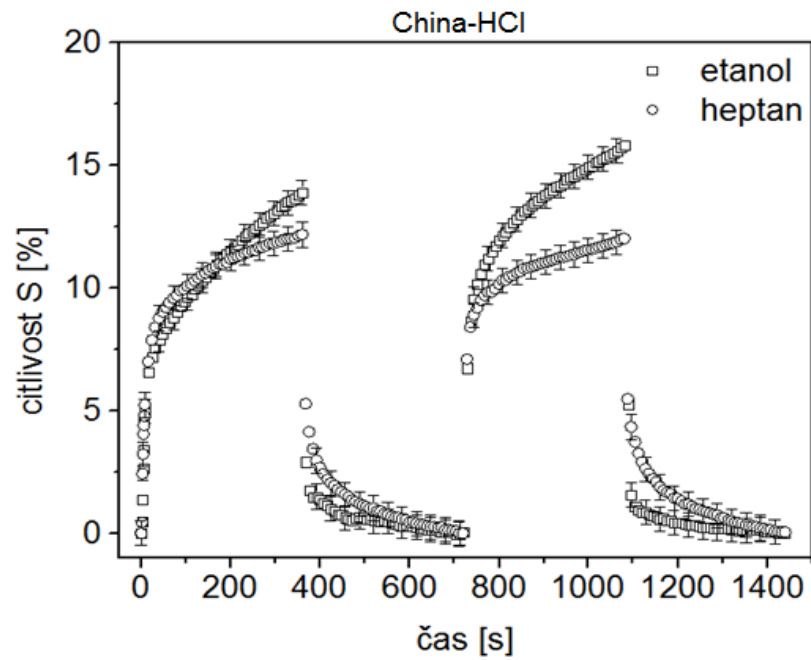
Obr. 31. a) Napnutí PU membrány na kovový nástavec, b) umístění kovového nástavce do Büchnerovy nálevky

8 ODEZVY NA ORGANICKÉ PÁRY

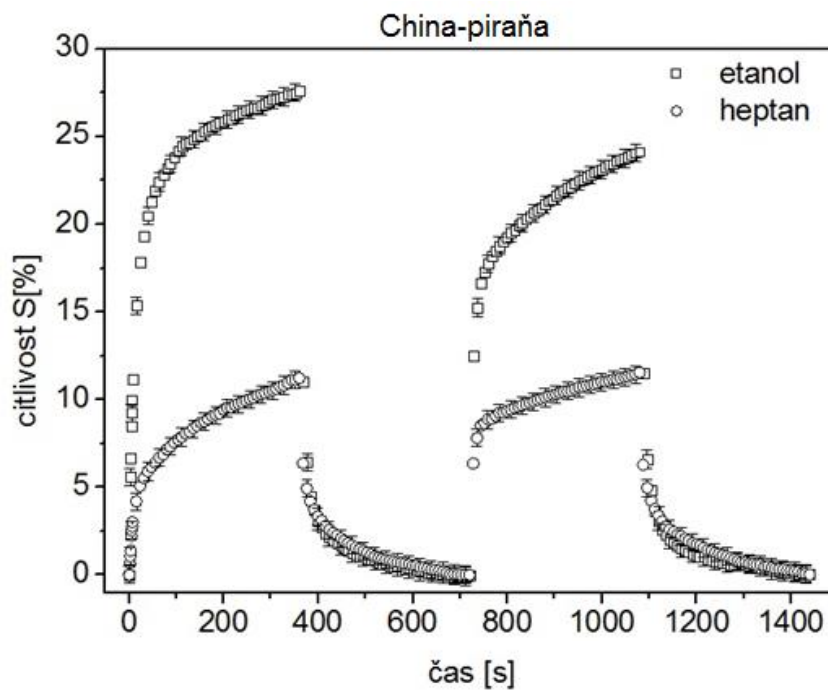
Po vložení vzorku do par etanolu nebo heptanu dojde k adsorpci molekul par na CNT_s a zvýší se odpor. Když jsou po uplynutí doby z par zase odebrány, nastane desorpce a hodnoty odporu klesají – mají schopnost opakovatelnosti. Další jejich vlastnost je senzitivita (citlivost), což znamená, že pro jeden materiál existují 2 různé odezvy. Záleží jen na tom, do jakého druhu par jsou vloženy. Nemalou roli hraje také reprodukovatelnost, která nám říká, že pro stejný materiál existují stejné odezvy. Ty jsou znázorněny chybovými úsečkami. Oxidací se zvyšuje selektivita.



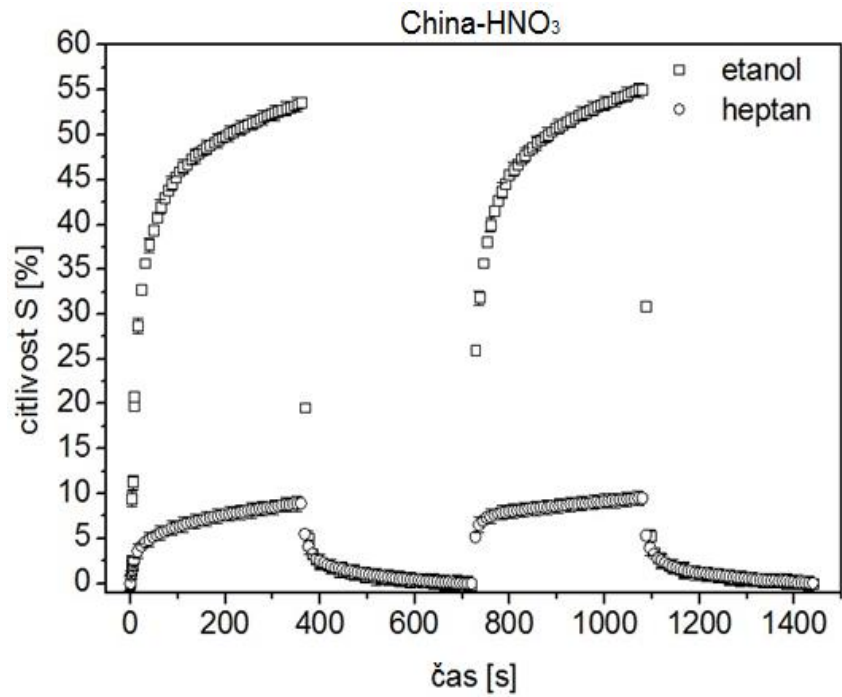
Graf 1. Závislost citlivosti na čase pro materiál China, vloženého do par etanolu a heptanu.



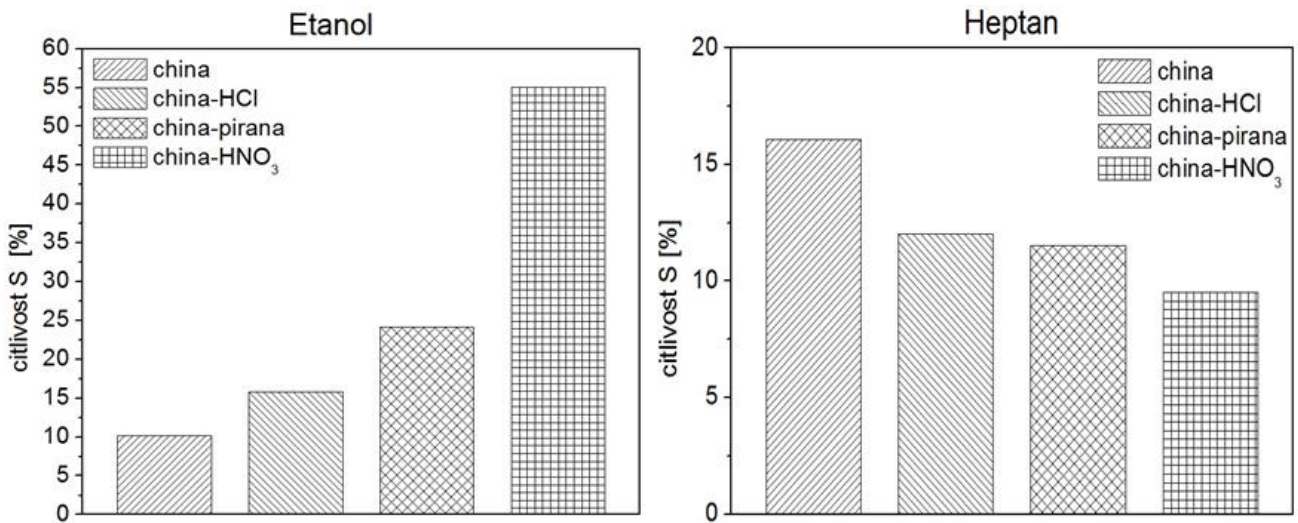
Graf 2. Závislost citlivosti na čase pro materiál China-HCl, vloženého do par etanolu a heptanu.



Graf 3. Závislost citlivosti na čase pro materiál China-piraňa, vloženého do par etanolu a heptanu.



Graf 4. Závislost citlivosti na čase pro materiál China-HNO₃, vloženého do par etanolu a heptanu.



Graf 5. Sloupcové zobrazení citlivosti používaných materiálů.

Měřením byla zjištěna citlivost používaného materiálu. U materiálu, který byl vložený do polárních par etanolu citlivost, stoupala. U nepolárních par heptanu citlivost ve stejném pořadí klesala. Jak je znázorněno v Tab. 1.

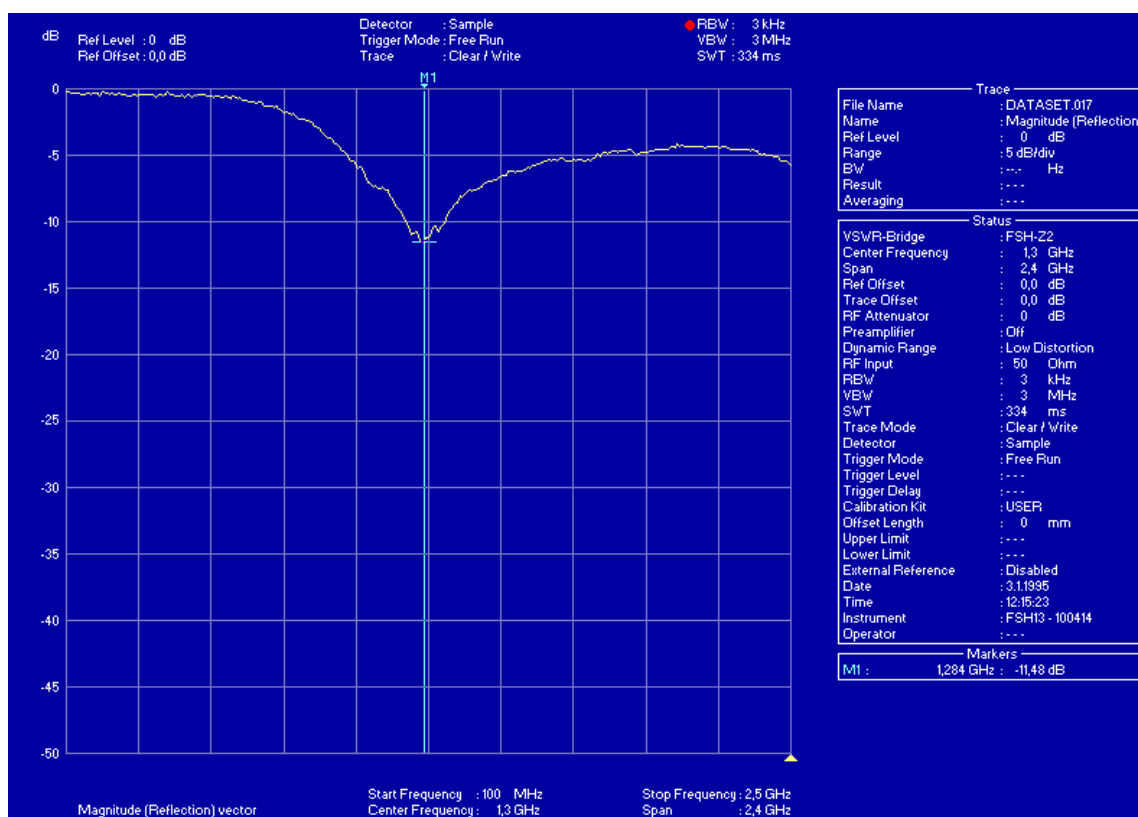
	Etanol	Heptan
China	10,21 %	16,08 %
China-HCl	15,82 %	12,02 %
China-piraňa	24,12 %	11,52 %
China-HNO ₃	55,08 %	9,52 %

Tab. 1. Citlivost jednotlivých materiálů

9 MĚŘENÍ ANTÉNY

Při měření vzorku ze sítě uhlíkových nanotrubic s hodnotou odporu 26Ω a o rozměrech $15 \times 60 \times 0,3$ mm jsou výsledky účinnosti antény dobré a anténa je schopná pracovat v pásmu 1,284 GHz, jak je možné vyčíst z měřených charakteristik Graf 6. až Graf 8.

Měření antény bylo provedeno na spektrálním analyzátoru FSH3 R&S (model se sledovacím generátorem bez předzesilovače) a měřícím můstkem FSH-Z2, který je schopen měřit v šířce pásma od 100 kHz do 3 GHz. Tento rozsah pro experimentální měření postačuje. Následující grafy popisují práci měřené antény.

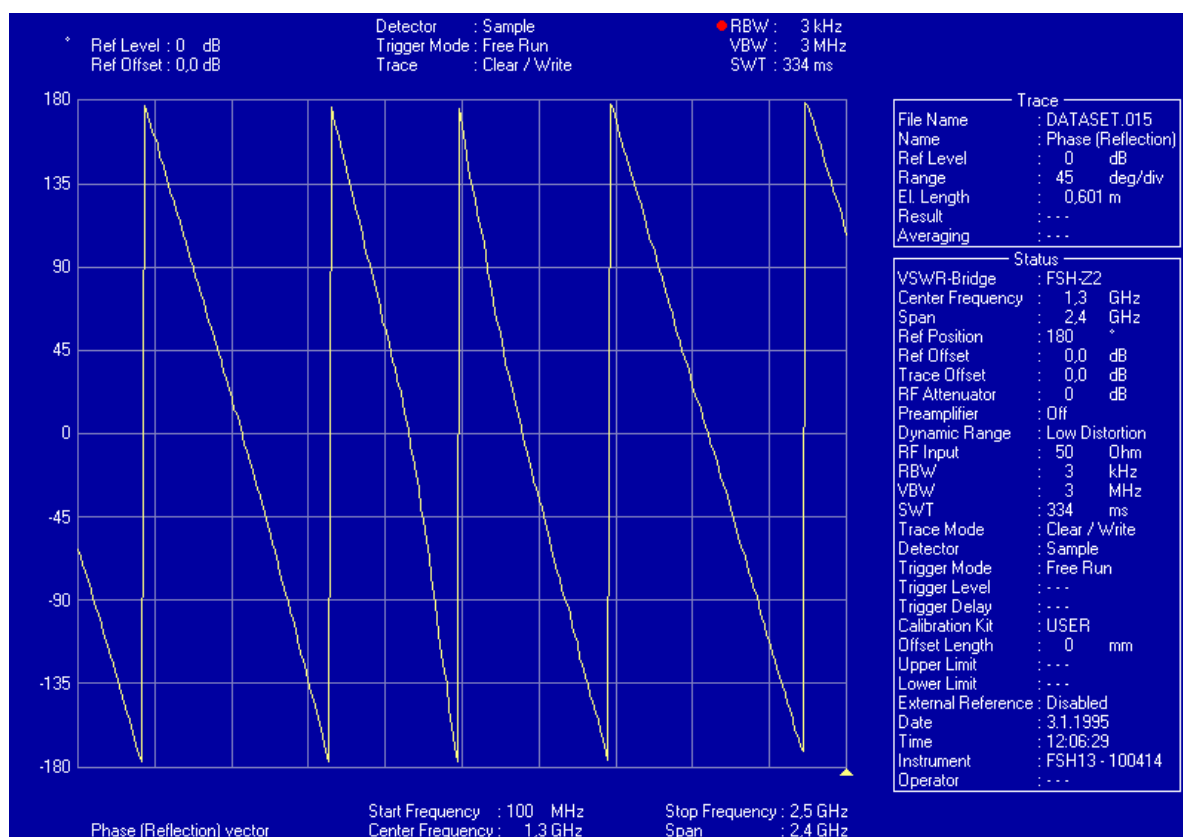


Graf 6. Činitel odrazu vyjádřen v dB v závislosti na frekvenci.

V Grafu 6. je znázorněný průběh činitele odrazu "r" (vyjádřen v dB) v závislosti na frekvenci. Dle markeru vykazuje anténa na frekvenci 1,284 GHz lokální minimum činitele odrazu -11,48 dB a je tedy na této frekvenci nejlépe impedančně přizpůsobená. Když to bude kvantifikováno pro tuto frekvenci, tak: -11,48 dB odpovídá $r = 0,2667$ a tomu odpovídá činitel stojatého vlnění $VSWR = 1,73$ (1 = dokonalé přizpůsobení, vyzáří se 100%; nekonečno = zcela nepřizpůsobené, nevyzáří se nic). Přenos výkonu bude na této frekvenci

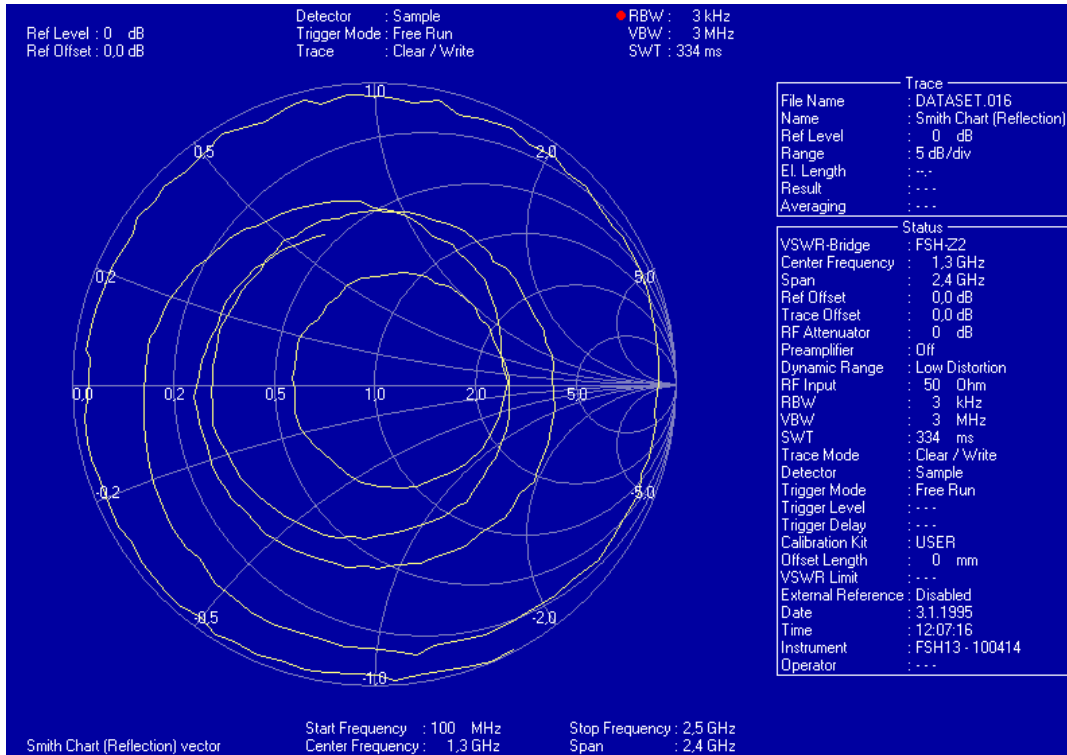
nejlepší a bude dosahovat asi 93%, tzn. z dodaného výkonu na frekvenci 1,284 GHz, bude 93% výkonu vyzářeno a 7% výkonu odraženo (vrátí se zpět do budiče). Čím dále od této frekvence na každou stranu, tím bude situace horší - tzn. činitel odrazu větší, tím pádem činitel stojatého vlnění VSWR poroste a budou se projevovat všechny negativa spojená s impedančním nepřizpůsobením antény ke zdroji signálu (50Ω), tedy horší účinnost, přetěžování budícího zdroje a vznik nežádoucího rušení díky šíření stojatého vlnění.

Graf 7. znázorňuje průběh fáze komplexní impedance na frekvenci. Čistě reálnou složku impedance (tam kde graf protíná osu x, tedy pro $y=0$) vykazuje anténa v daném frekvenčním rozsahu 100MHz - 2,5GHz celkem na 8 frekvencích. Na frekvenci 1,284 GHz je to 50Ω , pro které byla změřena charakteristika v Grafu 6. Graf 7. tedy mimo jiné ukazuje, že mimo 50Ω je ideální impedanční přizpůsobení pro dalších 7 hodnot impedancí (mluvíme stále v rámci měřicího rozsahu).

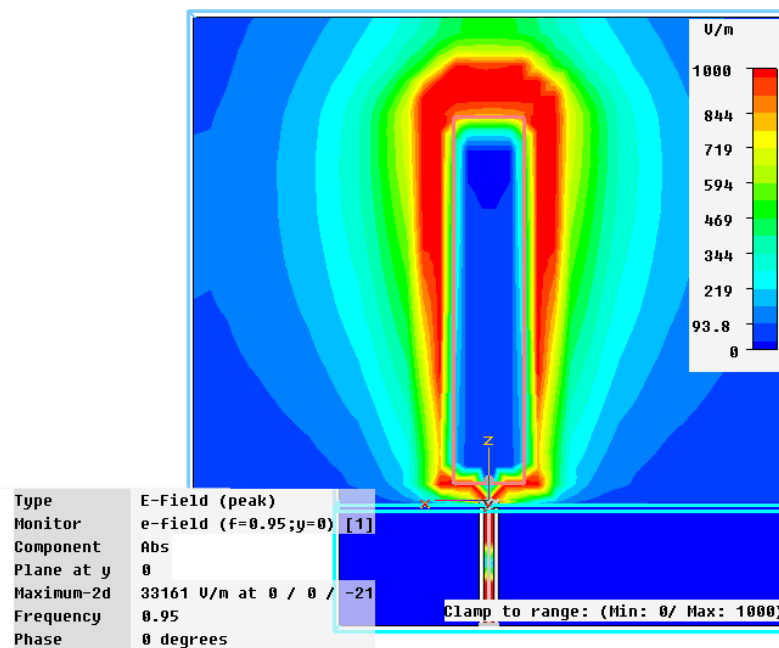


Graf 7. Znázornění průběhu fáze komplexní impedance na frekvenci.

Graf 8. zobrazuje Smithův diagram, ze kterého mohou být tyto impedance vyčteny. Smithův diagram znázorňuje komplexní hodnotu impedance v závislosti na frekvenci; tedy nejen amplitudu, ale i fázi a to v jednom grafu.



Graf 8. Shmithův diagram znázorňuje komplexní hodnotu impedance.



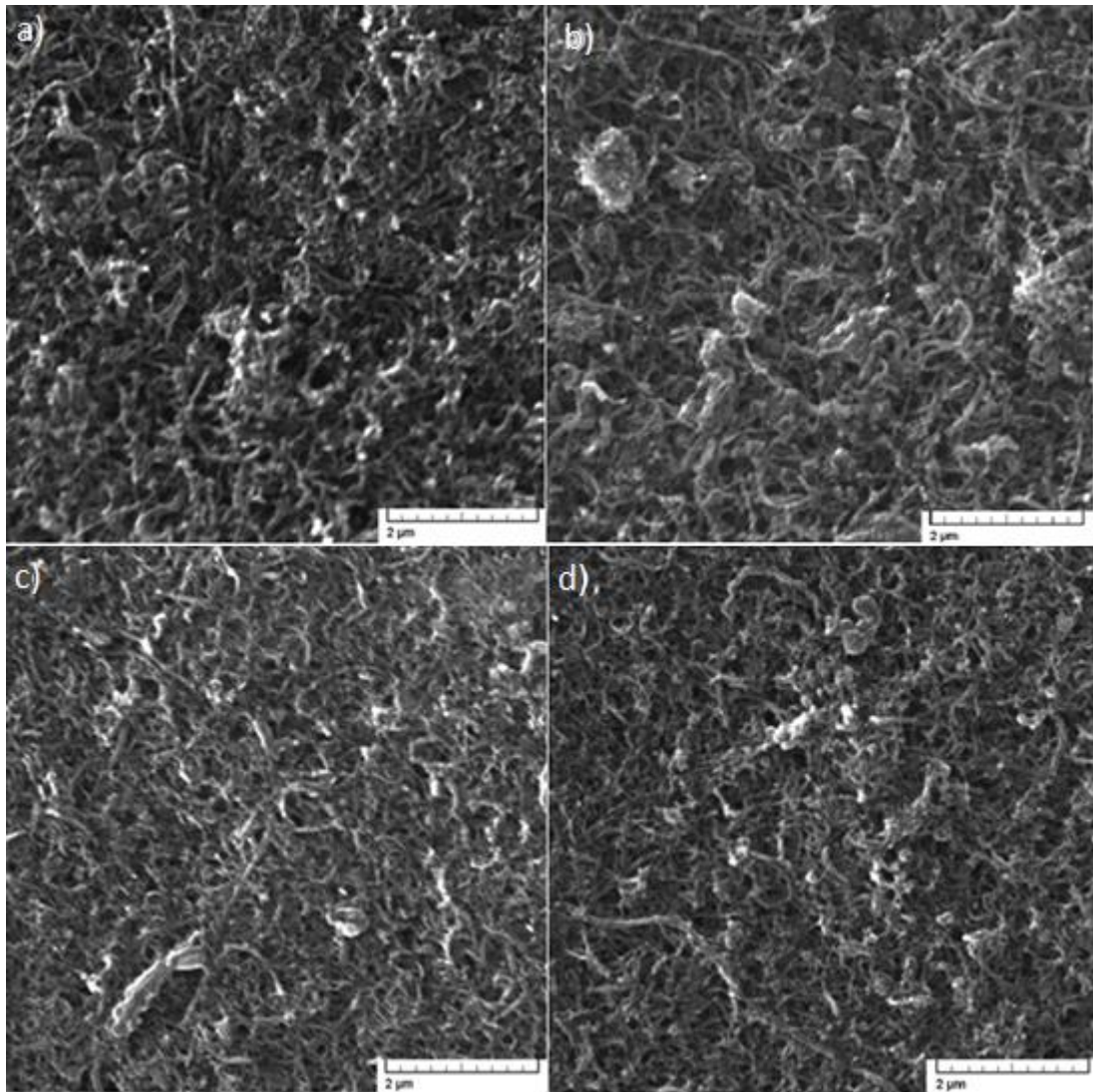
Obr. 32. Simulace monopólu antény

Na Obr. 32. je znázorněný ideální případ šíření elektromagnetického záření antény.

10 MĚŘENÍ A VÝSLEDKY

10.1 ANALÝZA SEM MIKROSKOPEM

Fotky vzorků zobrazené pomocí SEM mikroskopie



Obr. 33. Sítě uhlíkových nanotrubic a) China, b) HCl, c) Piraňa, d) NHO_3

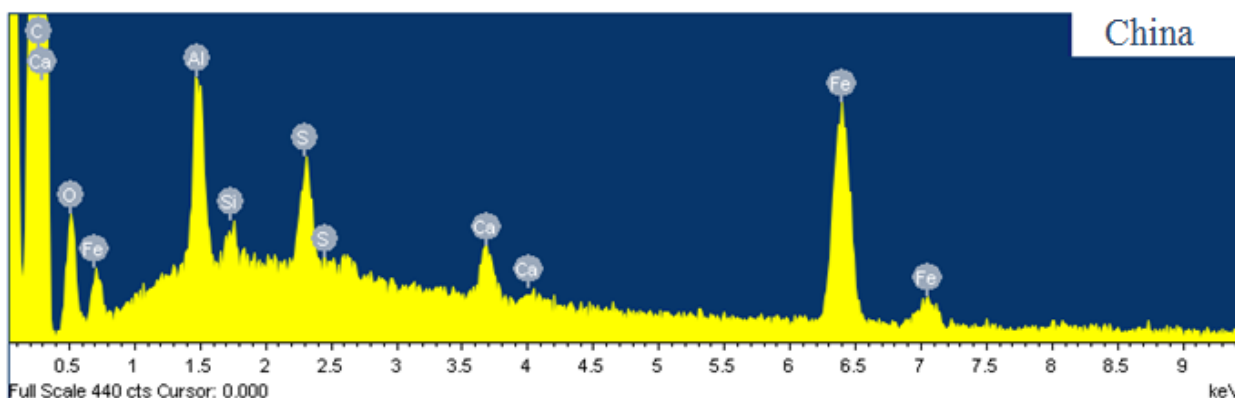
Na obrázku vidíme síť CNT_s filtrované na membráně z PU nanovláken. Vrstvy těchto sítí, které jsou poskládány nahodile přes sebe. Trubice o původní délce se postupně oxidací zkracují, přičemž záleží na způsobu oxidace a použitých kyselinách. Nanotrubičky China nejsou narušené žádnou kyselinou, a proto jsou nejdelší. Oproti nim jsou ostatní nanotrubičky, které byly oxidovány, kratší.

10.2 OBSAH KYSLÍKU

Při analýze vzorků uhlíkových nanotrubic šlo především o přítomnost kyslíku. Byla k tomu použita EDX metoda, která je součástí přístroje pro analýzu SEM.

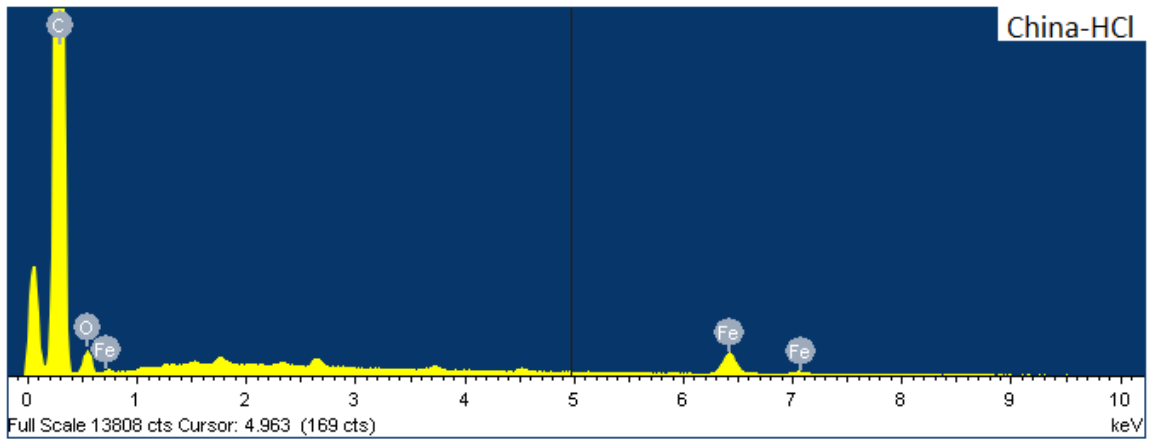
Kyslíkové skupiny byly vytvořeny pomocí oxidace, kdy byly na povrch uhlíkových nanotrubic navázány karboxylové a karbonylové funkční skupiny.

Na povrchu nanotrubic se kromě kyslíku vyskytují i jiné prvky, které se tam mohly navázat například při výrobě.



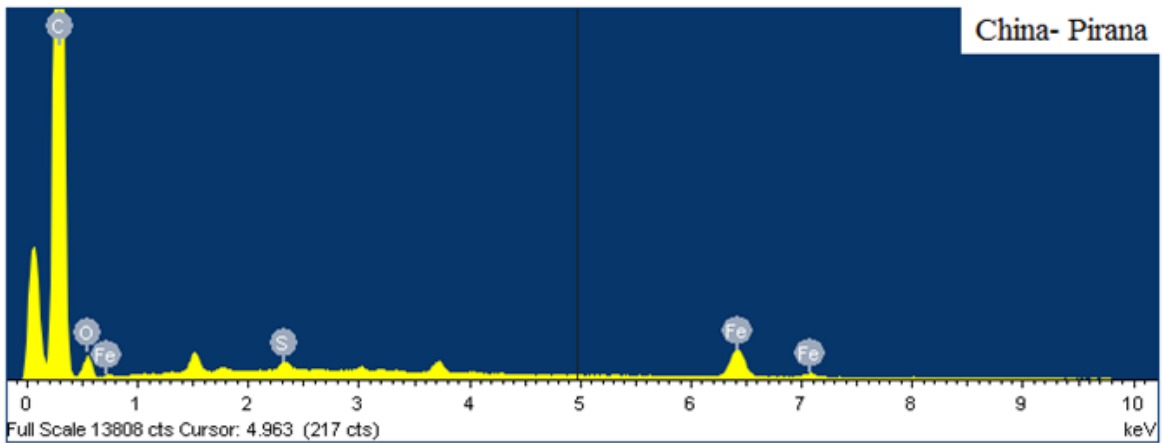
Obr. 34. EDX spektrum sítě z nanotrubic China. Procentuální přítomnost kyslíku je 5,76%

Element	App Conc.	Intensity Corrn.	Weight%	Weight% Sigma	Atomic%
C K	1181.11	1.5233	89.49	0.33	93.30
O K	14.28	0.2239	7.36	0.33	5.76
Al K	4.17	0.8326	0.58	0.02	0.27
Si K	0.75	0.9153	0.09	0.02	0.04
S K	2.66	0.9886	0.31	0.02	0.12
Ca K	1.68	1.0202	0.19	0.02	0.06
Fe K	13.87	0.8103	1.98	0.04	0.44
Totals			100.00		



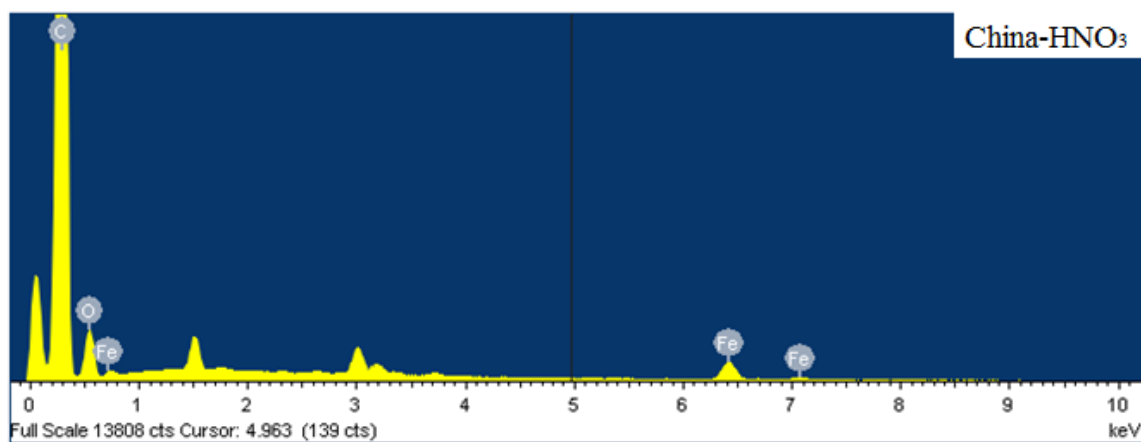
Obr. 35. EDX spektrum sítě z nanotubic China-HCl. Procentuální přítomnost kyslíku je 6,81%

Element	App Conc.	Intensity Corn.	Weight%	Weight% Sigma	Atomic%
C K	1213.75	1.7689	90.11	0.22	92.95
O K	14.98	0.2239	8.79	0.23	6.81
Fe K	6.76	0.8089	1.10	0.02	0.24
Totals			100.00		



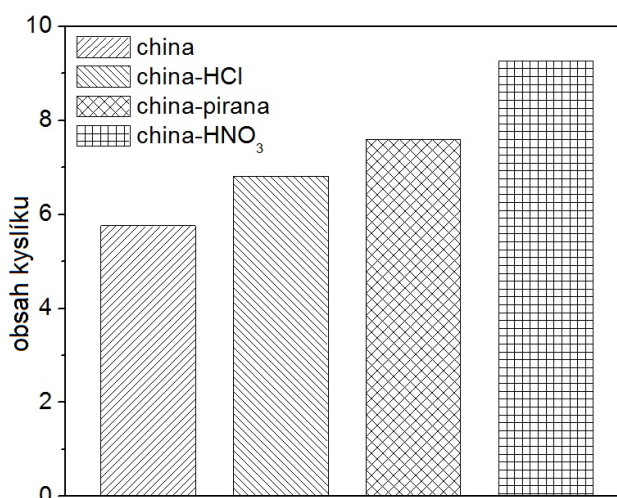
Obr. 36. EDX spektrum sítě z nanotubic China-piraňa. Procentuální přítomnost kyslíku je 7,6%

Element	App Conc.	Intensity Corn.	Weight%	Weight% Sigma	Atomic%
C K	912.70	1.6344	88.38	0.25	91.94
O K	14.07	0.2288	9.73	0.25	7.60
S K	1.21	0.9930	0.19	0.01	0.08
Fe K	8.68	0.8102	1.70	0.03	0.38
Totals			100.00		



Obr. 37. EDX spektrum sítě z nanotrubic China-HNO₃. Procentuální přítomnost kyslíku je 9,27%

Element	App Conc.	Intensy Corrn.	Weight%	Weight% Sigma	Atomic%
C K	1661.82	1.7208	87.46	0.20	90.60
O K	30.45	0.2315	11.91	0.20	9.27
Fe K	5.60	0.8090	0.63	0.01	0.14
Totals			100.00		



Graf 9. Obsah kyslíku oxidovaných nanotrubic.

Z grafu je zjevná síla oxidace, které postupně stoupá od čistých CNT_s (China), až po nanotrubic oxidované HNO₃. Obsah kyslíku závisí na kyselině, která byla pro oxidaci použita. Všechny vzorky byly vytvořeny i měřeny za stejných laboratorních podmínek. Na spektrech je patrné, že čím silnější stupeň oxidace ve vzorku proběhl, tím je kyslíku ve vzorku víc a tím se zvyšuje jeho citlivost k organickým parám (v našem případě etanol a heptan).

11 POUŽÍVANÉ MATERIÁLY A PŘÍSTROJE

Vícestěnné uhlíkové nanotrubičky (MWNT_s)

Pro reakci jsme použili uhlíkové nanotrubičky Sunnano.

Vzhled	Černý prášek
Čistota	>90%
Průměr	10-30 nm
Délka	1-10 μm
Měrný odpor	0,12 Ωcm

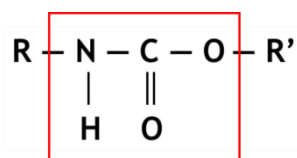
Tab. 2. Parametry MWNT_s

Polyuretan

Polyuretany mají v hlavním řetězci uretanovou vazbu (-NHCOO-), jsou to reaktoplasty (sít'ují), ale mohou to být i termoplasty. Reakcí izokyanátů s alkoholy vznikají uretany, reakcí vícefunkčních izokyanátů s polyalkoholy vznikají polyuretany.

Monomery:

1. Diizokyanáty aromatické (benzidin, diisokyanatoluen, diizokyanátonaftalen, diizokyanátodifenylmetan)
2. Polyglykoly (vyrábějí se z etylenoxidu a propylenoxidu)



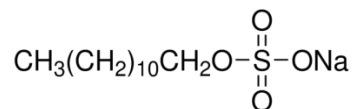
Desmopan DP 2590A je termoplastická polyuretanová pryskyřice (TPU). Byl použitý na elektrostatické zvlákňování i výrobu kompozitu antény.

Odolnost proti nárazu	25%
Teplota tání	210-230°C
Hustota	1205 Kg/m ³
Pevnost v tahu	48,9MPa

Tab. 3. Vlastnosti Desmopanu DP 2590A

Dodecyl sulfát sodný (SDS)

Používá se jako surfaktant. Je to nízkomolekulární látka, která snižuje povrchové napětí vodních roztoků. Disociuje ve vodě za vzniku iontů – kationtů.

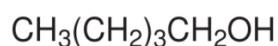


Čistota	≥90,0%
Bod tání	204-207°C
Hustota	0,370 g/cm ³
Molekulová hmotnost	288,38 g/mol

Tab. 4. Vlastnosti SDS

1-pentanol

Hořlavá bezbarvá kapalina a pára. Pára je těžší než vzduch. Může tvořit směsi výbušné se vzduchem. Teplota vznícení je 49°C a teplota samovznícení je 300°C.



Čistota	≥99,0%
Teplota varu	137,8°C
Hustota	0,815 g/cm ³ při 20°C
Molekulová hmotnost	88,15 g / mol

Tab. 5. Vlastnosti 1-pentanolu

Hydroxid sodný (NaOH)

Jedná se o pevnou, bílou látku. Silná reakce s vodou. Stabilní v pevných kontejnerech při pokojové teplotě. Disociuje za vzniku Na⁺ a OH⁻.

Čistota	Min.98,0%
pH	14
Teplota varu	1390°C
Teplota tání	318°C
Molární hmotnost	40 g/mol
Hustota	2,13 g/cm ³

Tab. 6. Vlastnosti NaOH

Ultrazvuková vodní lázeň BANDELIN sonorex digitec DT 103H

Ultrazvuková lázeň s membránovou klávesnicí a rozšířenými funkcemi. Výkon ultrazvuku 640 W a výkon ohřevu 200 W. Zahřívání vzorku. Při dispergaci jsou trubice lépe rozptýleny.



Obr. 38. Ultrazvuková vodní lázeň BANDELIN sonorex digitec DT 103H

Ultrazvukový sonikátor UP400S

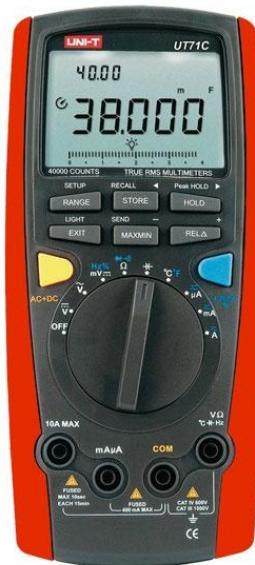
Dispergace vzorku ultrazvukem. Výkon 400 W, frekvence 24 kHz.



Obr. 39. Ultrazvukový sonikátor UP400S

Digitální multimetr RC UNI-T UT71C

Měření odporu vzorků vložených do par etanolu a hexanu.



Obr. 40. Digitální multimetr RC UNI-T UT71C

SEM mikroskop

Skenovací elektronový mikroskop je přístroj určený k pozorování povrchů nejrůznějších vzorků s cíleným svazkem elektronů. Elektrony pronikají do vzorku a vytváří obraz.



Obr. 41. SEM mikroskop

Spektrální analyzátor FSH3 R&S s měřícím můstkem FSH-Z2

Přístroj byl použitý na měření antény. Je schopen měřit v šířce pásma 100 kHz - 3 GHz.



Obr. 42. Spektrální analyzátor FSH3 R&S s měřícím můstkem FSH-Z2

ZÁVĚR

Pro měření byly použity čisté uhlíkové nanotrubičky, které byly oxidovány kyselinami (HCl, HNO₃ a směsí H₂SO₄ a H₂O₂), čímž vznikly různě oxidované uhlíkové nanotrubičky. Tyto směsi byly filtrovány pomocí vakuové filtrace, dokud neměla směs pH7. Po usušení byly použity k vytvoření vodné disperze. Vzniklý vzorek byl umístěn do ultrazvukového sonikátoru, kde se dispergoval. Poté byl filtrován přes polyuretanovou filtrační membránu, která byla vyrobena elektrostatickým zvlákňováním roztoku PU v dimethylformamidu.

Měřením byla zjištěna citlivost sítí uhlíkových nanotrubic k organickým parám. U materiálu, který byl vložen do polárních par etanolu, citlivost stoupala v pořadí China = 10,2%, China-HCl = 15,82%, China-piraňa = 24,12% a China-HNO₃ = 55,05%. U nepolárních par heptanu citlivost ve stejném pořadí klesala China = 16,08%, China-HCl = 12,02%, China-piraňa = 11,52% a China-HNO₃ = 9,52%. Hodnoty jsou dobře viditelné ve sloupcovém Grafu 5.

Byl vytvořen senzor schopný detekovat páry. Při odezvách na organické páry hrají důležitou roli 3 hlavní aspekty: opakovatelnost, senzitivita (citlivost) a reprodukovatelnost.

Byl vyroben vzorek antény, který měl hodnotou odporu 26 Ω a rozměry 15x60x0,3 mm. Nejdříve byla jeho účinnost simulována. Po jeho skutečném změření byla zjištěna velmi dobrá účinnost antény. Anténa byla schopná pracovat v pásmu 1,284 GHz. Dle markeru vykazuje anténa na této frekvenci lokální minimum činitele odrazu -11,48 dB a byla tedy na této frekvenci dobře impedančně přizpůsobena.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] C.S. Yeung, Y.K. Chen, Y.A. Wang, Defected and Substitutionally Doped Nanotubes: Applications in Biosystems, Sensors, Nanoelectronics, and Catalysis, in: M. Naraghi (Ed.), Carbon Nanotubes - Growth and Applications, InTech, Rijeka, 2011: p. 115.
- [2] P. Avouris, Carbon nanotube electronics and photonics, *Physics Today*. 62 (2009) 34.
- [3] T. Zhang, S. Mubeen, N. V Myung, M. a Deshusses, Recent progress in carbon nanotube-based gas sensors., *Nanotechnology*. 19 (2008) 332001.
- [4] Z.-M. Huang, Y.-Z. Zhang, M. Kotaki, S. Ramakrishna, A review on polymer nanofibers by electrospinning and their applications in nanocomposites, *Composites Science and Technology*. 63 (2003) 2223–2253.
- [5] A. Frenot, I.S. Chronakis, Polymer nanofibers assembled by electrospinning, *Current Opinion in Colloid & Interface Science*. 8 (2003) 64–75.
- [6] N. Bhardwaj, S.C. Kundu, Electrospinning: a fascinating fiber fabrication technique., *Biotechnology Advances*. 28 (2010) 325–47.
- [7] Roller Electrospinning, [online], [cit. 12. 5. 2013]. Dostupný z WWW: [Http://en.wikipedia.org/wiki/Roller_electrospinning](http://en.wikipedia.org/wiki/Roller_electrospinning), (n.d.).
- [8] Z. Rožek, W. Kaczorowski, D. Lukáš, P. Louda, S. Mitura, Potential applications of nanofiber textile covered by carbon coatings, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 27 (2008) 35–38.
- [9] S. Iijima, Helical microtubules of graphitic carbon, *Nature*. 354 (1991) 56–58.
- [10] S. Iijima, T. Ichihashi, Single-shell carbon nanotubes of 1-nm diameter, *Nature*. 363 (1993) 603–605.
- [11] D.S. Bethune, C.H. Klang, M.S. de Vries, G. Gorman, R. Savoy, J. Vazquez, et al., Cobalt-catalysed growth of carbon nanotubes with single-atomic-layer walls, *Nature*. 363 (1993) 605–607.
- [12] N. Hamada, S. Sawada, A. Oshiyama, New one-dimensional conductors: Graphitic microtubules, *Physical Review Letters*. 68 (1992) 1579–1581.
- [13] R. Saito, M. Fujita, G. Dresselhaus, M. Dresselhaus, Electronic structure of graphene tubules based on C_{60} , *Physical Review B*. 46 (1992) 1804–1811.
- [14] R. Saito, M. Fujita, G. Dresselhaus, M.S. Dresselhaus, Electronic structure of chiral graphene tubules, *Applied Physics Letters*. 60 (1992) 2204.

- [15] J. Wildoer, L. Venema, A. Rinzler, Electronic structure of atomically resolved carbon nanotubes, *Nature*. 391 (1998) 59–62.
- [16] T. Odom, J. Huang, P. Kim, C. Lieber, Atomic structure and electronic properties of single-walled carbon nanotubes, *Nature*. 391 (1998) 1997–1999.
- [17] R. Daza, LOS NANOTUBOS DE CARBONO Y LA INGENIERÍA DE TEJIDOS (I), [online], [cit. 12. 5. 2013]. Dostupný z WWW: <http://www.madrimasd.org/blogs/ingenieriamateriales/2012/03/25/347/>, Madrimasd.org. (n.d.).
- [18] N. Sinha, J. Ma, J.T.W. Yeow, Carbon Nanotube-Based Sensors, *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*. 6 (2006) 573–590.
- [19] C. Journet, P. Bernier, Production of carbon nanotubes, *Applied Physics A: Materials Science & Processing*. 67 (1998) 1–9.
- [20] Y. Ando, X. Zhao, T. Sugai, M. Kumar, Growing carbon nanotubes, *Materials Today*. 7 (2004) 22–29.
- [21] M. Endo, K. Takeuchi, S. Igarashi, The production and structure of pyrolytic carbon nanotubes (PCNTs), *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. 54 (1993) 1841–1848.
- [22] H. Dai, A. Rinzler, P. Nikolaev, Single-wall nanotubes produced by metal-catalyzed disproportionation of carbon monoxide, *Chemical Physics Letters*. 260 (1996) 471–475.
- [23] J.G. Lu, T. Kawaharamura, H. Nishinaka, Y. Kamada, T. Ohshima, S. Fujita, Zn-based thin films synthesized by atmospheric pressure mist chemical vapor deposition, *Journal of Crystal Growth*. 299 (2007) 1–10.
- [24] K. Kaur, Carbon Nanotubes – Application as Gas Sensors, [online], [cit. 12. 5. 2013]. Dostupný z WWW: <http://www.azonano.com/article.aspx?ArticleID=3107>, (2012).
- [25] B. Mahar, C. Laslau, R. Yip, Y. Sun, Development of carbon nanotube-based sensors—a review, *Sensors Journal, IEEE*. 7 (2007) 266–284.
- [26] K. Balasubramanian, M. Burghard, Chemically functionalized carbon nanotubes., Small (Weinheim an Der Bergstrasse, Germany). 1 (2005) 180–92.
- [27] U. Vohrer, N. Zschoerper, B. Moller, Carbon Nanotubes — A Material rising like a Phoenix, *Vakuum in Forschung Und Praxis*. 20 (2008) 38–46.
- [28] P. Avouris, Supertubes [carbon nanotubes], *IEEE Spectrum*. 41 (2004) 40–45.
- [29] J.-P. Salvetat, G. Briggs, J.-M. Bonard, R. Bacsá, A. Kulik, T. Stöckli, et al., Elastic and Shear Moduli of Single-Walled Carbon Nanotube Ropes, *Physical Review Letters*. 82 (1999) 944–947.

- [30] J. Bernholc, D. Brenner, M. Buongiorno Nardelli, V. Meunier, C. Roland, Mechanical and Electrical Properties of Nanotubes, *Annual Review of Materials Research*. 32 (2002) 347–375.
- [31] M. Daenen, R. De Fouw, B. Hamers, The wondrous world of carbon nanotubes, Eindhoven University of Technology. (2003).
- [32] P. Lambin, V. Meunier, Connecting carbon nanotubes with pentagon–heptagon pair defects, [online], [cit. 12. 5. 2013]. Dostupný z WWW: <http://perso.fundp.ac.be/~phlambin/Nanotube/knee.html>, (2002).
- [33] F.A.D.S. Batista, R.D. Manzanares, M. Dos Reis Júnior, R. Custódio, A.C.M. Carvalho, Comparative study of B_xN_yC_z nanojunctions fragments, *Materials Research*. 14 (2011) 281–286.
- [34] F. Cui, C. Luo, J. Dong, Dimerization of C₆₀ molecules within the single-walled carbon nanotube, *Physics Letters A*. 327 (2004) 55–60.
- [35] L. Vaisman, H.D. Wagner, G. Marom, The role of surfactants in dispersion of carbon nanotubes., *Advances in Colloid and Interface Science*. 128-130 (2006) 37–46.
- [36] L.A. Dobrzański, M. Pawlyta, A. Krztoń, B. Liszka, K. Labisz, Synthesis and characterization of carbon nanotubes decorated with platinum nanoparticles, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 39 (2010) 184–189.
- [37] N.G. Sahoo, S. Rana, J.W. Cho, L. Li, S.H. Chan, Polymer nanocomposites based on functionalized carbon nanotubes, *Progress in Polymer Science*. 35 (2010) 837–867.
- [38] M. Burghard, Electronic and vibrational properties of chemically modified single-wall carbon nanotubes, *Surface Science Reports*. 58 (2005) 1–109.
- [39] V. Datsyuk, M. Kalyva, K. Papagelis, J. Parthenios, D. Tasis, a. Siokou, et al., Chemical oxidation of multiwalled carbon nanotubes, *Carbon*. 46 (2008) 833–840.
- [40] S. Liu, Q. Shen, Y. Cao, L. Gan, Z. Wang, M.L. Steigerwald, et al., Chemical functionalization of single-walled carbon nanotube field-effect transistors as switches and sensors, *Coordination Chemistry Reviews*. 254 (2010) 1101–1116.
- [41] Z.L. Wang, Transmission Electron Microscopy of Shape-Controlled Nanocrystals and Their Assemblies, *The Journal of Physical Chemistry B*. 104 (2000) 1153–1175.
- [42] B.R. Masters, History of the Electron Microscope in Cell Biology, *ENCYCLOPEDIA OF LIFE SCIENCES*. (2009) 1–9.
- [43] MICROSCOPY, [online], [cit. 12. 5. 2013]. Dostupný z WWW: Http://www.ufrgs.br/imunovet/molecular_immunology/microscopy.html, (n.d.).

- [44] R.F. Egerton, *Physical Principles of Electron Microscopy*, Springer, Edmonton, 2005.
- [45] M.C. Asplund, M.T. Zanni, R.M. Hochstrasser, Two-dimensional infrared spectroscopy of peptides by phase-controlled femtosecond vibrational photon echoes., *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 97 (2000) 8219–24.
- [46] Ongoing Project 5 - Infrared Spectroscopy for the Characterization of Surfaces, [online], [cit. 12. 5. 2013]. Dostupný z WWW: [Http://research.chem.ucr.edu/groups/zaera/ongoingproject5.html](http://research.chem.ucr.edu/groups/zaera/ongoingproject5.html), (n.d.).
- [47] C.N.R. Rao, B.C. Satishkumar, A. Govindaraj, M. Nath, Nanotubes, *CHEMPHYSICHEM*. 2 (2001) 78–105.
- [48] L.A. Lyon, C.D. Keating, A.P. Fox, B.E. Baker, L. He, S.R. Nicewarner, et al., Raman Spectroscopy, *Analytical Chemistry*. 70 (1998) 341–362.
- [49] T. Belin, F. Epron, Characterization methods of carbon nanotubes: a review, *Materials Science and Engineering: B*. 119 (2005) 105–118.
- [50] T.J. Römer, J.F. Brennan III, T.C. Bakker Schut, R. Wolthuis, R.C.M. van den Hoogen, J.J. Emeis, et al., Raman spectroscopy for quantifying cholesterol in intact coronary artery wall, *Atherosclerosis*. 141 (1998) 117–124.
- [51] D. Sun, T. Kiyobayashi, titanium and zirconium doped NaAlH₄: elucidation of doping induced structural changes and their relationship to enhanced hydrogen storage properties, *Journal of Alloys and Compounds*. 337 (2002) L8–L11.
- [52] P. Mayr, T.A. Palmer, J.W. Elmer, E.D. Specht, S.M. Allen, Formation of Delta Ferrite in 9 Wt Pct Cr Steel Investigated by In-Situ X-Ray Diffraction Using Synchrotron Radiation, *Metallurgical and Materials Transactions A*. 41 (2010) 2462–2465.
- [53] B. Dan, G.C. Irvin, M. Pasquali, Continuous and scalable fabrication of transparent conducting carbon nanotube films., *ACS Nano*. 3 (2009) 835–43.
- [54] M. Kaempgen, G.S. Duesberg, S. Roth, Transparent carbon nanotube coatings, *Applied Surface Science*. 252 (2005) 425–429.
- [55] L. Hu, D. Hecht, G. Grüner, Percolation in transparent and conducting carbon nanotube networks, *Nano Letters*. 4 (2004) 2513–2517.
- [56] Q. Wang, H. Moriyama, Doped carbon nanotubes: Synthesis, characterization and applications, in: S. Yellampalli (Ed.), *Carbon Nanotubes - Synthesis, Characterization, Applications*, InTech, Rijeka, 2011: p. 496.
- [57] T. Kitano, Y. Maeda, T. Akasaka, Preparation of transparent and conductive thin films of carbon nanotubes using a spreading/coating technique, *Carbon*. 47 (2009) 3559–3565.

- [58] N. Sahu, B. Parija, S. Panigrahi, Fundamental understanding and modeling of spin coating process: A review, *Indian Journal of Physics*. 83 (2009) 493–502.
- [59] V. Cregan, S.B.G. O'Brien, A note on spin-coating with small evaporation., *Journal of Colloid and Interface Science*. 314 (2007) 324–8.
- [60] P. Yimsiri, M.R. Mackley, Spin and dip coating of light-emitting polymer solutions: Matching experiment with modelling, *Chemical Engineering Science*. 61 (2006) 3496–3505.
- [61] G. Gruner, Two-Dimensional Carbon Nanotube Networks: A Transparent Electronic Material, *MRS Proceedings*. 905 (2011) 0905–DD06–05.
- [62] H. Gu, T.M. Swager, Fabrication of Free-standing, Conductive, and Transparent Carbon Nanotube Films, *Advanced Materials*. 20 (2008) 4433–4437.
- [63] F. Mirri, A.W.K. Ma, T.T. Hsu, N. Behabtu, S.L. Eichmann, C.C. Young, et al., High-performance carbon nanotube transparent conductive films by scalable dip coating., *ACS Nano*. 6 (2012) 9737–44.
- [64] T.A. Technology, ALN-9662 Squiggle-SH Inlay, (2008).
- [65] Y. Wang, J.T.W. Yeow, A Review of Carbon Nanotubes-Based Gas Sensors, *Journal of Sensors*. 2009 (2009) 1–24.
- [66] H.C. Wang, Y. Li, M.J. Yang, Sensors for organic vapor detection based on composites of carbon nonotubes functionalized with polymers, *Sensors and Actuators B: Chemical*. 124 (2007) 360–367.
- [67] S. Chopra, K. McGuire, N. Gothard, a. M. Rao, A. Pham, Selective gas detection using a carbon nanotube sensor, *Applied Physics Letters*. 83 (2003) 2280.
- [68] N. Yamazoe, K. Shimano, Theory of power laws for semiconductor gas sensors, *Sensors and Actuators B: Chemical*. 128 (2008) 566–573.
- [69] S. Ammu, V. Dua, S.R. Agnihotra, S.P. Surwade, A. Phulgirkar, S. Patel, et al., Flexible, all-organic chemiresistor for detecting chemically aggressive vapors., *Journal of the American Chemical Society*. 134 (2012) 4553–6.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

SWNT	Jednotěnná uhlíková nanotrubičice
MWNT	Vícetěnná uhlíková nanotrubičice
CNT	Uhlíkové nanotrubičice
Fe	Železo
Co	Kobalt
Ni	Nikl
Y	Yttrium
Mo	Molybden
CO	Oxid uhelnatý
CO ₂	Oxid uhličitý
CVD	Chemická depozice z plynné fáze
NEMS	Nanoelectromechanický systém
C ₆₀	Typ fullerenu
π	Pí
- COOH	Karboxylová skupina
- OH	Hydroxylová skupina
NaDDBS	Dodecylbenzensulfonát sodný
SDS	Dodecylsulfát sodný
YAG	Pevnolátkový laser
TEM	Transmisní elektronová mikroskopie
SEM	Skenovací elektronová mikroskopie
XRD	Rentgenová difrakce
STM	Skenovací tunelová mikroskopie
CCD	Elektronická součástka používaná pro snímání obrazové informace

ITO	Indium-Tin-Oxid
AFM	Mikroskopie atomárních sil (atomic force microscopy)
PET	Polyetylentereftalát
RFID	Radiofrekvenční identifikace
LaB ₆	Lanthan hexaborid
IR	Infračervené záření
Ar	Argon
HCl	Kyselina chlorovodíková
NO ₂	Oxid dusičitý
HNO ₃	Kyselina dusičná
ω	Rychlost otáčení
c	Koncentrace roztoku
sp ² ,sp ³	Hybridizace uhlíku
C	Chirální vektor
H ₂ O ₂	Peroxid vodíku
H ₂ SO ₄	Kyselina sírová
NH ₃	Amoniak
DEP	Dielektroforézní metoda
N ₂	Dusík
SO ₂	Oxid siřičitý
H ₂	Vodík
O ₃	Ozón
He	Helium
DMF	Dimetylformamid
Au	Zlato
Ti	Titan

IDE _s	Interdigitated electrodes
HF	Kyselina fluorovodíková
C ₆ H ₁₄	n-Hexan
CHCl ₃	Chloroform
CH ₃ OH	Metanol
C ₃ H ₆ O	Aceton
C ₆ H ₅ CH ₃	Toluen
VSWR	Činitel stojatého vlnění
r	Činitel odrazu
PU	Polyuretan
NaOH	Hydroxid sodný
UHF	Kmitočtové pásmo
dB	Jednotka intenzity signálu
Hz	Jednotka frekvence
Ω	Jednotka odporu
-NHCOO-	Uretanová vazba
EDX	Rentgenová analýza
TPU	Termoplastická polyuretanová pryskyřice
bar	Jednotka tlaku
torr	Jednotka tlaku
S/cm	Jednotka vodivosti
A	Jednotka proudu
V	Jednotka napětí
Ω/Sq	Jednotka plošného odporu
eV	Jednotka energie urychlených elektronů
cm.s ⁻¹	Jednotka rychlosti

g/m^2	Jednotka plošné hmotnosti
$\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$	Jednotka viskozity
r/min	Jednotka rotace elektrody
m^2/g	Jednotka specifické plochy povrchu
W	Jednotka výkonu
TPa	Jednotka pevnosti v tahu

SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obr. 1. Blokové schéma aparátu pro elektrostatické zvlákňování (a) vertikální a (b) horizontální [6]
- Obr. 2. Elektrostatické zvlákňování pomocí válečku [7]
- Obr. 3. A) Jednostěnná uhlíková nanotrubička SWNT, B) víceštěnná uhlíková nanotrubička MWNT [17]
- Obr. 4. Schéma přístroje obloukového výboje [20]
- Obr. 5. Schéma výroby laserovou ablací [20]
- Obr. 6. Schéma parního-CVD přístroje. Vložený obrázek naznačuje hraniční vrstvy modelu, které se skládají ze čtyř zón [23]
- Obr. 7. Rovinný grafitový arch a jeho stočení do třech různých modifikací [26]
- Obr. 8. Rovinný grafitový arch. CNT mohou být vyrobeny stočením archu podél vektoru zabalení C. Počátek je v bodě C, vytvořenou nanotrubicí znázorňují indexy (11,7) [25]
- Obr. 9. Struktury izolovaných ohnutých nanotrubic užívané v Rochefort výpočtech; čísla představují zakřivení úhlů (úhel mezi svislou a zakřivenou částí) [25]
- Obr. 10. Nahoře: Y - větev, T – větev [33]
- Obr. 11. A) Spodní polovina tohoto hybridu je polovodičová, horní část je vodivá chirální nanotrubička. Úhel ohybu spojení je 12° ; B) (9,0) - (5-5) „koleno“, průměry obou polovin nanotrubic jsou kolem 0,35 nm. Struktura nanospojení vodič-vodič byla optimalizována na zjednodušeném molekulárním mechanickém modelu, úhel ohybu je 36° , C) (11,0) - (12,0) spojení je hybrid polovodič-vodič. Dvě nanotrubičky s paralelní (nebo cik-cak) orientací jsou spojeny hranou sdílející pětiúhelník (červená) a sedmiúhelník (modrá) orientovány rovnoběžně k ose trubice. Elektronická struktura byla vypočítána pomocí pevné vazebné rekurze [32]
- Obr. 12. Zvláštní typ struktury je tzv. hrachový lusk, uhlíkové nanotrubičky s C_{60} (9,9) molekulami uzavřenými v nanotrubicí [31,34]
- Obr. 13. Chemická modifikace nanotrubičky pomocí tepelné oxidace a následovaná esterifikace nebo amidace na karboxylové skupiny [26]

- Obr. 14. Možné funkcionalizace SWNTs.: A) funkcionalizace vadných-skupin, B) kovalentní funkcionalizace, C) nekovalentní funkcionalizace s povrchově aktivní látkou, D) nekovalentní funkcionalizace s polymery a E) plnění dutiny trubice SWNT např. C_{60} [40]
- Obr. 15. Transmisní elektronový mikroskop (TEM) [43]
- Obr. 16. Skenovací elektronový mikroskop (SEM) [43]
- Obr. 17. Schéma infračervené spektroskopie [46]
- Obr. 18. Blokové schéma systému Ramanovy spektroskopie [50]
- Obr. 19. Schéma rentgenové difrakce [52]
- Obr. 20. Schéma vakuové filtrace [56]
- Obr. 21. a) Struktura vinutého drátu, b) schéma nátěru a c) boční pohled na b). [57]
- Obr. 22. Schéma rotačního natírání [59]
- Obr. 23. Schéma natírání ponorem [60]
- Obr. 24. a) závislost optické prostupnosti na plošném odporu CNT sítě, b) závislost plošného odporu na objemu disperze [61]
- Obr. 25. SEM obrazy (a) a TEM obrazy (b) filmů přenesených na TEM mřížky: přítomnost izotropní sítě individuálních CNTs a svazků je pravděpodobně odpovědné za izotropní elektrické vlastnosti filmů. Filmy se pomocí chloroformu srazily dřív, než jsou oddělené od podložního sklíčka s vodní lázní [63]
- Obr. 26. a) foto mikropáskové antény na bázi sítě z uhlíkových nanotrubic jako aktivní vrstva nanosená na skleněném substrátu b) technický náčrt antény (černé části představují anténu)
- Obr. 27. Komerčně vyráběný RFID tag s čipem pro pásmo UHF [64]
- Obr. 28. Schéma procesu elektrostatického zvlákňování s Nanospider strojem s rotační zvlákňovací elektrodou s jehlami
- Obr. 29. Síť polyuretanových vláken
- Obr. 30. Sestavená aparatura pro oxidaci uhlíkových nanotrubic

- Obr. 31. a) Napnutí PU membrány na kovový nástavec, b) umístění kovového nástavce do Büchnerovy nálevky
- Obr. 32. Simulace monopólu antény
- Obr. 33. Sítě uhlíkových nanotrubic a) China, b) HCl, c) Piraña, d) NHO_3
- Obr. 34. EDX spektrum sítě z nanotrubic China. Procentuální přítomnost kyslíku je 5,76%
- Obr. 35. EDX spektrum sítě z nanotrubic China-HCl. Procentuální přítomnost kyslíku je 6,81%
- Obr. 36. EDX spektrum sítě z nanotrubic China-piraña. Procentuální přítomnost kyslíku je 7,6%
- Obr. 37. EDX spektrum sítě z nanotrubic China- HNO_3 . Procentuální přítomnost kyslíku je 9,27%
- Obr. 38. Ultrazvuková vodní lázeň BANDELIN sonorex digitec DT 103H
- Obr. 39. Ultrazvukový sonikátor UP400S
- Obr. 40. Digitální multimetr RC UNI-T UT71C
- Obr. 41. SEM mikroskop
- Obr. 42. Spektrální analyzátor FSH3 R&S s měřícím můstkem FSH-Z2

SEZNAM TABULEK

Tab. 1. Citlivost jednotlivých materiálů

Tab. 2. Parametry MWNT_s

Tab. 3. Vlastnosti Desmopanu DP 2590A

Tab. 4. Vlastnosti SDS

Tab. 5. Vlastnosti 1-pentanolu

Tab. 6. Vlastnosti NaOH