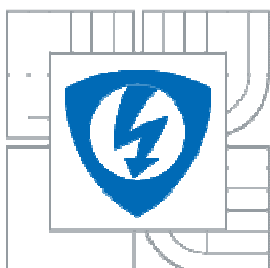


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

VYUŽITÍ OXIDU YTTRIA PRO VYTVÁŘENÍ ANTIREFLEXNÍCH VRSTEV SOLÁRNÍCH ČLÁNKŮ

YTTRIUM OXIDE LAYERS FOR ANTIREFLECTION COATING OF SILICON SOLAR CELLS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. VLADIMÍR DOSTÁL

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. ONDŘEJ HÉGR, Ph.D.

BRNO 2010

Prohlášení

Prohlašuji, že svoji diplomovou práci na téma Využití oxidu yttria pro vytváření antireflexních vrstev solárních článků jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrálního projektu a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedeného semestrálního projektu dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením tohoto projektu jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 27. května 2010

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu semestrálního projektu Ing. Ondřeji Hégrovi, Ph.D. a Ing. Lucii Prušákové za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne 27. května 2010

podpis autora

Abstrakt

Tato práce se zabývá depozicí yttrium oxidových vrstev na křemíkový substrát (P-typ) metodou magnetronového i reaktivního magnetronového naprašování. V práci jsou popsány provedené experimenty a jejich výsledky, dále se práce zaměřuje na metodiku vyhodnocení nadeponovaných vrstev pomocí spektrofotometrie a FTIR. Dosažené výsledky spolu s budoucím vývojem práce jsou potom konzultovány v závěru.

Abstract

This work deals with deposition of yttrium oxide layers on silicon substrate (P – type) by using magnetron and reactive magnetron sputtering. Experiments which were made are further described. After that, work is focused on evaluation of deposited layers by using FTIR measurement technique and spectrophotometry. At the end of the work results of experiments are discussed also with the future progress.

Klíčová slova

Yttrium oxid, RF magnetronové naprašování, antireflexní vrstva, spektrofotometrie, FTIR, solární článek

Key words

Yttrium oxide, RF magnetron sputtering, antireflective coating, spectrophotometry, FTIR, solar cell

Obsah

1 Solární články	- 6 -
1.1 Princip solárního článku.....	- 6 -
1.2 Parametry solárních článků.....	- 7 -
1.3 Technologie solárních článků	- 10 -
2 Pasivační a antireflexní vrstvy	- 12 -
2.1 Antireflexní vrstva	- 12 -
2.2 Pasivační vrstva.....	- 13 -
2.2.1 <i>Technologie depozice pasivačních vrstev</i>	- 13 -
2.2.2 <i>Funkce pasivace</i>	- 16 -
3 Vlastnosti Yttrium oxidu	- 17 -
3.1 Fyzikální vlastnosti Yttrium oxidu.....	- 18 -
4 Magnetronové naprašování	- 19 -
4.1 Magnetronové naprašování	- 19 -
4.2 Reaktivní magnetronové naprašování	- 21 -
4.2.1 <i>Hystereze</i>	- 21 -
4.2.2 <i>Mikrooblouky</i>	- 23 -
5 Měření optických vlastností deponovaných vrstev.....	- 24 -
5.1 Spektrofotometrie.....	- 24 -
5.2 FTIR (Fourier Transformed Infra-Red spectroscopy).....	- 26 -
5.3 Elipsometrie	- 29 -
6 Praktická část.....	- 31 -
6.1 Popis depoziční aparatury	- 31 -
6.2 Výsledky depozic ze série 1	- 32 -
6.2.1 <i>Měření reflektance pro měnící se vlnové délky pod úhlem 40°</i>	- 33 -
6.2.2 <i>Měření reflektance pro měnící se vlnové délky pod úhlem 20°</i>	- 35 -
6.3 Výsledky depozic ze série 2	- 36 -
6.3.1 <i>Měření reflektance pro měnící se vlnové délky pod úhlem 40°</i>	- 37 -
6.3.2 <i>Měření materiálového složení vzorku 3 pomocí FTIR</i>	- 38 -
6.4 Výsledky depozic ze série 3	- 39 -
7 Závěr	- 46 -
8 Seznam použité literatury	- 47 -
9 Seznam obrázků.....	- 52 -

Úvod

Od svého objevu v roce 1839 do roku 1940 byl fotovoltaický jev zajímavým objektem pro fyzikální bádání. Až s rozvojem polovodičové technologie se začíná uvažovat o možném využití jako zdroj energie pro kosmický výzkum [2].

Intenzivní výzkum v této oblasti umožnil značné zvyšování účinnosti křemíkových FV článků v období 1950 - 2000. Od poloviny sedmdesátých let jsou FV články využívány rovněž pro civilní aplikace jako na síti nezávislý zdroj energie. Odtud vzniká potřeba hromadně vyráběných levných FV článků, které mohou být ekonomicky konkurence schopné vůči ostatním zdrojům energie [2].

Hlavním materiálem pro výrobu konvenčních solárních článků je křemík. Křemík je velmi vhodný materiál, protože z hlediska šířky zakázaného pásu je u křemíku možno dosáhnout velmi vysoké účinnosti generace volných nosičů. Zároveň u křemíku, jako základního materiálu pro mikroelektroniku se podařilo velmi dobře zvládnout všechny operace potřebné k vytváření struktur [2].

Existují ovšem i jiné materiály a způsoby konstrukce solárních článků, např. na bázi polymerů, což poukazuje nato, že možnosti a potenciál v této oblasti je stále vysoký.

Solární články

První kapitola slouží k seznámení se základním principem funkce solárních článků, jejich výrobní technologií a měřenými parametry.

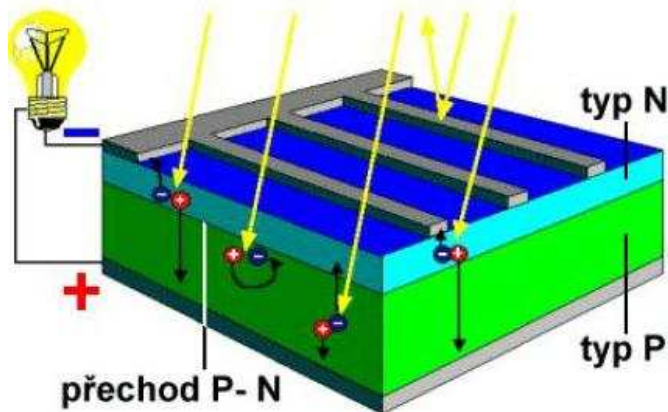
1.1 Princip solárního článku

Solární články pracují na principu fotovoltaického jevu, který vychází z fotoelektrického jevu. Fotovoltaický jev je definován následujícím způsobem: Elektromagnetické vlnění (světlo) dopadající na PN přechod na něm způsobí potenciálový rozdíl [15].

Ke konstrukci konvenčních solárních článků se nejčastěji užívá polykrystalický nebo monokrystalický křemík, jehož šířka zakázaného pásu je 1,11eV. Z tohoto faktu vyplývá, že aby došlo k fotovoltaickému jevu, musí mít dopadající fotony dostatečnou energii, tedy větší než 1,11eV. Vlnovou délku 1105nm s energií 1,12eV nazýváme mezní vlnovou délkou [18]. Tato vlnová délka se nachází v infračervené oblasti, fotony s kratší vlnovou délkou mají potom dostatečnou energii k uvolnění elektronů z krystalové mřížky Si.

Základem solárního článku je PN přechod, solární článek tak v podstatě tvoří velkoplošnou diodu, substrát je obvykle křemík P typu vodivosti, do kterého se difuzí fosforu vytvoří tenká vrstva vodivosti N, tato struktura se zpravidla doplní o další podpůrné vrstvy, jako je vrstva pasivační a antireflexní, vytvořená struktura se poté nakontaktuje.

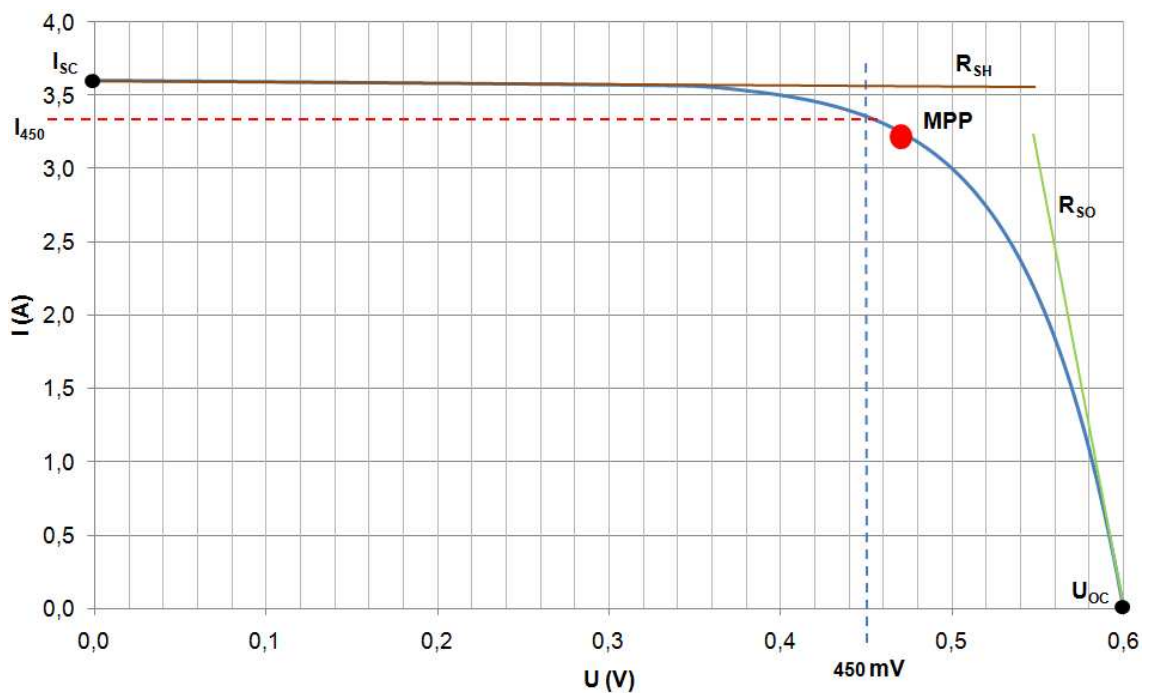
Dopadá-li elektromagnetické vlnění (světlo) na povrch solárního článku, fotony uvolní z krystalové mřížky elektrony, ty se hromadí v oblasti vodivosti N a díry v oblasti vodivosti P. Rozdělení náboje má za následek napěťový rozdíl přibližně 0,6V mezi „předním“ (-) a „zadním“ (+) kontaktem solárního článku [28]. Zátěží (elektrospotřebičem) připojenou mezi oba kontakty potom protéká stejnosměrný elektrický proud, jež je přímo úměrný ploše solárních článků a intenzitě dopadajícího slunečního záření. Bohužel ne všechno dopadající sluneční záření může generovat volné elektrony. Část záření je odrazena na povrchu solárních článků, nebo prochází skrz články bez efektu. V některých případech elektrony s dírami rekombinují před tím než se separují. V případech kdy je energie fotonu příliš malá zejména díky dlouhovlnnému infračervenému záření nedojde k uvolnění elektronů. Na druhou stranu, pokud je energie fotonu příliš vysoká a je potřeba pouze část energie na uvolnění elektronu, konvertuje tato přebytečná energie na teplo. Fotovoltaický článek se zahřívá a klesá jeho účinnost.



Obr.1.1: Princip solárního článku [6]

1.2 Parametry solárních článků

Zde je uveden přehled měřených parametrů solárních článků a případně u některých neměřených veličin i jejich výpočet. Většina parametrů je dána Volt-Ampérovou charakteristikou solárního článku, která je uvedena na obr.1.2.



Obr.1.2: Příklad V-A charakteristiky solárního článku [1]

Elektrické parametry se měří při intenzitě osvětlení 1000 W/m^2 při spektrálním složení světla odpovídající slunečnímu spektru (AM 1.5 Global) a při teplotě 25°C . Základní sledovaný parametr je proud I_{450} , podle kterého se rozdělují články do

základních skupin. Kromě základního parametru I_{450} se měří na solárním článku další elektrické parametry [1]:

I_{450}

Proud tekoucí článkem při napětí 450mV. Porovnáme-li polohu MPP na V- A charakteristiky se souřadnicemi 450 mV a I_{450} dojdeme k závěru, že proud I_{450} je měřen z toho důvodu, že můžeme pak lépe určit polohu MPP [29].

I_{sc}

Zkratový proud tekoucí fotovoltaickým článkem při napětí 0V. Proud nakrátko je ve své fyzikální podstatě maximální proud, který může fotovoltaický článek při daném slunečním osvětlení dodávat. Velikost tohoto proudu je závislá na [1, 29]:

- a) intenzitě osvětlení
- b) spektrální citlivosti FVČ
- c) ploše FVČ
- d) teplotě

Proud nakrátko lze měřit pouze speciálním přístrojem.

U_{oc}

Napětí, které je na solárním článku naprázdno, tj. bez zátěže. Toto napětí je maximálním napětím solárního článku při daném osvětlení a teplotě [32].

MPP

Maximal Power Point. Optimální pracovní bod fotočlánku pro který dodává maximální výkon. Tento bod leží na VA charakteristice ve vrcholu vepsaného obdélníka s maximální plochou [1, 32].

P_m - maximální výkon solárního článku Zařízení, odebírající energii ze solárních článků, by mělo zatěžovat fotovoltaický článek takovým způsobem, aby článek pracoval právě v okolí bodu maximálního výkonu. Jen tak může fotovoltaický článek využít sluneční energii optimálně.

U_m - napětí při maximálním výkonu solárního článku

I_m - proud při maximálním výkonu solárního článku

R_m - odpor při maximálním výkonu solárního článku:

$$R_m = U_m / I_m \quad (1)$$

FF

Fill factor, udává poměr mezi maximálním výkonem a výkonem daným napětím naprázdno a proudem nakrátko. Je závislý na kvalitě kontaktů, morfologii materiálu a odporu aktivní polovodivé vrstvy. Tento poměr se uvádí jako tzv. činitel naplnění, zjišťuje se výpočtem podle vzorce [29, 32]:

$$FF = (I_m \cdot U_m) / (U_{oc} \cdot I_{sc}) \quad (2)$$

Podle jeho velikosti usuzujeme, jak kvalitní je daný solární článek, čím je FF větší, tím vyšší výkon může solární článek dodávat do zátěže.

EEF

Účinnost solárního článku je dána vlastnostmi materiálu, ze kterého je vyroben. Tento materiál ovlivňuje rozložení spektrální citlivosti solárního článku na dopadající záření, tzn., že solární článek využívá energii různých vlnových délek s různou účinností. Účinnost je definována následujícím vztahem [1, 29, 32]:

$$\eta = P_m / P_{rad} = P_m / (E \cdot A_c) \quad (3)$$

kde je:

P_m max. výkon, který může článek dodávat

P_{rad} výkon dopadajícího záření

E intenzita osvětlení při standardizovaných zkuš. podmínkách (Wm^{-2})

A_c plocha solárního článku (m^2).

R_{so}

Sériový odpor solárního článku [1].

R_{sh}

Paralelní odpor solárního článku [1].

Znalost velikosti sériového a paralelního odporu solárního článku nám dává poznatek o jeho kvalitě. Příliš vysoká hodnota sériového odporu způsobuje, že svorkové napětí fotočlánku bude tím menší, čím bude větší úbytek napětí na sériovém odporu. Na druhou stranu příliš nízká hodnota paralelního odporu nás informuje o vadném článku, solární článek se chová, jako by byl zevnitř zkratován [29].

1.3 Technologie solárních článků

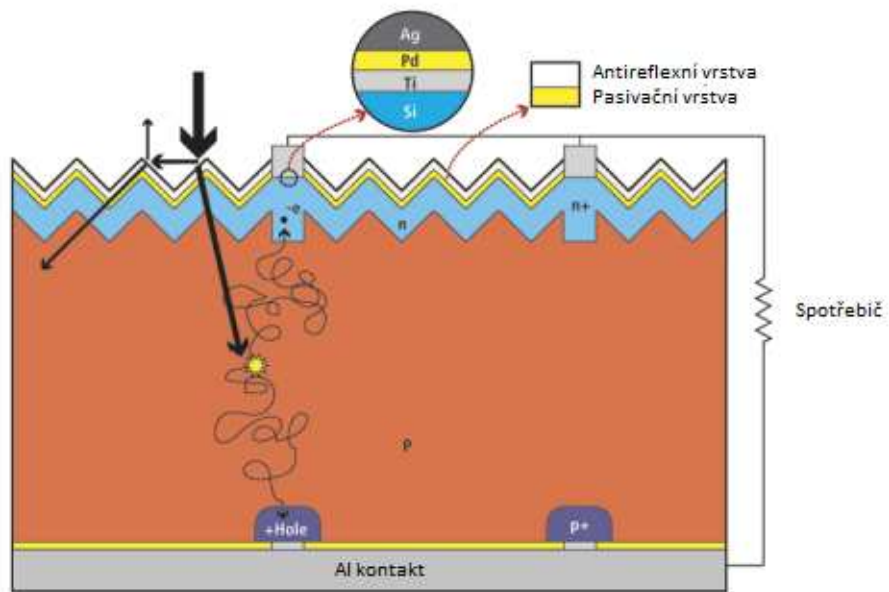
Solární články se vyrábějí v několika provedeních, v práci se především zaměřím na solární články na bázi krystalického Si.

Prvním krokem výroby solárních článků je tažení mnokrystalického Si Czochralského metodou, která je popsána v [30]. Dále se ingot nařeže na menší díly, tyto se obrousí a laserem se zorientují. Další krok je vybroušení samotné fasety, ta slouží k určení o jaký typ a orientaci Si jde. Následně je ingot rozřezán na samostatné substráty (wafery) pomocí speciálního drátořezu. Substráty se dále upravují, zabrousí se okrajové hrany, následuje lapování, leptání v HNO_3 a HF, úprava zadní strany pomocí trysky, která bombarduje zadní stranu substrátu mikročásticemi, dále následuje leštění horní strany substrátu a nakonec před měřením substrátů se ještě povrch leptá v různých kyselinách pro odstranění případných nečistot [30].

Pro snížení povrchové odrazivosti se provádí texturování povrchu. Texturování účinně prodlouží dráhu dopadajícího elektromagnetického vlnění, čím sníží i ztráty způsobené odrazem. Povrch lze texturovat chemicky ve slabém roztoku KOH nebo NaOH při teplotě 70°C . Výsledná struktura vypadá jako mřížka tvořená pyramidami.

Jakmile jsou připraveny substráty (nejčastěji texturované, P typu vodivost), proces pokračuje v následujících operacích. Vlastní PN přechod se vytváří difuzí z fosforového zdroje (PH, nebo POCl_3) při teplotě 800°C až 1200°C , na zadní straně se provádí difuze boru (BBr_3) (pokud jde o substrát typu P), čímž dostaneme oblast P+ typu vodivosti, která nám vytvoří tak zvané *BSF* (back surface field). *BSF* funguje tak, že odpuzuje nosiče od spodního kontaktu, který způsobuje silnou rekombinaci. *BSF* lze realizovat i sintrováním Al, který patří rovněž do III skupiny periodické soustavy prvků a vytvoří nám tedy na spodní straně oblast vodivosti typu P+ [8].

Již je tedy vytvořen PN přechod a *BSF*, v oxidační peci naroste při teplotě přibližně 1000°C procesem mokré oxidace (reaguje H_2O s Si) vrstvička SiO_2 . Oxid slouží jako pasivační vrstva, která redukuje volné stavy na povrchu Si, jež fungují jako rekombinační centra. Nedílnou součástí solárních článků je i antireflexní vrstva, která se deponuje tenkovrstvými technologiemi, zvláště PECVD a PVD na předpřipravený pasivovaný substrát [8, 21]. Jakmile je struktura dokončena nakontaktuje se, kontaktování může být provedeno sítotiskem, kdy se tiskne Ag pasta pro horní kontakty a Al pasta pro spodní kontakt. Kontakty se při vysoké teplotě zataví přes antireflexní vrstvu [8, 21].



Obr.1.3: Řez Monokrystalickým Si solárním článkem [31]

2 Pasivační a antireflexní vrstvy

Tato kapitola je zaměřena na funkci antireflexní vrstvy, základní metody depozice pasivačních vrstev, funkci pasivační vrstvy a požadované parametry.

2.1 Antireflexní vrstva

Antireflexní vrstva má přesně určenou tloušťku a složení, je vždy účinná pro jednu složku barevného spektra a její nejbližší okolí, zvyšuje tedy intenzitu průchodu pro jednu barvu (vlnovou délku) a její nejbližší okolí. Princip zvýšení intenzity průchodu spočívá ve snížení optických ztrát, které jsou způsobeny odrazem světla na rozhraní dvou prostředí [23]. Ovšem je nutné uvážit ještě fakt, že energie viditelného světla není stejná, každá složka má různou energii nepřímo úměrnou dané vlnové délce.

Energie viditelného spektra se spočítá z Einsteinova vztahu (4) [35].

$$E = h \cdot f \quad (4)$$

kde: h – je Planckova konstanta, $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ [J s]

f – je frekvence vlnění [Hz]

E – je energie fotonu [eV]

Pokud neznáme kmitočet vlnění, ale známe vlnovou délku, můžeme si pomoci vztahem pro λ (5).

$$\lambda = v / f \quad (5)$$

kde: λ – je vlnová délka vlnění [m]

v – je fázová rychlost šíření vlnění, pro světlo $v = 299\,792\,458$ [m s⁻¹]

Pokud si tedy určíme energii fotonů příslušných vlnění, vyjde nám, že pro vlnovou délku odpovídající červené barvě viditelného spektra $\lambda = 740\text{nm}$ je $E = 1,6756$ eV a pro vlnovou délku odpovídající fialové barvě viditelného spektra $\lambda = 380\text{nm}$ je $E = 3,2630$ eV. Vidíme tedy, že s rostoucí, vlnovou délkou se energie fotonů snižuje. Hloubka vniku fotonů má opačný charakter, se zvyšující se vlnovou délkou se zvyšuje hloubka vniku fotonu do materiálu a naopak.

Proto je nutné volit materiál antireflexní vrstvy tak, aby propouštěná vlnová délka světelného záření měla dostatečnou energii k uvolnění volných nosičů v substrátu a zároveň byla zajištěna dostatečná hloubka vniku fotonu do substrátu. Antireflexní vrstva se u solárních článků s vyšší účinností deponuje i na zadní stranu, aby odrážela elektromagnetické vlnění, které by eventuelně prošlo skrze solární článek bez účinku [8].

2.2 Pasivační vrstva

2.2.1 Technologie depozice pasivačních vrstev

Mezi hlavní technologie depozice pasivačních vrstev patří PECVD, LPCVD, naprašování (PVD) a mokrá oxidace. Jelikož v práci již je popsána technologie naprašování, zaměřím se na seznámení se zbylými třemi technologiemi.

2.2.1.1 Termická oxidace

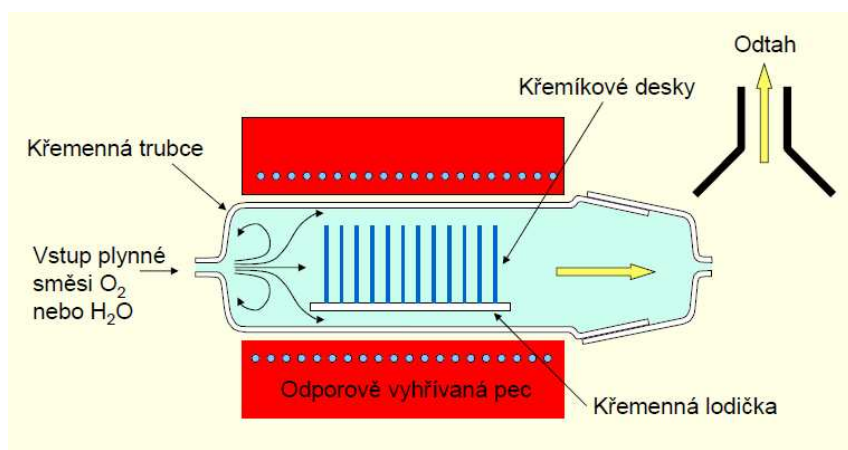
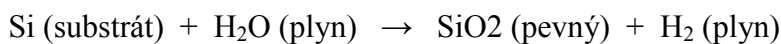
Jedná se o jednu ze základních depozičních metod. Princip spočívá v oxidaci povrchu substrátu v atmosféře bohaté na kyslík, při teplotě 800°C – 1100°C. Během depozice dochází ke spotřebování části tloušťky substrátu pro tvorbu oxidové vrstvy. Růstová rychlost oxidu je dána difúzí kyslíku do substrátu. Jak tloušťka oxidové narůstá, snižuje se schopnost kyslíku difundovat do substrátu, což vede k parabolické závislosti mezi tloušťkou oxidu a dobou oxidace (pro vrstvy vyšší než 100nm) [12]. Existují dva základní typy oxidace. Suchá oxidace a mokrá oxidace, rozdíl je vysvětlen na procesních reakcích [31].

Proces termické oxidace Si:

Suchá oxidace



Mokrá oxidace

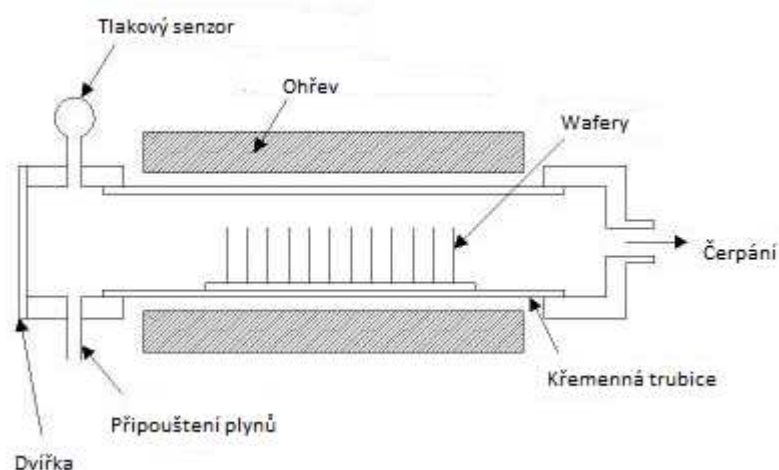
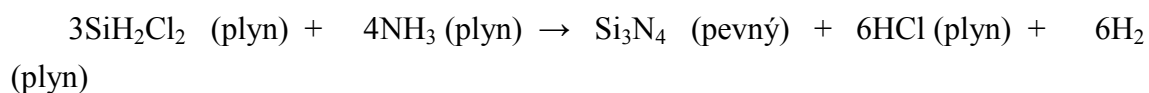


Obr.2.1: Znázornění oxidačního reaktoru [31]

2.2.1.2 Nízkotlaké Napařování (LPCVD)

Metoda LPCVD je velmi flexibilní depoziční metoda umožňující depozice jak oxidových vrstev, tak nitridových, polovodivých a vodivých vrstev. Vrstvy vytvořené LPCVD metodou vykazují vynikající materiálové vlastnosti a jednotnost tloušťky, avšak depoziční rychlost je poměrně malá. Princip depozice vychází z termické oxidace, do komory reaktoru jsou umístěny substráty na kterých se bude vytvářet vrstva, následně se připouští směs plynů, které navzájem reagují při teplotě vyšší než 600°C. Hlavní product reakce, který utváří pevnou fázi, kondenzuje na všech površích v reaktoru, tím vzniká požadované vrstva. Vedlejší product reakce (plyn), se čerpá vakuovým systémem. Kvalita vytvářené vrstvy je úměrná depoziční teplotě. Jak bylo zmíněno, tato metoda umožňuje vytvářet vrstvy mnoha material, ovšem některé se používají méně, protože vedlejším produktem reakce je nebezpečná látka, např. u wolframu je vedlejší produkt depozice kyselina fluorovodíková. Na obr.2.2 je znázorněno uspořádání horizontálního LPCVD reaktoru [12, 5].

Příklad depozice nitridu křemíku:



Obr.2.2: Znáornění LPCVD reaktoru [12]

2.2.1.3 Technologie PECVD

Technologie PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition) je alternativou k jiným CVD metodám, její výhodou je nižší procesní teplota (okolo 300°C), aniž by došlo k ovlivnění kvality deponovaných vrstev. PECVD využívá RF elektrické energie k vytvoření doutnavého výboje ve kterém je energie přenášena ke směsici plynů, která je tvořena inertním plynem (nejčastěji Ar) a pracovními plyny. Postupně dochází k přeměně plynové směsi na reakční radikály, ionty, neutrální atomy i molekuly a jiné vysoce excitované složky. Tyto atomové/molekulové složky interagují se substrátem a v závislosti na povaze těchto interakcí dochází buď k leptání nebo k depozici. Tím, že je část potřebné energie dodávaná plazmou, je možné dosáhnout mnohem nižší teploty depozice, např. než u LPCVD. Mezi vlastnosti PECVD vrstev patří dobrá adheze, malá hustota poruch, dobré pokrytí a jednotnost povrchu, vyšší depoziční rychlost [12, 5, 25].

Materiály pro elektroniku, které lze deponovat metodou PECVD jsou [25]:

SiN

SiO

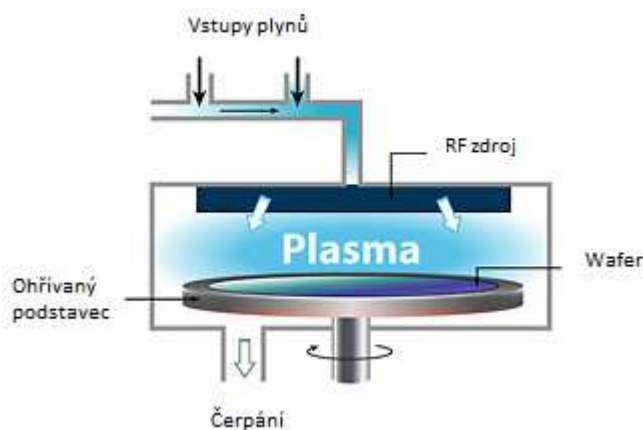
SiO₂

SiON

DLC (diamond like carbon)

A – Si (amorfní Si)

Poly – Si (polykrystalický Si)



Obr.2.3: Uspořádání PECVD komory [12]

2.2.2 Funkce pasivace

Pasivační vrstva může být tvořena sloučeninami kovů, oxidy, karbidy i nitridy. Tato vrstva má několik úkolů. Jelikož povrch Si není nikdy dokonale čistý, bez defektů a volných vazeb. Je tedy prvním úkolem pasivační vrstvy pasivovat tyto defekty a nečistoty, tak aby nedocházelo k povrchové rekombinaci nosičů.

Druhým úkolem pasivační vrstvy je schopnost vytvořit požadované optické prostředí vytvořené struktury. Čili pasivační vrstva musí mít vyšší index lomu než vrstva antireflexní a zároveň nižší index lomu než materiál substrátu.

Jelikož pasivační vrstvy jsou izolanty, nelze pasivovat metalické ohmické kontakty, proto se v místech kde budou horní kontakty vytvářejí oblasti s vysokou vodivostí, u N-typu oblasti N⁺⁺, které zabraňují minoritním nosičům, aby pronikly k vysoce - rekombinačnímu ohmickému kontantu [10].

Podobného efektu je využito i pro **BSF (Back Surface Field)**. BSF je tvořeno silně dopovanými oblastmi (P⁺⁺ pro substrát P – typu) na spodní straně solárního článku. Vztah mezi slabě a silně dopovanými oblastmi se podobá P – N přechodu, elektrické pole tvoří bariéru pro minoritní nosiče, které by směřovaly ke spodnímu kontaktu. Tak je zajištěna vyšší koncentrace minoritních nosičů v nedopované oblasti a BSF má síťový efekt pasivace spodní části solárního článku [10].

Odtud tedy plynou hlavní požadavky na pasivační vrstvu: tloušťka pasivační vrstvy, vhodný materiál pro daný typ pasivovaného substrátu, relativní permitivita, doba života minoritních nosičů, index lomu.

3 Vlastnosti Yttrium oxidu

Yttrium je stříbřitě bílý, středně tvrdý, poměrně vzácný přechodný kov III skupiny Mendělejevovy tabulky chemických prvků. Vůči působení vzdušného kyslíku je poměrně stálý, pouze v práškovité formě podléhá za vyšších teplot spontánní oxidaci. Odolává i působení vody, ale snadno se rozpouští ve zředěných minerálních kyselinách, především v kyselině chlorovodíkové (HCl) [36].

Yttrium oxid je pevná látka bílé barvy, keramického charakteru. Oxid yttritý je extrahován především z minerálu Xenotime (YPO_4) Díky svým vlastnostem se využívá v následujících aplikacích.

Yttrium oxid má vysokou teplotní stabilitu a dobrou prostupnost IR záření. Váže se s kyslíkem a sírou a používá se jako přísada ke stabilizaci zirkonia a ke slinování Sialonů a nitridu křemičitého. Jako optická keramika dobře propouští v infračerveném rozsahu, od $1\mu\text{m}$ do $8\mu\text{m}$ vlnové délky. Velká infračervená prostupnost společně s dobrou mechanickou odolností a teplotním šokem vytváří ideál pro ochranné skřínky infračervených senzorů [4].

Dalším využitím Yttrium oxidu je v laserech s dopanty ytterbia umožňují efektivní fungování jak při kontinuálním tak pulzním režimu. Kde dochází vlivem vysoké excitace a nedostatečnému chlazení ke zhášení emise při laserové frekvenci a nastává lavinová širokopásmová emise [34].

Yttrium oxid se užívá k výrobě YVO_4 europia a Y_2O_3 europium fosforů, které vytvářejí červenou barvu v TV obrazovce [34]. Oxid yttritý se také používá k výrobě $Y_3Fe_5O_{12}$ granátů chovající se jako velmi efektivní mikrovlnné filtry, které se používají v radarech [17].

Pro svoji velkou relativní permitivitu ϵ_r a tepelnou stabilitu se yttrium oxid stává důležitým materiálem pro MIS (metal-insulator-semiconductor) struktury, kde může Y_2O_3 sloužit jako náhrada konvenčního SiO_2 [9].

Dále se s yttrium oxidem můžeme setkat v materiálovém inženýrství, kde se užívá jako přísada pro tvorbu vysokoteplotního supravodiče $YBa_2Cu_3O_7$ [34]. V metalurgii se přísady malého množství yttria do slitin hliníku a hořčíku značně zvyšuje jejich pevnost. Litina s obsahem yttria získává značně vyšší tvárnost a kujnost – tzv. *kujná litina*. Při výrobě vanadu a některých dalších neželezných kovů slouží yttrium k odstraňování kyslíku - deoxidaci vyráběného kovu [36].

3.1 Fyzikální vlastnosti Yttrium oxidu

V *tab.3.1* je uveden přehled základních fyzikálních vlastností yttrium oxidu Y_2O_3 .

Tab.3.1: Přehled základních vlastností Yttrium oxidu [9, 3]

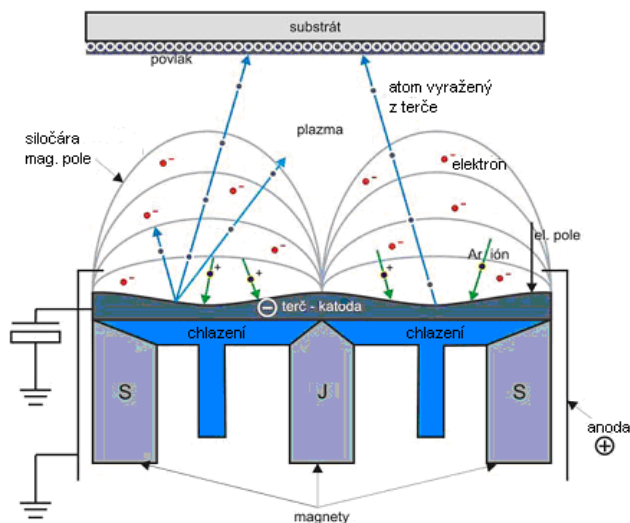
Prvek	Y_2O_3
Bod tavení [°C]	2410
Hustota [$kg\ m^{-3}$]	2200
Refrakční index (500 nm)	1,8
Relativní permitivita ϵ_r	11-15
Elektrická pevnost [$V\ m^{-1}$]	10^8
ΔE_g [eV]	5,6
Tepelná vodivost [$W\ m^{-1}\ K^{-1}$]	8-12
Tepelná roztažnost [K^{-1}]	8×10^{-8}
Resistivita [$\Omega\ m$]	10^{11}
Modul pružnosti [GPa]	170
Pevnost v ohybu [MPa]	99
Molární hmotnost [g/mol]	225,81

4 Magnetronové naprašování

Tato kapitola se zabývá metodami depozice Yttrium oxidu, především reaktivním magnetronovým naprašováním, které je pro tuto práci klíčovou depoziční metodou.

4.1 Magnetronové naprašování

Magnetronové naprašování patří mezi technologie depozice tenkých vrstev. Metoda magnetronového naprašování je založena na rozprašování pevného terče (který je katodou) ionty pracovního plynu extrapolovanými z plazmatu doutnavého výboje, který je lokalizován pomocí magnetického pole v těsné blízkosti katody. Před terčem je vytvořeno magnetické pole definovaného tvaru elektromagnetem nebo permanentními magnety. Elektrony, které při klasickém naprašování unikají z prostoru před terčem, se v tomto případě v důsledku Lorentzovy síly¹⁾ musí pohybovat po šroubovici podél siločar [20]. Tímto způsobem se výrazně prodlužuje jejich dráha v blízkosti terče, prodlužuje se i doba jejich setrvání v oblasti výboje a zvyšuje se pravděpodobnost ionizace dalších atomů pracovního plynu. Ionty pracovního plynu (nejčastěji Ar) jsou urychlovány elektrickým polem a dopadají na povrch naprašovaného materiálu – terče. Jejich účinkem jsou z povrchu vytrhávány atomy terče, které se často průchodem oblastí ionizovaného pracovního plynu samy ionizují a dopadají na povrch povlakovaných součástí. To umožňuje udržet výboj při nižším tlaku (řádově desítky pascalu) i při nižším napětí (řádově stovky voltů) [16]. Zejména nižší tlak se pozitivně projevuje ve větší čistotě vytvářených vrstev. Schéma magnetronového naprašování je na *obr. 4.1*.



Obr.4.1: Principiální schéma magnetronového naprašování [33]

Hlavními výhodami naprašování je jednoduchá depozice i těžkovitelných materiálů, ve vytvářené vrstvě se zachovává složení slitinového terče ve stejném poměru jednotlivých složek a je možná homogenní depozice vrstev i na větších plochách.

¹⁾ Lorentzova síla – síla, která působí na nabitou částici pohybující se rychlostí \mathbf{v} v elektrickém a magnetickém poli je dána vztahem (6):

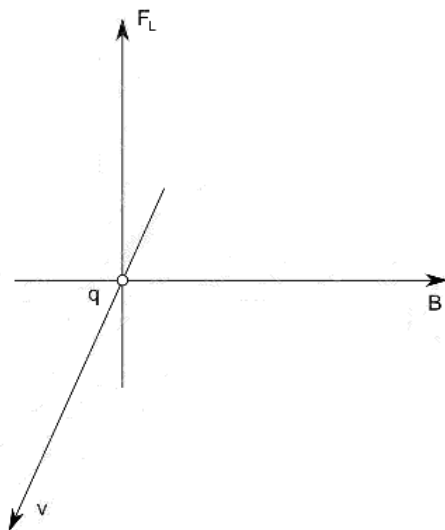
$$\mathbf{F}_L = Q (\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (6)$$

kde: Q - je elektrický náboj [C]

\mathbf{E} - je intenzita elektrického pole [Vm^{-1}]

\mathbf{B} - je magnetická indukce [T]

\mathbf{v} - je rychlost náboje [ms^{-1}]



Obr.4.2: Znázornění vektorů \mathbf{B} , \mathbf{v} a Lorentzovy síly \mathbf{F}_L [24]

Je-li intenzita elektrického pole nulová, vyplývá z vlastností vektorového součinu, že síla je kolmá na směr rychlosti i magnetické indukce a částice se pohybuje po kružnici nebo po šroubovici podél siločáry magnetického pole [24]. Znázornění vektorů je na *obr.4.2*.

4.2 Reaktivní magnetronové naprašování

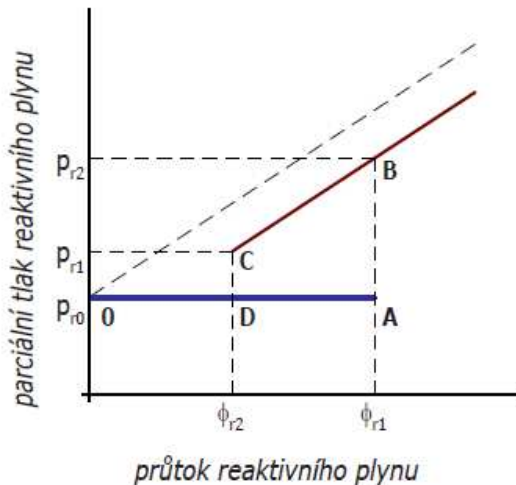
Při klasické depozici se vytváří vrstva tvořená pouze atomy materiálu terče, ale při reaktivní depozici se na povrchu substrátu vytváří materiál vzniklý chemickou reakcí materiálu terče a reaktivní složky pracovního plynu.

Reaktivní plyn, např. O₂, N₂, se tak spotřebovává a tudíž je třeba jej do systému dodávat. Inertní složka pracovního plynu, např. Ar, pouze rozprašuje terč. Použití reaktivní atmosféry s sebou ale nese i technické obtíže.

4.2.1 Hystereze

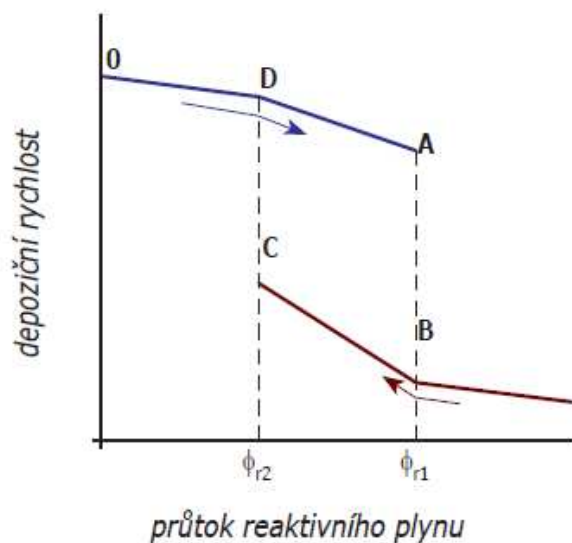
Základním principem vzniku hystereze je fakt, že reaktivní plyn nereaguje pouze s atomy rozprašenými, ale i s terčem. Jestliže je terč pokryt produkty reakce materiálu terče a plynu, mluvíme o tzv. otráveném terči. Reakce plyn - terč ale neprobíhá vždy.

Pokud se do systému dodává méně reaktivního plynu, než kterému odpovídá kritická hodnota ϕ_{r1} veškerý plyn se spotřebovává reakcí s rozprašeným materiálem, viz úsek 0 – D – A v *obr.4.3*. Magnetron pracuje v tzv. Metalickém módu a vytvářená vrstva je bohatá na atomy materiálu terče. S narůstáním průtoku reaktivního plynu mírně klesá i depoziční rychlost, viz úsek 0 – D – A v *obr.4.4* [26, 22].



Obr.4.3: Hysterezní smyčka pro parciální tlak reaktivního plynu [26]

Reaktivní mód —
Průběh parc. tlaku při vypnutí magnetronu —
Metalický mód —



Obr.4.4: Hysterezní smyčka pro depoziční rychlost [26]

Metalický mód —

Reaktivní mód —

Pokud ale průtok plynu přesáhne mez ϕ_{r1} , dojde k otrávení terče, což s sebou nese zároveň:

pokles depoziční rychlosti ad kvůli nižšímu výtěžku rozprašování sloučenin, oproti rozprašování čistých kovů.

pokles napětí na terči způsobený vyšší sekundární emisí elektronů oproti čistým kovům. Pro udržení výboje je tak nutné nižší napětí.

V obou případech dojde ke snížení spotřeby reaktivního plynu a jeho parciální tlak prudce narůstá, až zreaguje s celým povrchem terče, přitom také skokově klesá depoziční rychlost, viz úsek A – B v *obr.4.3* a *obr.4.4*. Další zvyšování průtoku jen lineárně zvyšuje parciální tlak reaktivního plynu, depoziční rychlost mírně klesá. Magnetron pracuje v tzv. Reaktivním módu, rozprašují se produkty reakce, nikoli čistý kov [26].

Pro odstranění nevodivé vrstvy musí průtok reaktivního plynu klesnout až pod mez ϕ_{r2} , viz.úsek B – C *obr.4.3*, kdy se začne odprašovat více materiálu než se stihne vytvořit reakcí s plynem. Dojde tak k prudkému poklesu parciálního tlaku reaktivního plynu vlivem navrácení terče do původního, „čistého“, stavu a veškerý reaktivní plyn je spotřebováván rozprášenými atomy, viz. úsek C – D v *obr. 4.3* [26, 22].

Křivka A – B – C – D v obr.4.3 se nazývá Hysterezní smyčka parciálního tlaku reaktivního plynu, v obr.4.4 se nazývá Hysterezní smyčka depoziční rychlosti. Oblast mezi body A – B – C – D se nazývá přechodová oblast, čili je to oblast mezi metalickým a reaktivním módem, kde můžeme vytvářet stechiometrický materiál při poměrně vysokých depozičních rychlostech [14].

4.2.2 Mikrooblouky

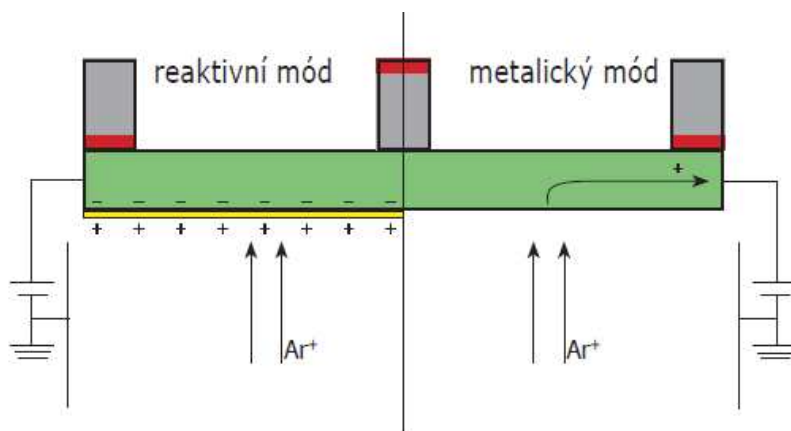
Při reaktivní depozici, kdy se terč pokryje nevodivou vrstvou, dochází k dalším problémům. Jedním z nich jsou mikrooblouky. Jak je vidět na obr.4.5, při neotráveném terči (vpravo) se obvod uzavírá do zdroje s minimálními ztrátami, kdežto u otráveného terče (vlevo) se na povrchu se vytvoří dielektrická vrstva, na jejímž povrchu se hromadí kladný náboj Q_i , jako následek iontového bombardu atomy Ar^+ . Kvůli tomu se napětí U_T , dodávané zdrojem rozdělí na napětí na nevodivé vrstvě a na napětí povrchu a plazmatu U_{T0} , které je tak menší. Tento stav má dva následky v závislosti na dielektrické pevnosti izolační vrstvy [22,14]:

silné dielektrikum $E_B \cdot d > U_{T0} - U_T$ V tomto případě se povrch terče nabíjí až na nulu, plazmatický výboj zhasne a rozprašování ustane.

slabé dielektrikum $E_B \cdot d < U_{T0} - U_T$ V tomto případě se vrstva nabije na své mezní napětí a dojde k jejímu proražení – vzniku mikrooblouku.

$E_B[V\ m^{-1}]$ je dielektrická pevnost vrstvy a $d[m]$ je její tloušťka.

Mikrooblouky nejsou žádané jenom kvůli snížení depoziční rychlosti, ale i kvůli tomu, že během výboje se uvolňuje mnohem větší množství materiálu terče, a to jak otrávená část, tak i čistý materiál, nebo se může uvolnit i makročástice. První jev může ohrozit strukturu rostoucí vrstvy nestabilním tokem na substrát, druhý může mechanicky poškodit jak rostoucí vrstvu, tak i samotný terč.



Obr.4.5: Princip vzniku mikrooblouků [26]

5 Měření optických vlastností deponovaných vrstev

Deponované vrstvy lze vyhodnotit několika metodami. První metodou která se často užívá je spektrofotometrie, další metodou je FTIR (Fourierovská infračervená spektrometrie).

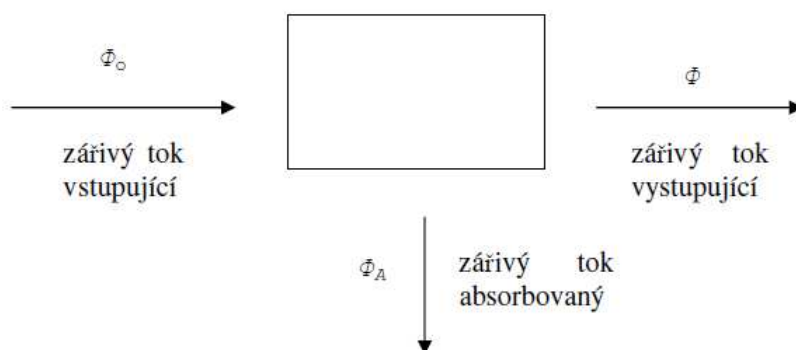
5.1 Spektrofotometrie

Molekuly mají schopnost pohlcovat elektromagnetické záření pouze určitých vlnových délek. Je to dáno tím, že mohou existovat v určitých kvantových stavech, které se liší obsahem energie. Jestliže má molekula přejít ze stavu s nižší energií do stavu s energií vyšší, musí absorbovat záření o frekvenci ν , která právě odpovídá rozdílu energií mezi energetickými hladinami E_p a E_q obou kvantových stavů podle Bohrovy frekvenční podmínky [27]:

$$\Delta E = E_p - E_q = h \nu = h c / \lambda \quad (7)$$

kde c je rychlost světla, λ vlnová délka a h je Planckova konstanta ($6,626 \cdot 10^{-34}$ Js); podle konvence je excitovaná hladina označena indexem p , základní indexem q .

Energeticky nejnáročnější jsou přechody mezi elektronovými energetickými hladinami. Běžně jsou způsobeny absorpcí ultrafialového (190 až 400 nm) a viditelného záření (400 až 800 nm). Absorpci záření lze měřit na přístrojích, které nazýváme absorpční spektrofotometry. Při absorpčním měření je ze vstupujícího toku záření Φ_0 část absorbována vzorkem (absorbovaný zářivý tok Φ_A) a v ideálním případě zbytek projde a je zaznamenán jako vystupující zářivý tok Φ . Znázornění zářivých toků je na obr.5.1 [27].



Obr.5.1: Znázornění zářivých toků [27]

Podíl zářivých toků Φ a Φ_0 se nazývá propustnost neboli **transmitance**:

$$\tau = \Phi / \Phi_0 \quad (8)$$

Na většině spektrofotometrů lze také odečíst hodnotu absorpance A , tj. záporně vzatý logaritmus propustnosti:

$$A = -\log \tau = \log (\Phi_0 / \Phi) \quad (9)$$

Některé spektrofotometry umožňují i měření **reflektance** ρ , což je veličina udávající poměr odraženého zářivého toku Φ_ρ ke vstupujícího toku záření Φ_0 .

$$\rho = \Phi_\rho / \Phi_0 \quad (10)$$

Závislost mezi transmitancí, absorpancí a reflektancí udává vztah 11

$$\rho + \tau + A = 1 \quad (11)$$

Krajní meze odpovídají absolutně černému tělesu ($A = 1$), absolutně bílému tělesu ($\rho = 1$) a absolutně průzračnému tělesu ($\tau = 1$). Pokud závisí veličiny A , ρ , τ v oblasti viditelného spektra na vlnové délce hovoříme o barevných tělesech [37].

Spektrofotometr použitý k měření výše zmíněných optických vlastností je spektrofotometr SPECORD 210.

Spektrofotometr SPECORD 210 (Analytikjena)

UV / VIS Spektrofotometr

- spektrální rozsah 190 – 1100 nm
- měření transmitance, absorpance a reflektance v závislosti na vlnové délce

Příslušenství:

- nástavec absolutní reflektance (určení absolutní reflektance reflektujících vrstev)
- nástavec s proměnným úhlem reflektance (určení indexu lomu pevných látek)
- integrační sféra (pro měření transmitance a difuzní reflektance)



Obr.5.2: Fotografie spektrofotometru SPECORD 210

5.2 FTIR (Fourier Transformed Infra-Red spectroscopy)

Infračervená spektroskopie je analytická technika určená především pro identifikaci a strukturní charakterizaci organických sloučenin a také pro stanovení anorganických látek. Tato technika měří pohlcení infračerveného záření o různé vlnové délce analyzovaným materiálem. Infračerveným zářením je elektromagnetické záření v rozsahu vlnových délek $0.78 - 10^3$ mm, odpovídající rozsahu vlnočtů $12800 - 10$ cm^{-1} . Celá oblast bývá rozdělena na blízkou ($13000 - 4000$ cm^{-1}), střední ($4000 - 200$ cm^{-1}) a vzdálenou infračervenou oblast ($200 - 10$ cm^{-1}), přičemž nejpoužívanější je střední oblast [19].

Principem metody je absorpce infračerveného záření při průchodu vzorkem, při níž dochází ke změnám rotačně vibračních energetických stavů molekuly v závislosti na změnách dipólového momentu molekuly. Analytickým výstupem je infračervené spektrum, které je grafickým zobrazením funkční závislosti energie, většinou vyjádřené v procentech transmitance (T) nebo jednotkách absorbance (A) na vlnové délce dopadajícího záření. Transmitance (propustnost) je definována jako poměr intenzity

záření, které prošlo vzorkem (I), k intenzitě záření vycházejícího ze zdroje (I_0). Absorbance je definována jako dekadický logaritmus $1/T$. Závislost energie na vlnové délce je logaritmická, proto se používá vlnočet, který je definován jako převrácená hodnota vlnové délky a tedy uvedená závislost energie na vlnočtu bude funkcí lineární [19].

Absorpční pásy mající vrcholy v intervalu $4000 - 1500 \text{ cm}^{-1}$ jsou vhodné pro identifikaci funkčních skupin (např. – OH, C=O, N-H, CH₃ aj.). Pásy v oblasti $1500 - 400 \text{ cm}^{-1}$ jsou nazývané oblastí „otisku palce“ (fingerprint region) [13]. Pomocí „vyhledávacích programů“ a digitalizovaných knihoven infračervených spekter je možno identifikovat neznámou analyzovanou látku. V současné době se objevují programy, které umožňují simulovat infračervené spektrum organických molekul.

Infračervená spektroskopie je používána k identifikaci chemické struktury látek již od 30. let 20. století. Avšak spektrometry pracující na principu rozkladu světla (disperzní spektrometry) neumožňovaly analýzu silně absorbujících matric. Analýza pevných vzorků byla většinou omezena na práškové materiály, které byly měřeny ve formě směsi s halogenidy alkalických kovů lisované do tenkých tablet, nebo metodou kapilární vrstvy, suspenze prášku v lehkém alifatickém oleji mezi okénky z monokrystalů halogenidů alkalických kovů nebo kovů alkalických zemin. Kapalné i plynné vzorky bylo možno měřit v zásadě bez omezení. S rozvojem výpočetní techniky v 80. letech 20. století dochází k praktickému rozšíření infračervených spektrometrů s Fourierovou transformací (FTIR spektrometry). Jedná se o přístroje pracující na principu interference spektra, které na rozdíl od disperzních přístrojů měří interferogram modulovaného svazku záření po průchodu vzorkem. Tyto přístroje vyžadují matematickou metodu Fourierovy transformace, abychom získali klasický spektrální záznam. FTIR spektrometry vykazují celou řadu výhod [19]. Při měření dopadá na detektor vždy celý svazek záření. Takové uspořádání umožňuje i experimenty, při nichž dochází k velkým energetickým ztrátám, tj. měření silně absorbujících vzorků nebo měření s nástavci pro analýzu pevných či kapalných vzorků v odraženém světle - reflektanční infračervená spektroskopie. Nyní se podrobněji seznámíme s FTIR spektrometrem Nicolet 380, který byl použit pro měření optických vlastností.

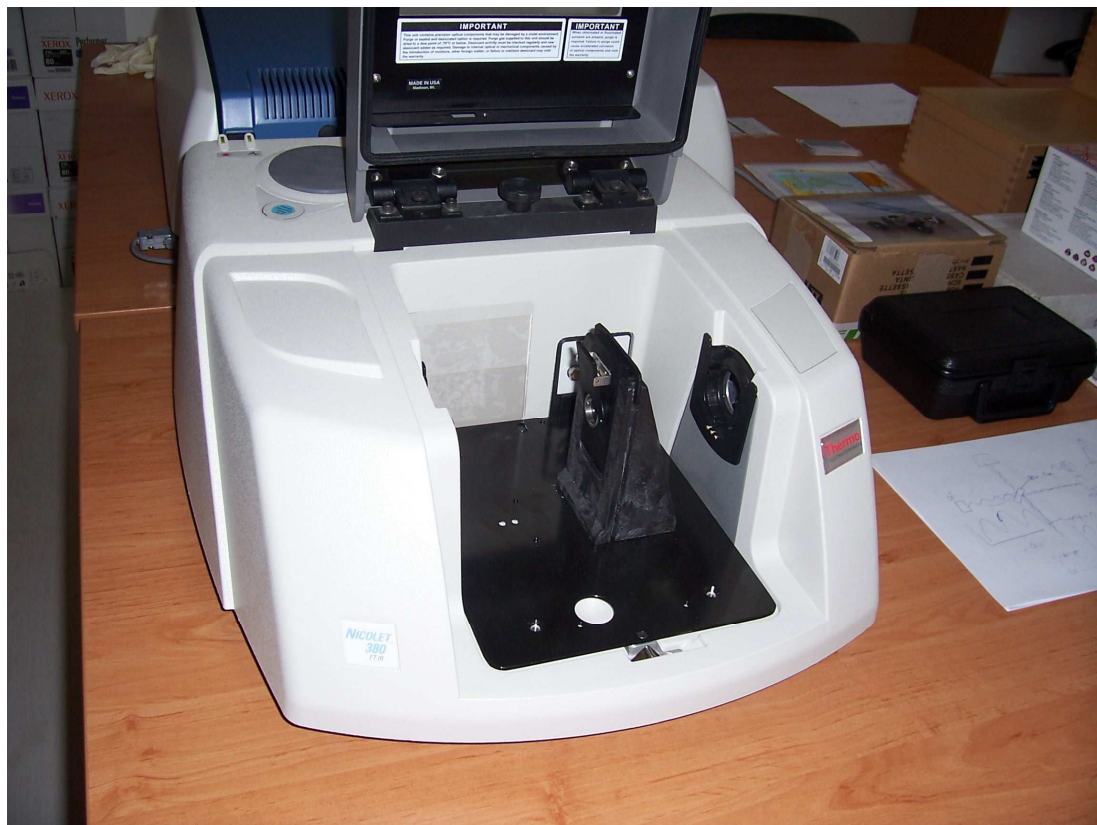
FTIR Nicolet 380 Thermo ELECTRON CORPORATION

Spektrometr FTIR

- max / min rozsah měření $7800 - 350 \text{ cm}^{-1}$
- měření transmittance, absorbance a reflektance v závislosti na vlnočtu

Příslušenství:

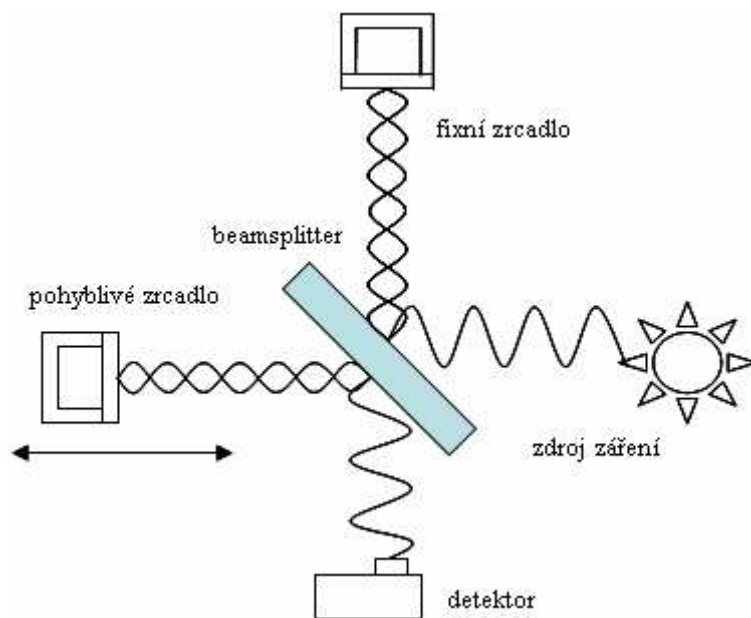
- nástavec pro zrcadlovou reflektanci (pro povrchovou analýzu)
- nástavec „Smart SAGA“ (pro analýzu tenkých vrstev na reflektujících substrátech, kontaktní úhel 80 stupňů, citlivost měření vrstev tenkých 0,1 nm)



Obr.5.3: Fotografie spektrometru FTIR Nicolet 380

Srdcem FTIR spektrometru je Michelsonův interferometr, jehož schéma je uvedeno na obr.5.4. Záření ze zdroje přichází na polopropustný dělič paprsků (beamsplitter), který jednu polovinu paprsků propustí k pohyblivému zrcadlu, druhá se odráží směrem k pevnému zrcadlu. Paprsky se od obou vzájemně kolmých zrcadel zpětně odrážejí a na děliči paprsků se podle polohy pohyblivého zrcadla buď sčítají, nebo odčítají. Je-li optická dráha paprsků v obou ramenech přístroje stejná, dojde pro všechny vlnové délky ke konstruktivní interferenci. Toho se užívá k určení této polohy. Při různé optické dráze v obou ramenech dojde pro vlny s různými vlnovými délkami k interferenci buď konstruktivní, nebo destruktivní. Na výstupu interferometru měříme celkovou intenzitu prošlého záření, tzv. *interferogram*. Tato hodnota je funkcí rozdílu optických drah v obou ramenech. Fourierovou transformací výsledné intenzity získáme závislost intenzity záření na jeho frekvenci (vlnové délce), tj. infračervené spektrum. Pro určení rozdílu optických drah v obou ramenech slouží laser s úzkou spektrální šířkou vyzařování. Jeho paprsek též prochází interferometrem a je snímán fotodiodou.

Infračervený signál měříme vždy v okamžiku, kdy je signál od laserového záření nulový. Dvě měřené polohy d zrcadla jsou tedy vzdáleny o vlnovou délku laseru. Rozlišovací schopnost spektrometru je naopak dána celkovým posunem L pohyblivého zrcadla [13, 19].



Obr.5.4: Schéma Michelsonova interferometru [19]

5.3 Elipsometrie

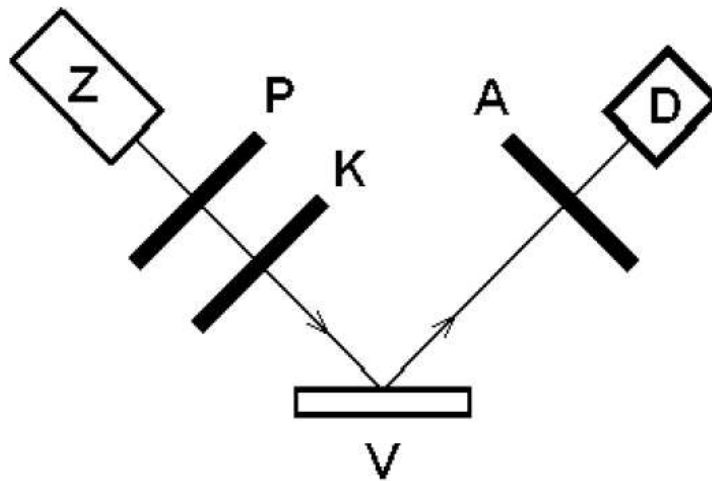
V této kapitole je uveden základní princip Elipsometrie.

Elipsometrie je optická metoda, pomocí které se dají experimentálně určit charakteristiky materiálů, jako je index lomu, tloušťka vrstvy, ve které je zkoumaný materiál nanesen. Metoda se v současné době používá téměř výhradně pro výzkum lineárních vlastností materiálů, tj. k určení indexu lomu, který nezávisí na intenzitě osvětlení vzorku. Reálné materiály ale vykazují nelinearity, tj. jejich index lomu se mění s intenzitou dopadajícího světla [39].

Princip měření fázového elipsometru je následující:

Při měření vychází ze zdroje Z nepolarizované monochromatické světlo, které vstupuje do polarizátoru P, kde se světlo lineárně polarizuje²⁾, dále světlo vstupuje do kompenzátoru K, kde se z lineárně polarizovaného světla stává světlo elipticky polarizované³⁾. To potom dopadá na vzorek V a odráží se od něj, odražené světlo

vstupuje do analyzátoru A a dále postupuje k detektoru D, kde se vyhodnocuje. Schéma měření je uvedeno na *obr.5.5* [40].



Obr.5.5: Princip měření vzorku pomocí elipsometrie [40]

²⁾ Lineárně polarizované světlo – Světlo, jehož vektor elektrické intenzity \mathbf{E} je dán navzájem kolnými složkami kmitů $E_s = E \cdot \sin\alpha$ a $E_p = E \cdot \cos\alpha$ (α je úhel dopadu), které mají buď stejnou nebo opačnou fázi. Výsledný kmitavý pohyb je rovinný (přímka).

³⁾ Elipticky polarizované světlo – Ve světelné vlně mohou mít složky různou fázi, v tomto případě je výsledný pohyb prostorová křivka (šroubovice). Koncový bod výsledného vektoru elektrické intenzity \mathbf{E} v závislosti na čase t opisuje elipsu.

6 Praktická část

V této kapitole je uveden popis depoziční aparatury a přehled dosažených výsledků měření optických vlastností nadeponovaných vzorků.

6.1 Popis depoziční aparatury

Aparatura jako taková se skládá z několika dílčích bloků. Základním blokem je samotná depoziční komora s magnetronem, dále je potřebný kvalitní zdroj a rovněž vývěva, kterou docílíme požadovaného vakua. Předposlední blok je chladicí obvod a na závěr je nutná regulace důležitých parametrů procesu využitím řídicího bloku.

Aparaturu napájí RF zdroj s výkonem 100W až 500W, frekvence je 13,56MHz. K vytvoření vakua je možné využít dvoustupňového čerpacího systému. Prvním stupněm je rotační vývěva, která předčerpá komoru pouze na určitý tlak (do 0.1Pa). Následně se aktivuje turbo-molekulární vývěva, která komoru odčerpá na již požadovaný tlak (pod 0.1Pa). Toto uspořádání je použito z důvodu ochrany turbo-molekulární vývěvy. Rychlost čerpání komory je dána dosažením tlaku $2 \cdot 10^{-4}$ Pa za méně než 30min [7]. Čerpání komory je řízeno plně automaticky, avšak depoziční proces je poloautomatický, protože se musí manuálně vypínat magnetron a rotace deponovaných vzorků. Po vypnutí magnetronu se aparatura přepne do režimu vyrovnání tlaku a současně se do komory napouští i dusík jako ochranný plyn sloužící k bezpečnému vytažení vzorků z komory. Na *obr.6.1* je fotografie takovéto aparatury. Na pravé straně je umístěna řídicí jednotka, která umožňuje pohodlnou obsluhu celého zařízení. Na levé straně vidíme depoziční komoru, za kterou je umístěn čerpací systém.



Obr.6.1: Fotografie celé depoziční aparatury

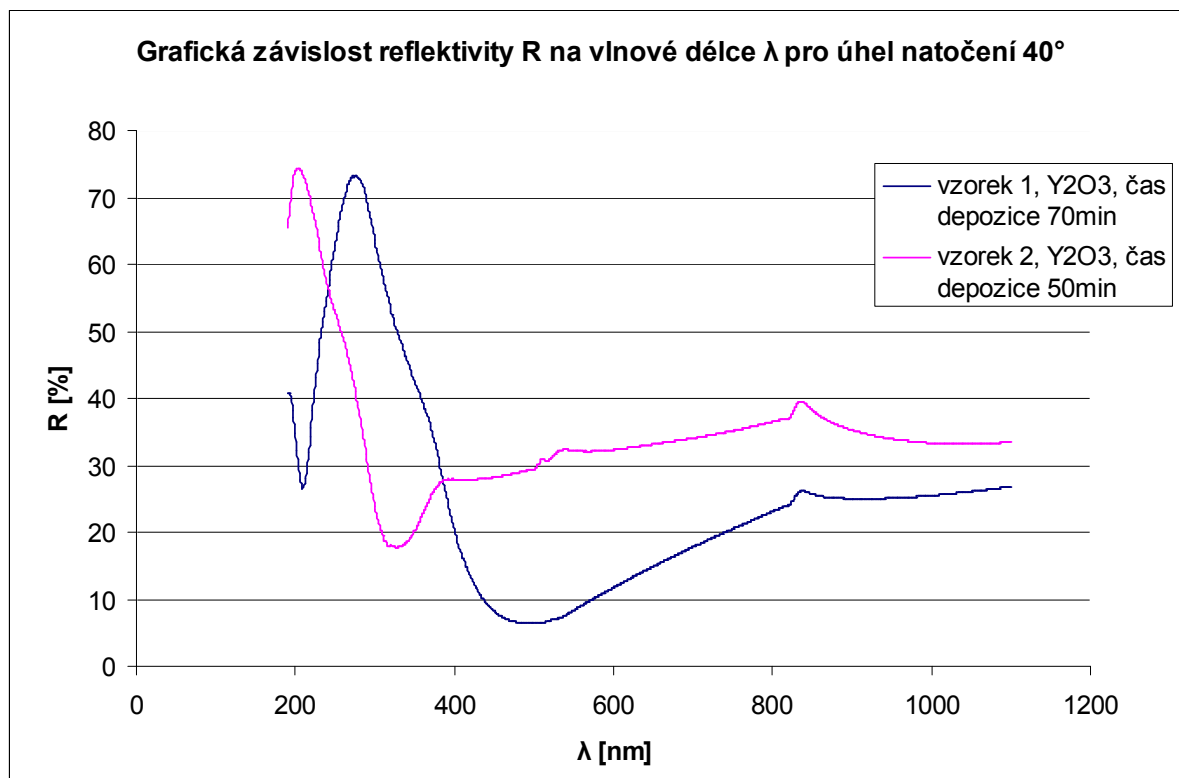
6.2 Výsledky depozic ze série 1

V grafických závislostech jsou zobrazeny průběhy změřené na spektrofotometru SPECORD 210 – analytikjena. Měření byla provedena pro dva různé úhly natočení měřeného vzorku, první byl 40° a druhý byl 20°. Měření stechiometrie pomocí FTIR nemělo žádnou vypovídací hodnotu, proto zde není zahrnuto. Depoziční parametry pro snadné porovnání vzorků jsou uvedeny v *tab.6.1*. Před depozicemi byly vzorky iontově leptány výkonem 150W po dobu 10minut. Depozice byly provedeny technologií RF magnetronového naprašování s frekvencí 13,6 MHz (nereaktivní metodou). Odprašovaný materiál byl ve formě pevného keramického Y₂O₃ o průměru 3” a čistotě 99,99%.

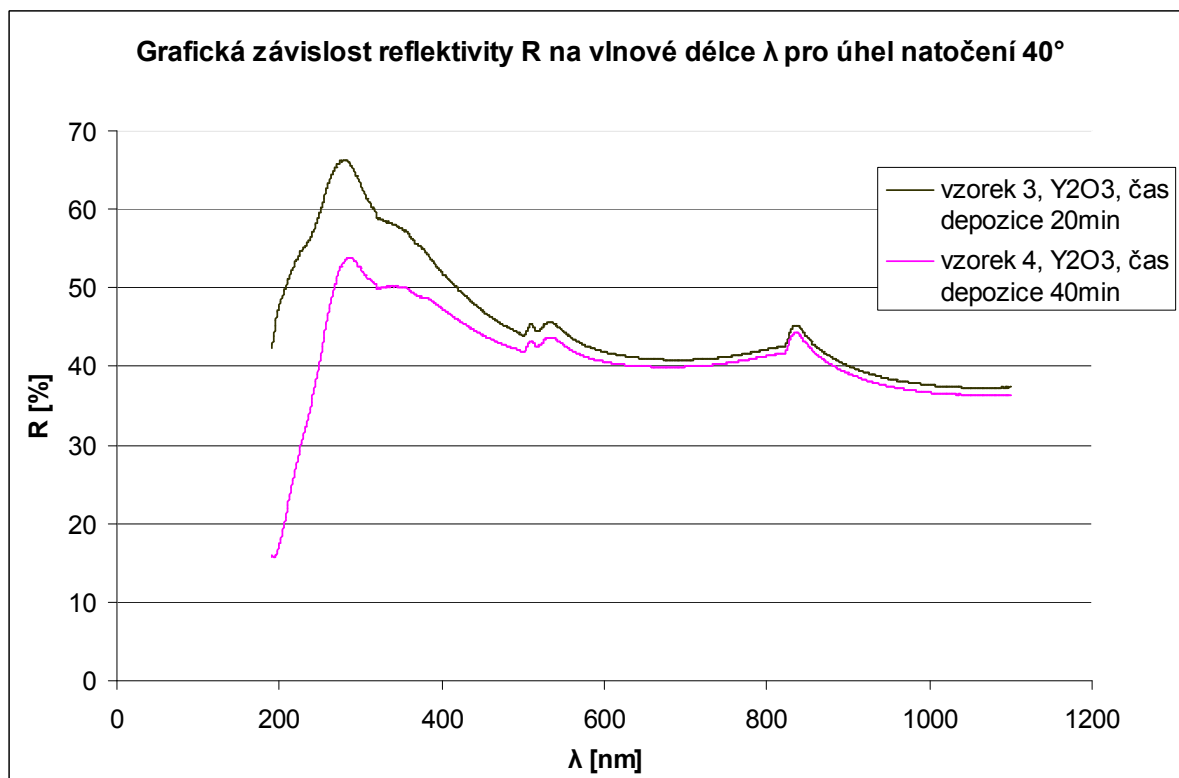
Tab.6.1: Stručný přehled depozičních parametrů jednotlivých vzorků

Číslo vzorku	Výkon [W]	Doba depozice [min]	Rotace vzorků	Průtok Ar [sccm]	Tlak [Pa]	Teplota substrátu [°C]	Tloušťka [nm]
1	400	70	on	10	1,05	33	
2	400	50	on	10	1,1	37	
3	400	20	off	10	1,1	33	30 - 40
4	400	40	off	10	1,1	35	
5	400	90	on	10	1,05	37	95
6	400	90	on	10	1,05	37	95
7	zlomený						
8	400	110	on	10	1,07	49	130
9	400	110	on	10	1,07	49	130

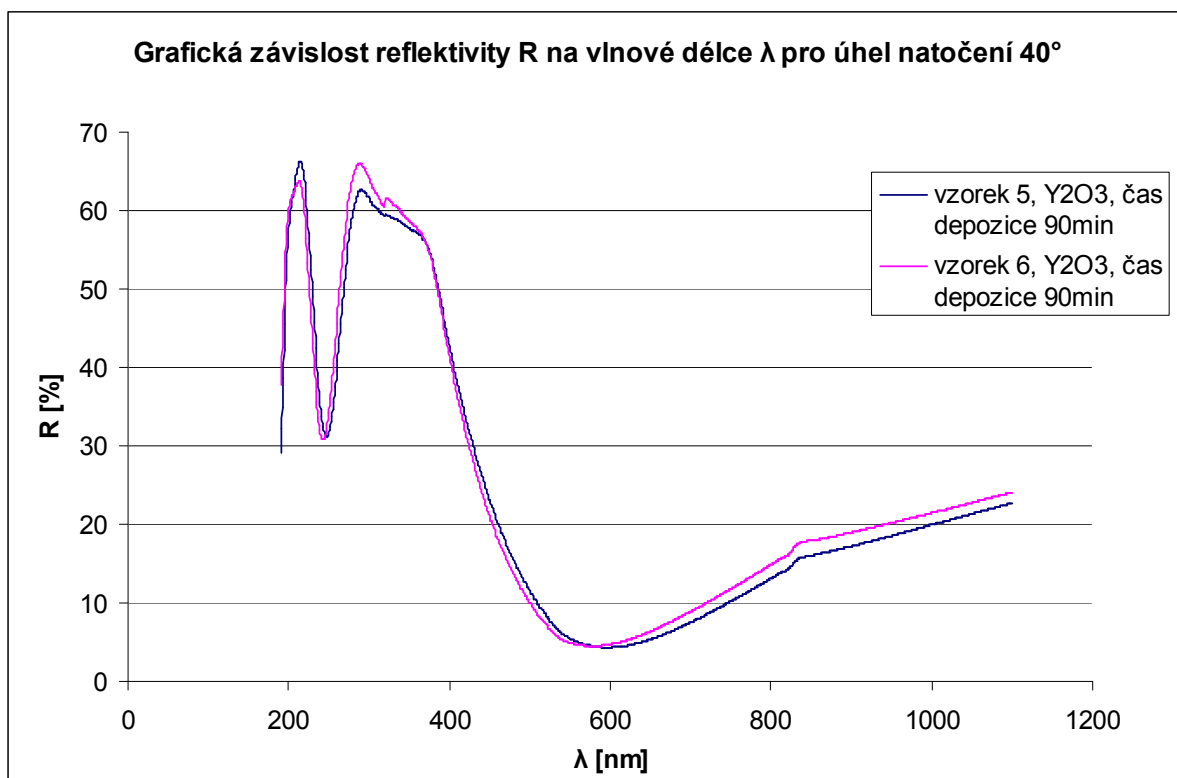
6.2.1 Měření reflektance pro měnící se vlnové délky pod úhlem 40°



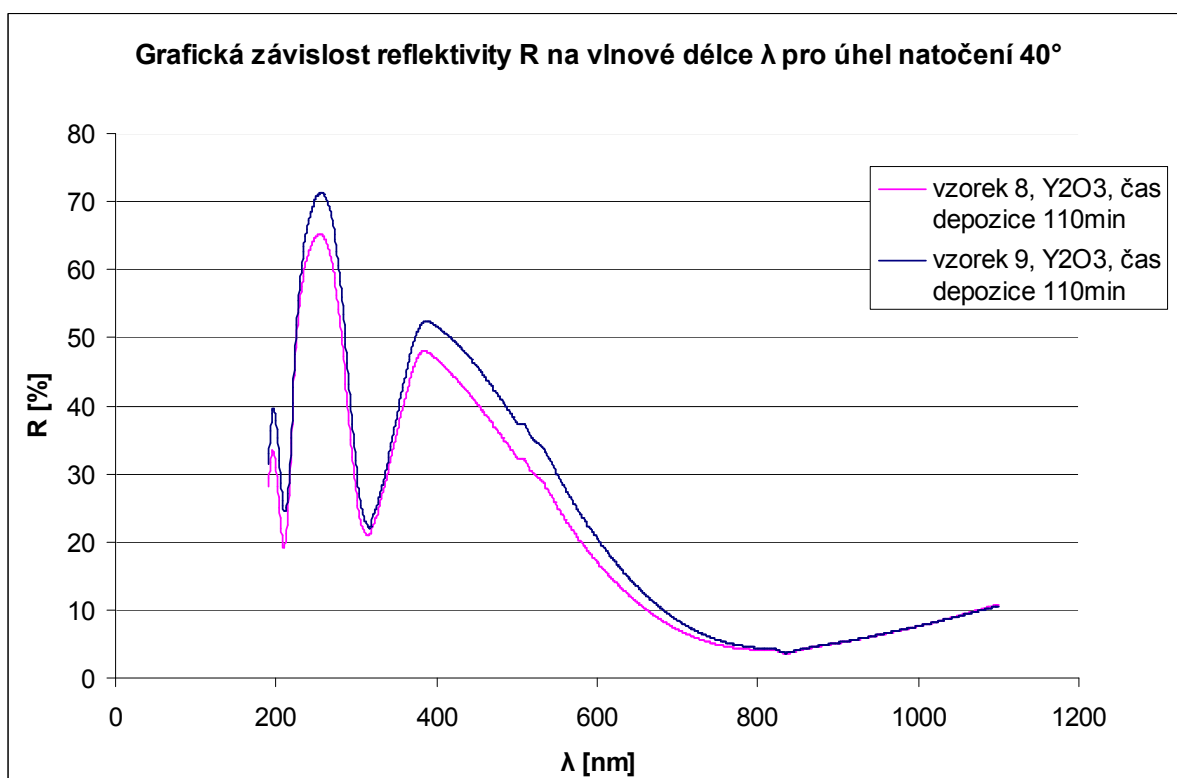
Obr.6.2: Závislost reflektivity R na vlnové délce λ pro úhel natočení 40°, vzorky 1 a 2



Obr.6.3: Závislost reflektivity R na vlnové délce λ pro úhel natočení 40°, vzorky 3 a 4

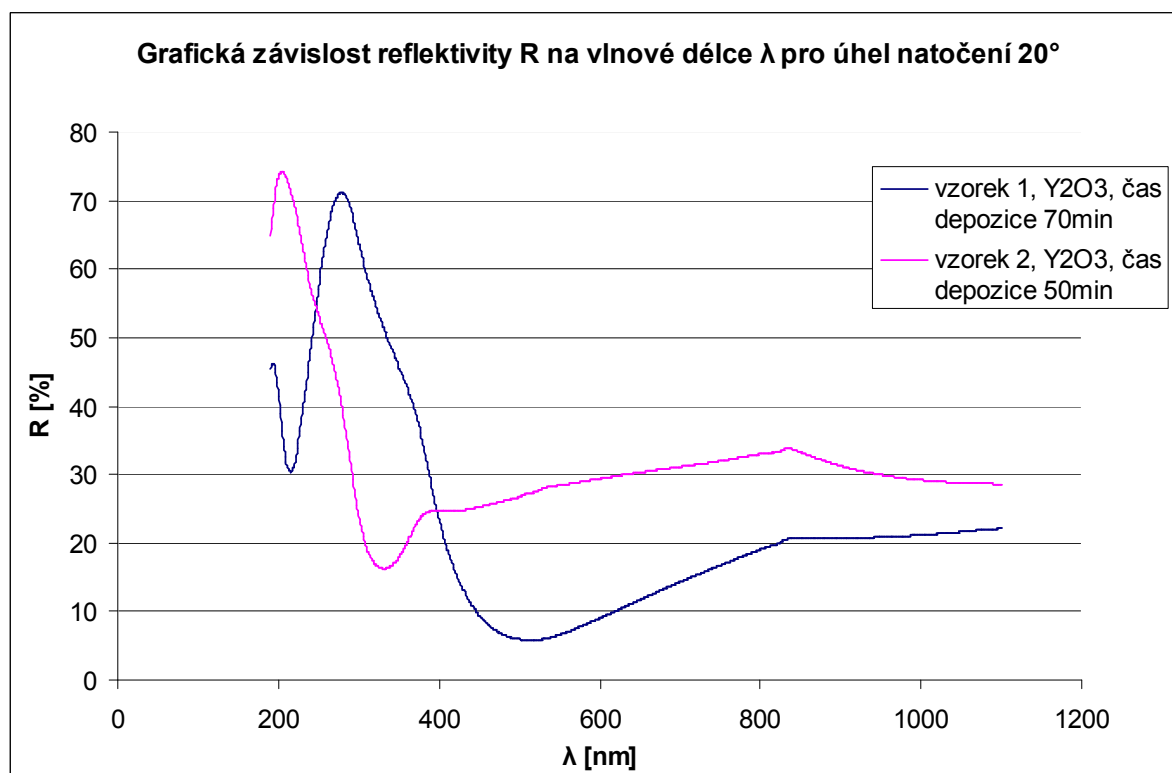


Obr.6.4: Závislost reflektivity R na vlnové délce λ pro úhel natočení 40°, vzorky 5 a 6

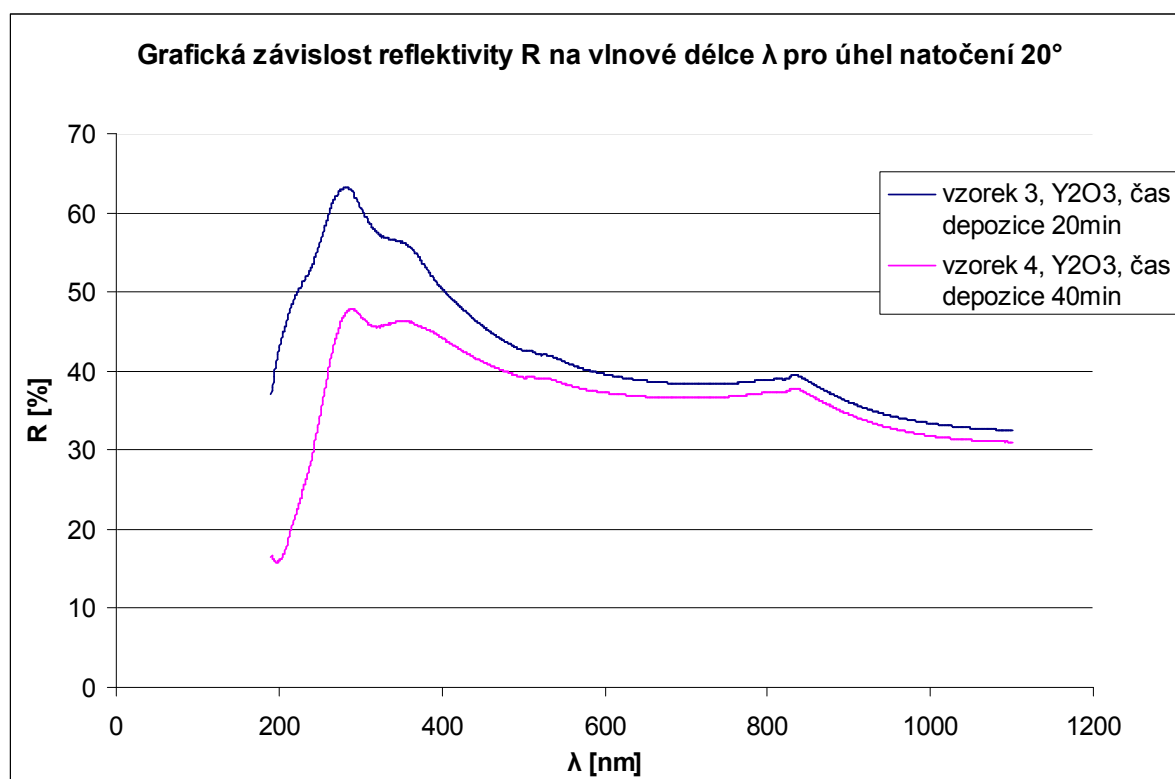


Obr.6.5: Závislost reflektivity R na vlnové délce λ pro úhel natočení 40°, vzorky 8 a 9

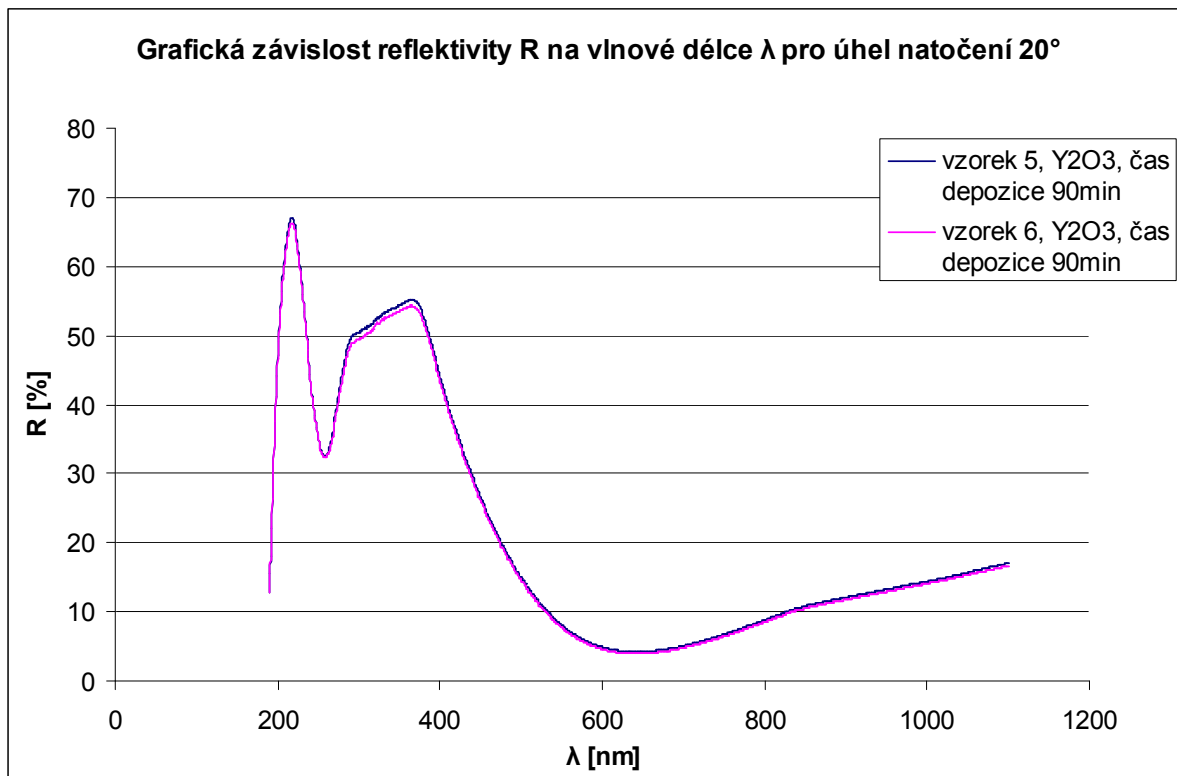
6.2.2 Měření reflektance pro měnící se vlnové délky pod úhlem 20°



Obr.6.6: Závislost reflektivity R na vlnové délce λ pro úhel natočení 20°, vzorky 1 a 2



Obr.6.7: Závislost reflektivity R na vlnové délce λ pro úhel natočení 20°, vzorky 3 a 4



Obr.6.8: Závislost reflektivity R na vlnové délce λ pro úhel natočení 20°, vzorky 5 a 6

6.3 Výsledky depozic ze série 2

V grafických závislostech jsou zobrazeny průběhy změřené na spektrofotometru SPECORD 210 – analytik jena. Měření byla provedena pro úhel natočení měřeného vzorku 40°. Depoziční parametry pro snadné porovnání vzorků jsou uvedeny v *tab.6.2*.

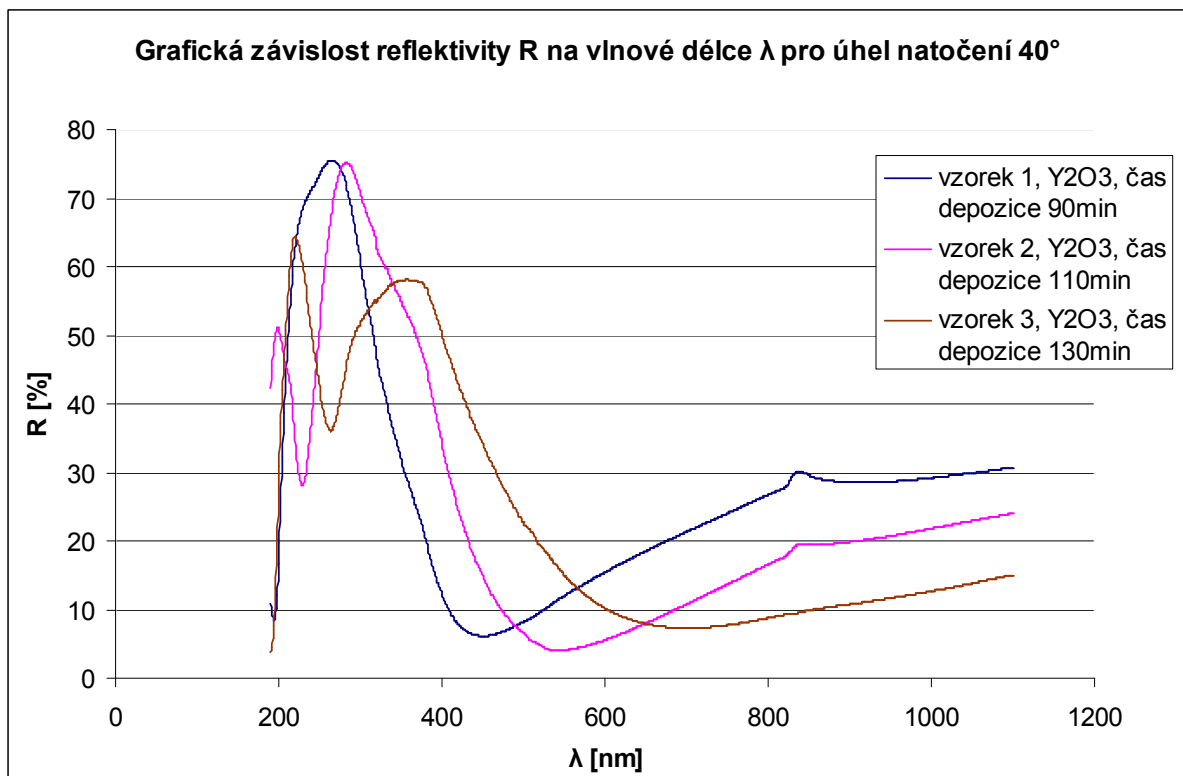
Před depozicemi byly vzorky iontově leptány výkonem 150W po dobu 10minut. Po vlastních depozicích se zjistilo, že vzorek 2 a vzorek 3 mají pravděpodobně povrch pokryt tenkou vrstvičkou neznámého složení, prvně jsme se domnívali, že jde o nitridy vytvořené dusíkem, který se do komory vpuští po ukončení procesu naprašování, proto se provedla měření na FTIR, která sice ukázala přítomnost cizího materiálu, ovšem nešlo jednoduše určit o jaký materiál nebo spíše sloučeninu jde. Proto se dále vzorky zkoumaly pomocí rentgenové difrakce. Další skutečnost, která se během depozic vyskytla, bylo zjištění, že při dodržení stejné doby depozice 90minut pro vzorek 1 jako tomu bylo rovněž při depozici vzorku č.5 z 26.3.2009 byla naprašovaná vrstvička pouze 50nm oproti 95nm. Bližší zkoumání ukázalo, že příčinou pomalé depozice je nestejněmorné uvolňování kyslíku a yttria z terče, kyslík se uvolňuje mnohem rychleji, čímž dochází po několika depozicích k ochuzení povrchu terče o kyslík a tím i

zpomalení depozice vrstvy požadované tloušťky [38]. Jako možné řešení toho problému vidím použití reaktivní metody, kdy se bude úbytek kyslíku kompenzovat.

Tab.6.2: Stručný přehled depozičních parametrů

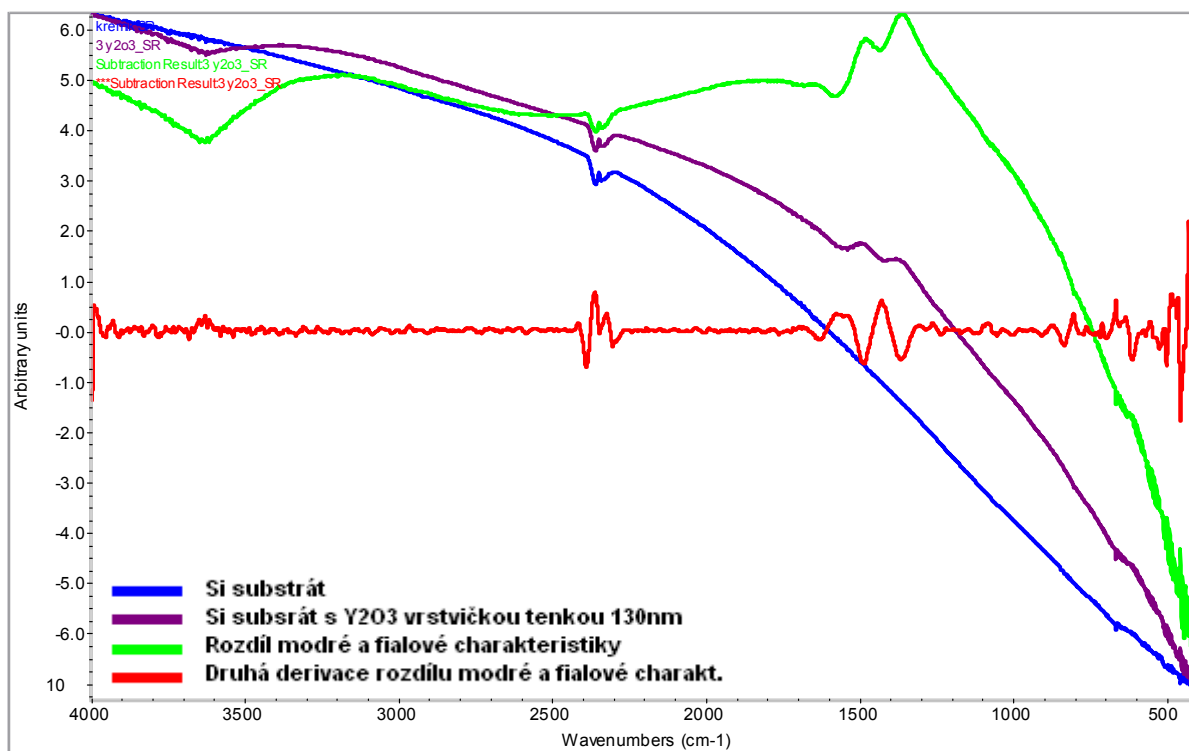
Číslo vzorku	Výkon P[W]	Čas depozice t[min]	Teplota substrátu [°C]	Tlak [Pa]	Průtok Ar [sccm]	Tloušťka [nm]	Rotace
vzorek 1	400	90	38	1,1	10	50	ON
vzorek 2	400	110	1,1	10	70	ON	
vzorek 3	400	130	53	1,1	10	95	ON

6.3.1 Měření reflektance pro měnící se vlnové délky pod úhlem 40°

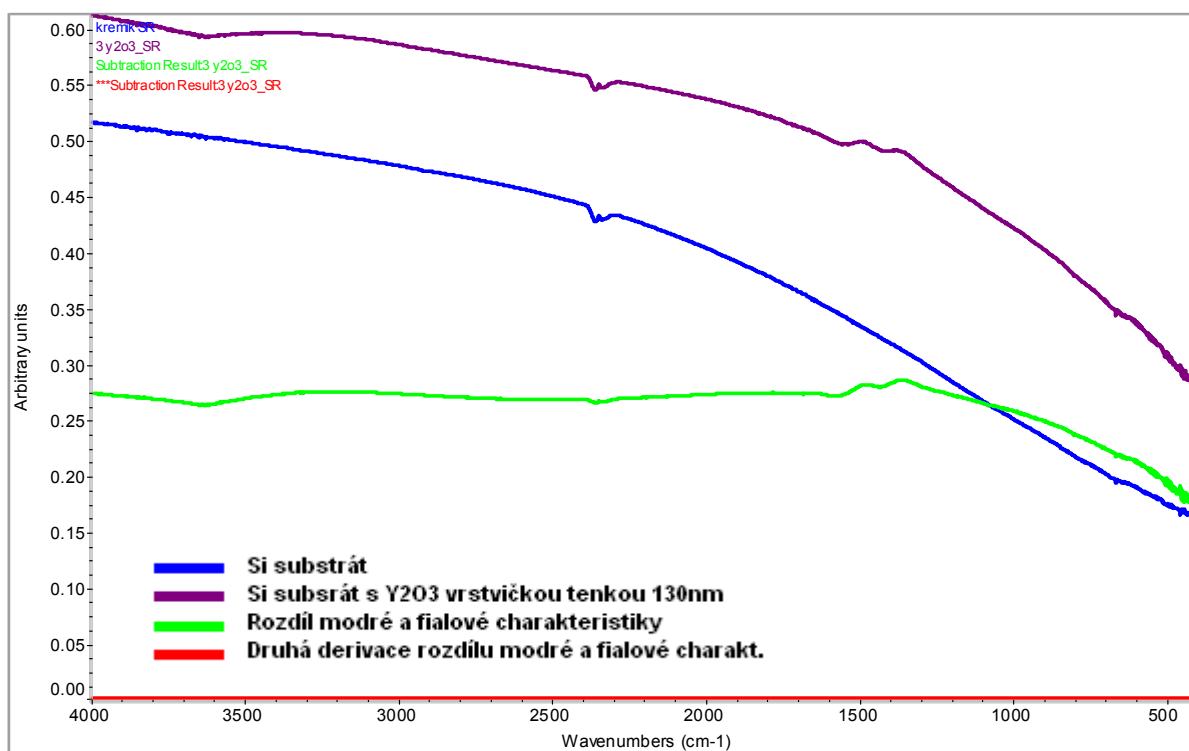


Obr.6.9: Závislost reflektivity R na vlnové délce λ pro úhel natočení 40°, vzorek 1, 2 a 3

6.3.2 Měření materiálového složení vzorku 3 pomocí FTIR



Obr.6.10: Detail naměřených charakteristik pro vzorek 3 a čistý Si substrát jako reference



Obr.6.11: Naměřené charakteristiky pro vzorek 3 a čistý Si substrát jako reference v jednotném měřítku

6.4 Výsledky depozic ze série 3

Depozice série 3 byly provedeny reaktivní metodou, která byla navržena jako vhodnější vzhledem k předchozím depozičním zkušenostem. V *tab.6.3a* a *tab.6.3b* jsou uvedeny depoziční parametry jednotlivých vzorků. Vzorky deponované reaktivní metodou vykazovaly nehomogenitu nadeponovaných vrstev. Měření vzorků proběhlo na elipsometru Jobin Yvon UVISEL DH10 ve spolupráci s Ústavem fyzikální elektroniky, Přírodovědecké fakulty Masarykovy univerzity. Přístroj umožňuje měření v rozsahu vlnových délek od 230 nm do 850 nm při úhlech dopadu 55°, 60°, 65°, 70° a 75°. Elipsometr JY UVISEL DH10 je typ fázově modulovaného elipsometru. U fázově modulovaného elipsometru je kompenzátor a analyzátor v určité pevné poloze [39, 40].

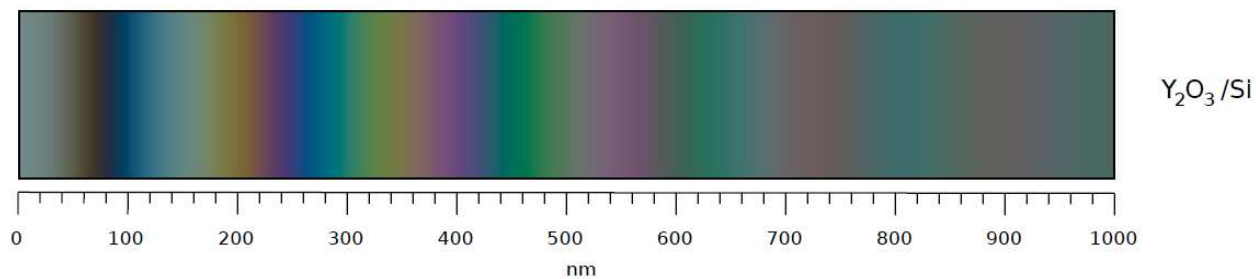
Tab.6.3a: Přehled depozičních parametrů

Vzorky	Depozice					Substrát	Zdroj	Rotace
	P	t	V _{SB}	V _{BIAS}	Teplota			
	[W]	[min]	[V]	[V]	[°C]			
YO5	400	75	-	-716	23	Si + sklo	RF	ON
YO6	400	60	-	-697	27	Si + sklo	RF	ON
YO7	400	90	-	-654	31	Si + sklo	RF	ON
YO8	400	60	-16	-701	30	Si + sklo	RF	ON
YO9	400	22	-16	-705	25	Si + sklo	RF	ON

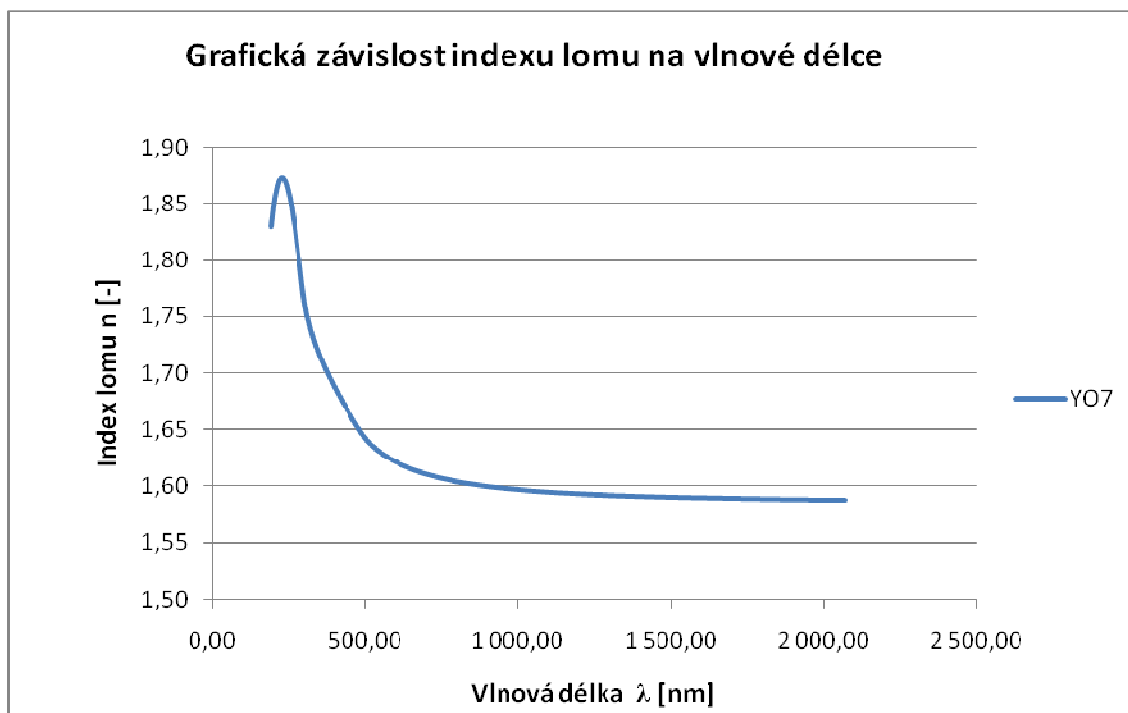
Tab.6.3b: Pokračování přehledu depozičních parametrů

Vzorky	Ar		O ₂	Hodnota vákua	Tlak při depozici	Čištění povrchu		Tloušťka
	průtok	napoušť.	průtok			P	t	
	[sccm]	[min]	[sccm]			[W]	[min]	
YO5	10	2	0,5		1,05	150	10	640
YO6	10	5	0,5	$8,13 \cdot 10^{-5}$	1,1	150	10	570
YO7	10	5	0,5	$3,36 \cdot 10^{-5}$	1,1	150	10	715
YO8	10	5	0,5	$1,06 \cdot 10^{-4}$	1,02	150	10	675
YO9	10	5	0,5	$6,65 \cdot 10^{-5}$	1,02	150	10	275

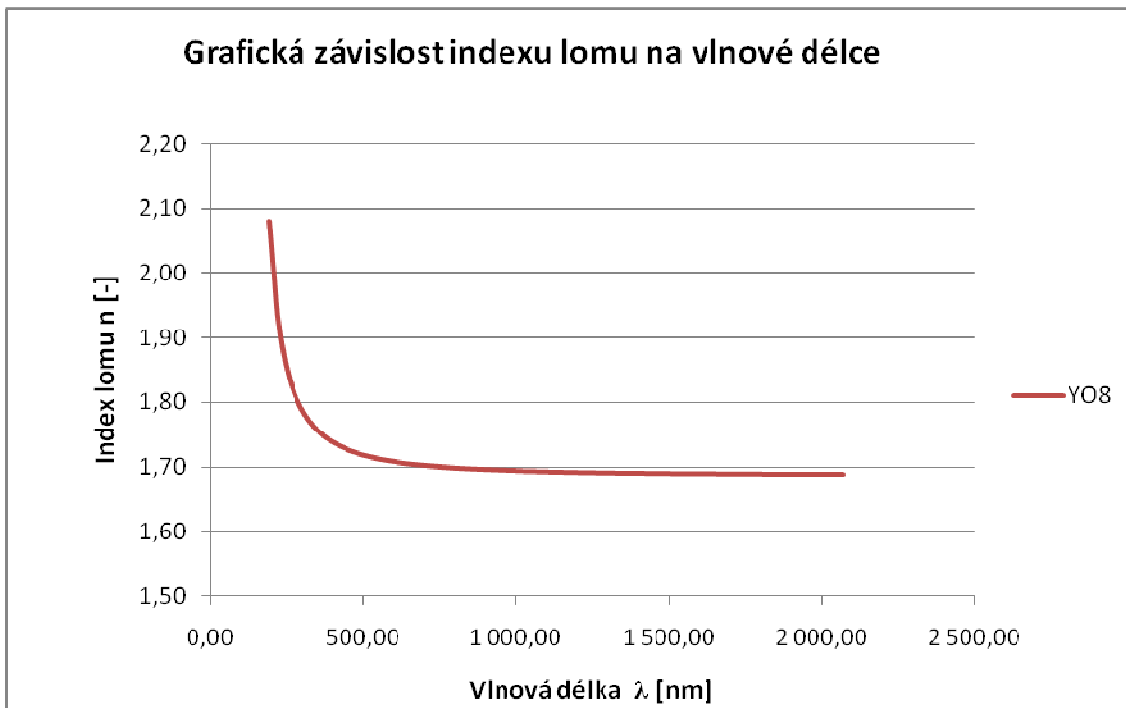
Na obr.6.12 je znázorněn barevný gradient oxidu yttria pro dané spektrum tloušťek vrstvy.



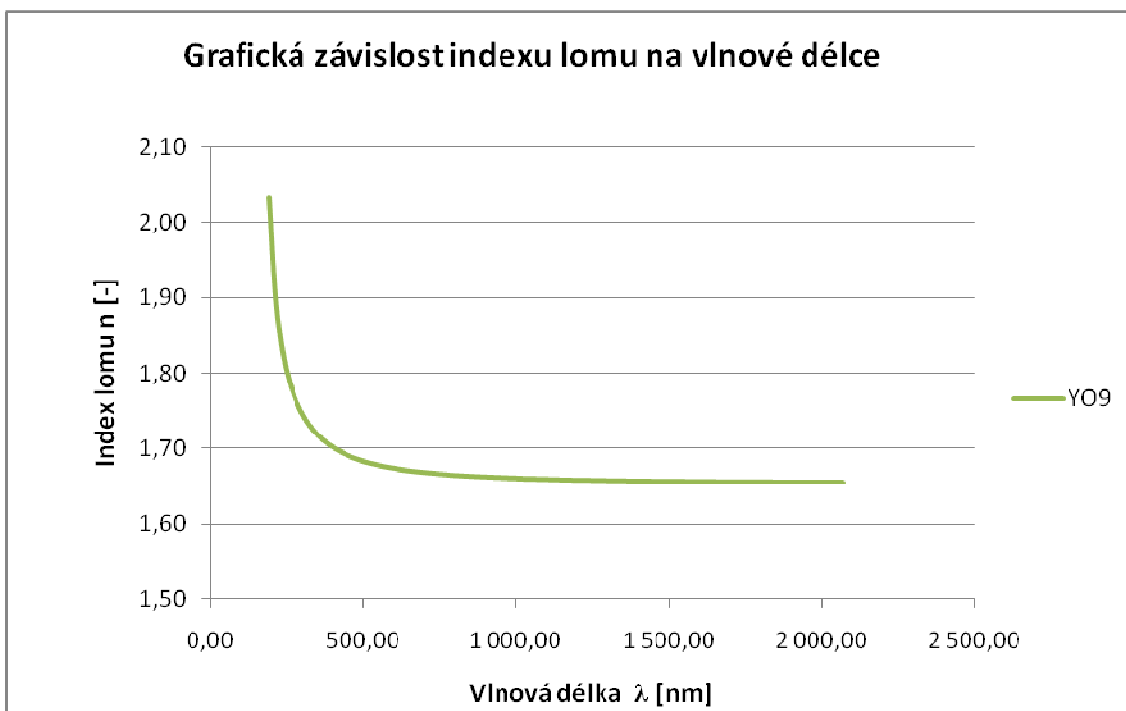
Obr.6.12: Barevný gradient Yttrium oxidu



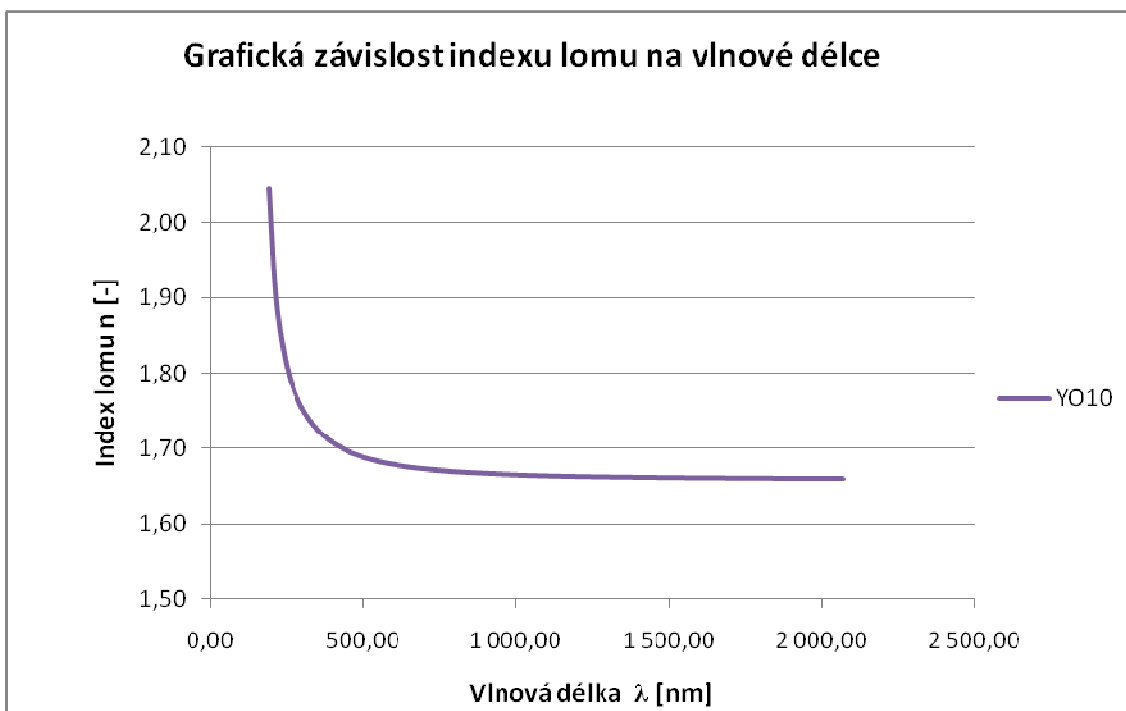
Obr.6.13: Závislost indexu lomu vzorku YO7 na vlnové délce



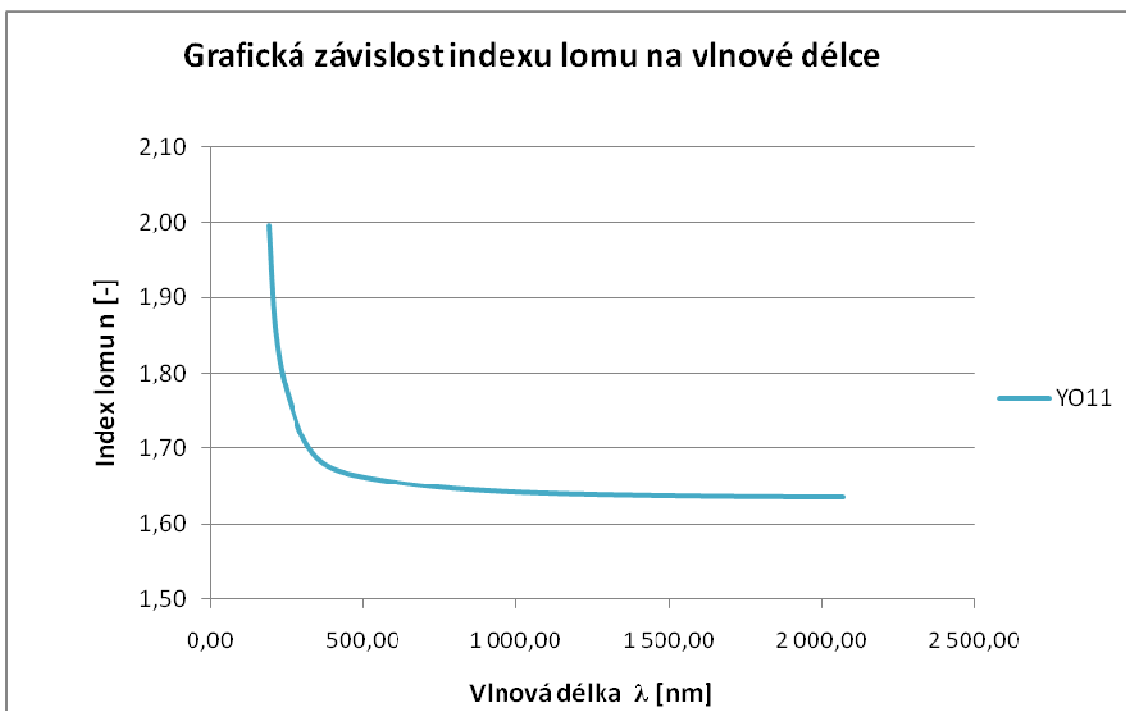
Obr.6.14: Závislost indexu lomu vzorku YO8 na vlnové délce



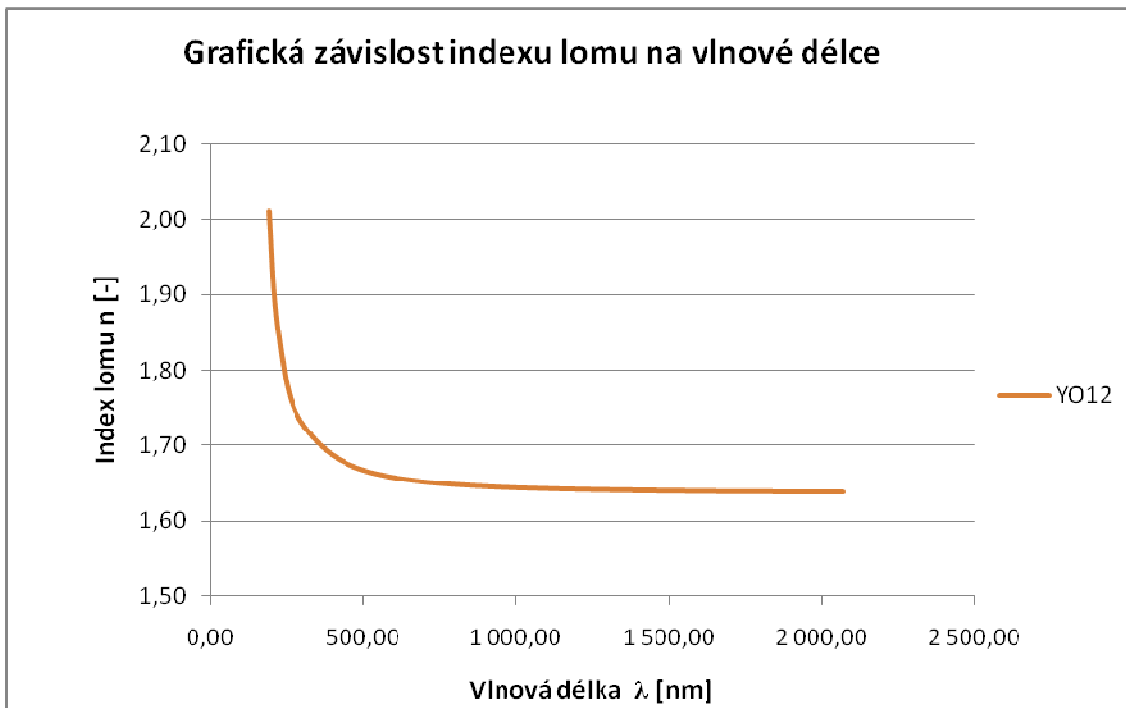
Obr.6.15: Závislost indexu lomu vzorku YO9 na vlnové délce



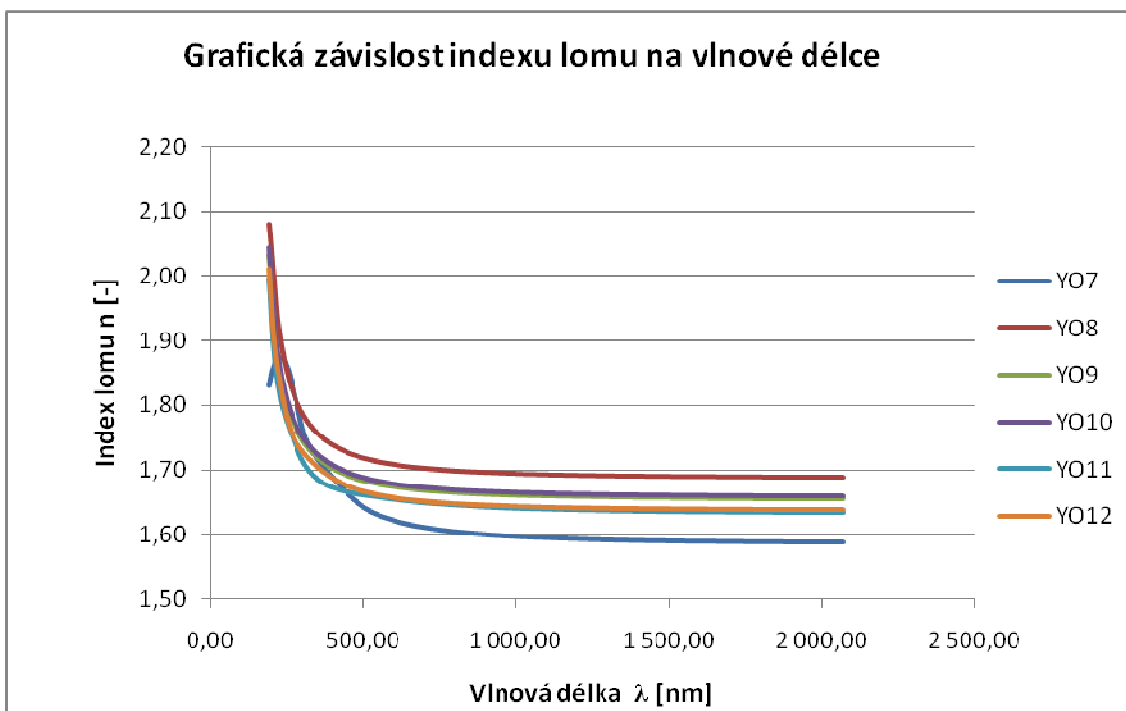
Obr.6.16: Závislost indexu lomu vzorku YO10 na vlnové délce



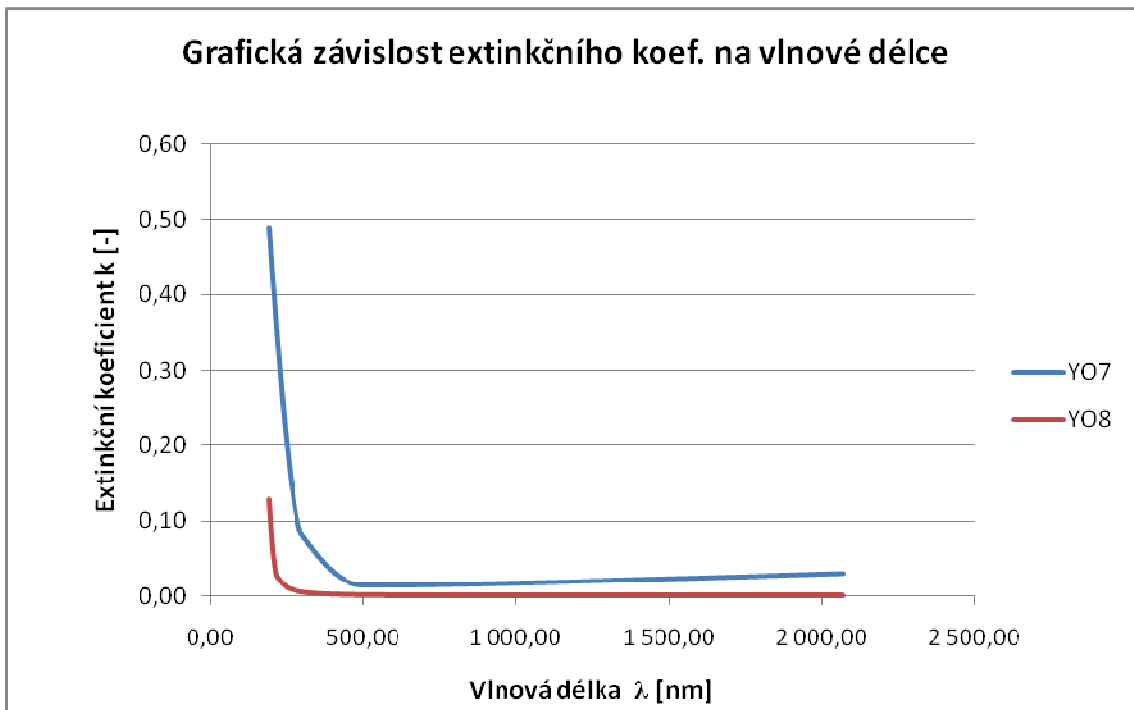
Obr.6.17: Závislost indexu lomu vzorku YO11 na vlnové délce



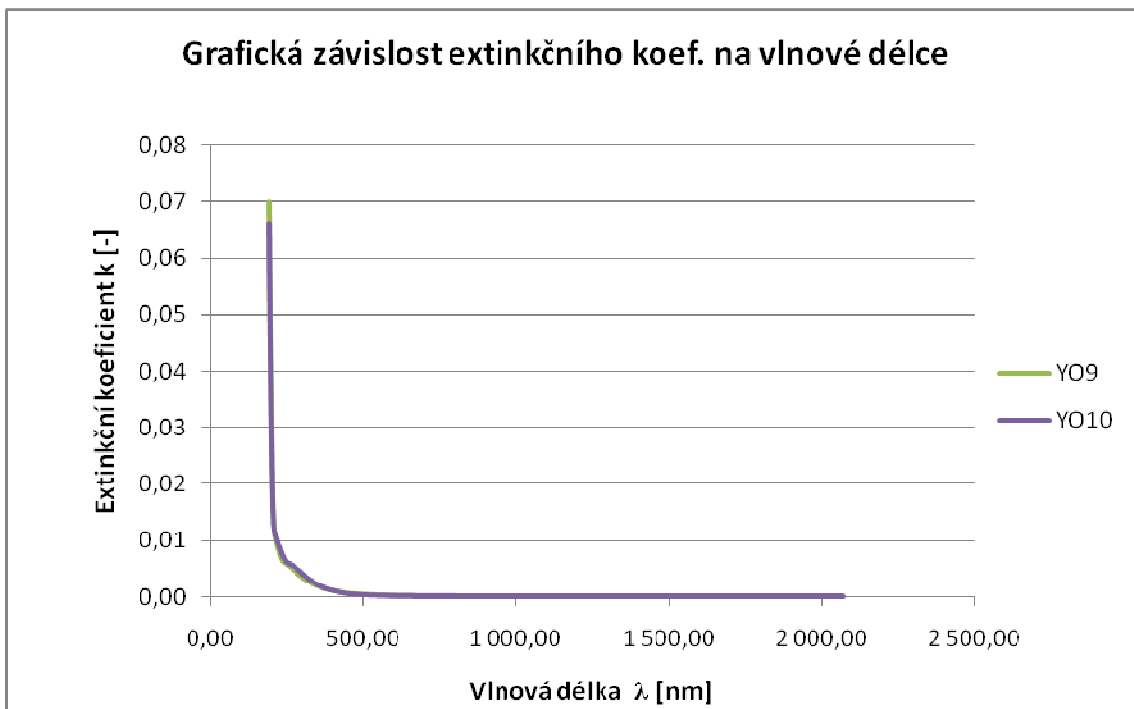
Obr.6.18: Závislost indexu lomu vzorku YO12 na vlnové délce



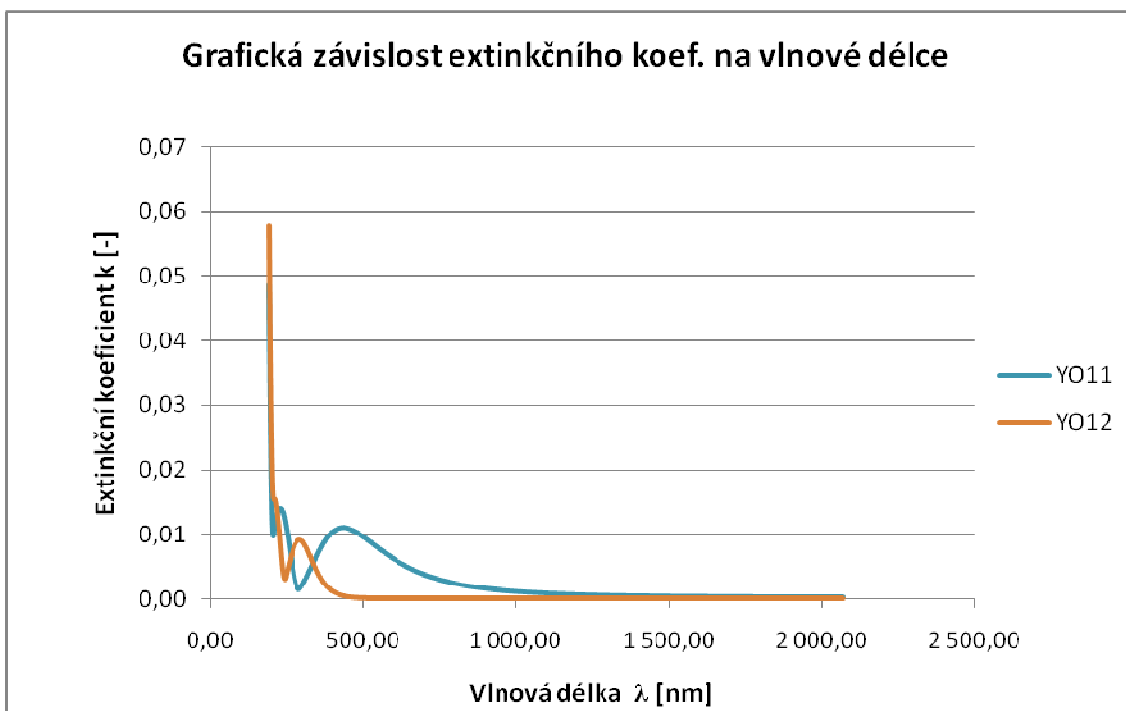
Obr.6.19: Závislost indexu lomu všech vzorků na vlnové délce



Obr.6.20: Závislost extinkčního koeficientu vzorků YO7 a YO8 na vlnové délce



Obr.6.21: Závislost extinkčního koeficientu vzorků YO9 a YO10 na vlnové délce



Obr.6.22: Závislost extinkčního koeficientu vzorků YO11 a YO12 na vlnové délce

7 Závěr

Tato práce v první kapitole pojednává o vlastnostech a technologii solárních článků, dále následuje pojednání o antireflexních a pasivačních vrstvách. Další kapitola informuje o vlastnostech a použití Yttrium oxidu, následně se práce zaměřuje na popis metody magnetronového naprašování, kde hlavní důraz je kladen především na reaktivní magnetronovou depozici. V poslední teoretické kapitole se nachází pojednání o technikách měření optických vlastností antireflexních vrstev jako je absorbance, transmitance a index lomu. Následuje praktická část, kde jsou uvedeny depoziční parametry a dosažené výsledky měření.

Z provedených depozic a následných měření vyplývá hned několik důležitých zjištění. Při depozicích série 1 se neprojevovalo ochuzení naprašovaného materiálu o kyslík, depozice probíhaly prvotním zkušebním způsobem nastavení aparatury pro měnící-se čas depozice, tak aby se zjistila depoziční charakteristika yttrium oxidu. Skutečnosti, které se vyskytly během depozic série 2 jasně vypovídaly o dalším směřování budoucích pokusů, zaměřeni se na reaktivní magnetronové naprašování, které bude úbytek kyslíku kompenzovat. Výsledné tloušťka vrstvy s požadovanými vlastnostmi pro nereaktivní depozici by se měla pohybovat okolo 100 - 150nm. Usuzuji z toho, že reflexní minimum leží v okolí vlnových délek 600nm – 800nm, což je pro aplikaci vrstev jako antireflexní krytí vyhovující. Rentgenová difrakce měla minimální vypovídací hodnotu už z toho důvodu, že se zde neukázaly pásy Si a Y_2O_3 takové, jaké byly předpokládány, amplituda byla příliš malá nato, aby se dalo něco vyčíst, pravděpodobný následek tohoto chování spočíval v Si substrátu. Stejně tak i metoda FTIR poukázala sice na výskyt „nějakých“ vazeb, ale nešlo určit o jaký materiál jde. Depozice série 3, které již probíhaly reaktivně potvrdili předpoklady, ovšem nadeponované vzorky vykazovaly nehomogenní povrch. Z měření indexu lomu se ukázalo, že procesní parametry mají jistý vliv na konečnou hodnotu indexu lomu, pro vlnové délky 600nm – 800nm se index lomu pohybuje mezi hodnotami 1,6 až 1,7. Pro antireflexní vrstvu vidím optimum v hodnotě 1,6. Dále byly připraveny vzorky pro zkoumání teplotního vlivu depozice na výsledné optické vlastnosti, ovšem z důvodu technických potíží na depoziční aparatuře se tyto nepodařilo zrealizovat.

Budoucí postup práce by směřoval k optimalizaci procesních parametrů, tak aby se dosáhlo depozice homogenních vrstev, dále k ověření vlivu teploty a k finálnímu produktu ve formě fungujícího solárního článku s optimalizovanou antireflexní vrstvou.

8 Seznam použité literatury

- [1] Bannert, P., *Parametry fotovoltaických článků*, Projekt Solární Fotovoltaický systém a „Zelená energie“ v Českém Švýcarsku, Varnsdorf: VOŠ a SPŠ Varnsdorf, 8 stran, [cit. 13.2.2010], Dostupné z URL: http://www.vosvdf.cz/cmsb/userdata/487/FVS_001_cviceni/001_parametry_fvc.pdf
- [2] Benda, V.: *Solární články z krystalického křemíku – základy technologie současné fotovoltaiky*, Praha: ČVUT Praha, 25.9.2006, [cit. 19.5.2010], Dostupné z URL: <http://www.tzb-info.cz/t.py?t=2&i=3553>
- [3] Ceradyne, *Yttrium oxide property comparsion*, 1 strana, [cit. 11.12.2009], California: Costa Mesa, Dostupné z URL: <http://www.ceradyne.com/uploads/Yttrium%20Oxide.pdf>
- [4] *Ceramic Synthesis*, Sweden: Lulea University of Technology, 11.7.2006, [cit. 8.1.2010], Dostupné z URL: <http://www.ltu.se/tfm/avd/d3952/d1406/1.7789?l=en>
- [5] Corning, D., *Chemical Vapor Deposition*, Dow Corning – Technical Library, 8 stran, 2010, [cit. 11.5.2010], Dostupné na URL: http://www.dowcorning.com/content/etronics/etronicschem/etronics_newcvd_tutorial3.asp?DCWS=Electronics&DCWSS=Chemical%20Vapor%20Deposition
- [6] Energ servis, *Fotovoltaika – princip*, [cit. 12.4.2010], Dostupné z URL: <http://www.energ servis.cz/files/princip.JPG>
- [7] Edwards, *TF600 Vacuum coating system*, BOC EDWARDS, 2004, 4 strany, PN: E050-00-895, [cit. 19.4.2009] Dostupné z URL: www.bocedwards.com
- [8] Goetzberger, A., Hoffmann, V. U., *Photovoltaic Solar Energy Generation*, Springer - Verlag Berlin Heidelberg, 2005, 146 stran, s. 23 – 43, ISBN 3 – 540 – 23676 – 7, Dostupné jako internetové vydání na URL: http://www.google.com/books?id=QF8jDTSByTgC&printsec=frontcover&dq=solar+cells+technology&lr=&hl=cs&source=gbs_similarbooks_s&cad=1#v=onepage&q=solar%20cells%20technology&f=false

- [9] Harmatha, L., et al.: *Study of MIS structures with yttrium oxide films on silicon by capacitance measurements*, In: Proceedings of the 8th international workshop on Applied Physics of Condensed Matter APCOM 2002, June 19-21, 2002, Liptovský Mikuláš, pp. 78 – 81.
- [10] Honsberg, Ch., Bowden, S., *Photovoltaics CDROM*, [cit. 16.5.2010], Dostupné na URL: http://pvcdrom.pveducation.org/DESIGN/SURF_MIN.HTM
- [11] *How Solar Panel Arrays and Photovoltaics Work*, Cuyahoga Country Fairgrounds – Wind Turbine – Renewable energy project, [cit. 3.2.2010], Dostupné z URL: http://www.cuyfair.com/energy_how_solar_works.php
- [12] Huff, A. M., *MEMS Thin Film Deposition Processes*, Virginia: MEMS and Nanotechnology Exchange in Reston, MNX, [cit. 10.5.2010], Dostupné na URL: <http://www.mems-exchange.org/MEMS/processes/deposition.html>
- [13] *Infračervená spektrometrie*, Podklady pro laboratorní měření, Plzeň: Západočeská universita Plzeň, Department of the New technologies research centre, 2007, 30 stran, [cit. 7.3.2009] Dostupné z URL: http://ttp.zcu.cz/files/pdf/skripta_kap3_irspektrometrie.pdf
- [14] Kormunda, M., *Reaktivní naprašování – principy*, Seminář Naprašování 7.března 2008 - Rožnov pod Radhoštěm, Ústí nad Labem: Universita J. E. Purkyně, Katedra fyziky, 16 stran, [cit. 5.3.2009] Dostupné z URL: <http://phymatsci.webs.com/Prednasky/Kormunda%20-%20Reaktivni%20naprasovani.pdf>
- [15] Kosmák, F., *Historie Fotovoltaiky*, Fusion – tec, 3 strany, [cit. 6.4.2009], Dostupné z URL: http://fusion-tec.eu/doc/Historie_fotovoltaiiky.pdf
- [16] Kříž, A. a spol.,: *Tenké vrstvy*, Plzeň: Západočeská universita v Plzni, Katedra elektrotechniky, 2006, 41 stran (16-17), [cit. 3.2.2010] Dostupné z URL: http://www.ateam.zcu.cz/tenke_vrstvy_fel_1.pdf
- [17] Kučerová, B., *Yttrium*, Liberec: Gymnázium a SOŠPg Liberec, 9 stran, [cit. 19.10.2009], PPT dostupná z URL: d-prvky.howto.cz/prezentace/Y.ppt
- [18] Kusala, J., *Fotovoltaiický jev*, Solární energie - Součást vzdělávacího program SVĚT ENERGIE, [cit. 10.3.2010], Dostupné z URL: www.cez.cz/edee/content/microsites/solarni/f8.htm
- [19] Laboratoř molekulové spektroskopie, *Infračervená spektroskopie*, Praha: vysoká škola chemicko – technologická v Praze, s. 1 - 2, [cit. 5.3.2009], Dostupné z URL: <http://lms.vscht.cz/Zverze/Infrared.htm>

- [20] Libra, M., *Naprašování tenkých vrstev*, ELEKTRO, 2003, 3 strany, [cit. 10.1.2010], Dostupné z URL: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=25484
- [21] Markvart, T., Castaner, L., *Practical Handbook of Photovoltaics – Fundamental and Applications*, British Library Cataloguin in Publication data, 2003, 961 stran, s. 71 – 123, ISBN 1856173909, Dostupné internetové vydání na URL: http://www.google.com/books?id=gf6oN2HI3RYC&printsec=frontcover&dq=solar+cells+technology&lr=&hl=cs&source=gbs_similarbooks_s&cad=1#v=onepage&q=solar%20cells%20technology&f=false
- [22] Meissner, M., *Reaktivní magnetronové nanášení fotoaktivních vrstev TiO₂ a jejich vlastnosti*, Diplomová práce, Plzeň: Západočeská universita v Plzni, Katedra fyziky, 2007, strana 10 – 15.
- [23] *Optická měření*, Praha: ELFY – Měřicí a optické přístroje, 12 stran, 2008, [cit. 22.4.2009], Dostupné na URL: <http://www.merici-opticke-pristroje.cz/SystemSupport/FileStorage/a4fb4263-5152-4ea1-b91b-3406956bf5f1.pdf>
- [24] OPTIMUS s.r.o., *Encyklopedie CoJeCo – Lorentzova síla*, 2006, 1 strana, [cit. 8.4.2009], Dostupné z URL: http://www.cojeco.cz/index.php?detail=1&s_lang=2&id_desc=54530&title=Lorentzova%20s%C3%ADla
- [25] PETS.Inc, *What is PECVD?*, California: Plasma Equipmnet Technical Services Incorporated – Preston Avenue Livermore, 2000, 3 strany, [cit. 9.5.2010], Dostupné na URL: <http://www.plasmaequip.com/WHAT%20IS%20PECVD.pdf>
- [26] Procházka, J., *Reaktivní depozice Al₂O₃ vrstev duálním magnetronem*, Bakalářská práce, Plzeň: Západočeská universita v Plzni, Katedra fyziky, 2008, strana 9 – 12.
- [27] Sinica A.: *Spektrofotometrie ve viditelné oblasti*, Praha: Vysoká škola chemicko – technologická v Praze, s. 1 - 2, [cit. 6.3.2009], Dostupné z URL: www.vscht.cz/anl/lach1/5_Foto.pdf
- [28] Skácel, D., *Člověk a energie v souvislostech III*, Skacelsolar – future energy, [cit. 11.4.2010], Dostupné z URL: www.skacelsolar.cz/.../85/EntryID/6/Default.aspx
- [29] Solartec, *Jak měříme solární články*, Solartec Rožnov pod Radhoštěm, [cit. 13.2.2010], Dostupné z URL: <http://www.solartec.cz/cs/fv-systemy/o-fotovoltaice/mereni-clanku.html>

- [30] Strakoš, V., *Czochralského metoda tažení monokrystalu*, Přednášky - Materiály Výroba struktur a konstrukce prvků, Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2009, 113 stran.
- [31] Strakoš, V., *Termická oxidace monokrystalického křemíku*, Přednášky - Materiály Výroba struktur a konstrukce prvků, Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2010, 71 stran.
- [32] Toman, J., *FP5 – Měření parametrů solárních článků*, Návod k laboratornímu cvičení, Praha: České vysoké učení technické v Praze, Katedra fyziky, 8 stran, [cit. 7.1.2010], Dostupné z URL: http://departments.fsv.cvut.cz/k102/sites/default/files/k102/vyuka/predmety/soubory/Navod_FP_5.pdf
- [33] Ústav materialov a mechaniky strojov SAV, *Magnetronové naprašování*, 2006, [cit. 6.4.2009] Dostupné z URL: <http://www.umms.sav.sk/data/files/167.jpg>
- [34] Wikipedia, *Yttrium(III) oxide*, [cit. 9.12.2009], Dostupné z URL: [http://en.wikipedia.org/wiki/Yttrium\(III\)_oxide](http://en.wikipedia.org/wiki/Yttrium(III)_oxide)
- [35] Wikipedia, *Fotoelektrický jev*, [cit. 12.1.2010], Dostupné na URL: http://cs.wikipedia.org/wiki/Fotoelektrický_jev
- [36] Wikipedia, *Yttrium*, [cit. 17.11.2009], Dostupné z URL: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Yttrium>
- [37] Zmeškal O., Veselý M., Komendová B.: *Fyzikální a chemická podstata záznamu barevných obrazů*, Brno: Fakulta Chemická Vysoké učení technické v Brně, 2002, s. 3 - 4, [cit. 6.3.2009], Dostupné z URL: http://www.fch.vutbr.cz/lectures/imagesci/download/stud05_rozn02.pdf

Citace z praktické části

- [38] Lam S.K.H.: *The effects of the target in the sputter deposition of Y1Ba2Cu3O7-x thin films*, Physica C 370, 2002, 79 – 84, Dostupné z URL: http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6TVJ-45GWR80-2&_user=10&_coverDate=04%2F15%2F2002&_alid=911677362&_rdoc=2&_fmt=high&_orig=search&_cdi=5536&_sort=d&_docanchor=&view=c&_ct=20&_acct=C000050221&_version=1&_urlVersion=0&_userid=10&md5=e3807cc900bd34ff970a492dfd997811

- [39] Ostatnický, T., Elipsometrie nelineárních materiálů, Praha: Karlova universita v Praze, Katedra chemické fyziky a optiky, 2007, [cit. 25.5.2010], Dostupné na URL: http://is.cuni.cz/studium/dipl_st/index.php?doo=detail&did=46748
- [40] Šamořil, T., *Srovnání spektroskopické elipsometrie a spektroskopické reflektometrie při určování hodnot tloušťek a konstant vybraných tenkých vrstev*, Bakalářská práce, Brno: Masarykova universita v Brně, Přírodovědecká fakulta, 2008, 52 stran, [cit. 25.5.2010], Dostupné na URL: http://is.muni.cz/th/139774/prif_b/BP.pdf

9 Seznam obrázků

Obr.1.1: Princip solárního článku [6].....	- 7 -
Obr.1.2: Příklad V-A charakteristiky solárního článku [1].....	- 7 -
Obr.1.3: Řez Monokrystalickým Si solárním článkem [31]	- 11 -
Obr.4.2: Znárodnění vektorů B, v a Lorentzovy síly F_L [24]	- 20 -
Obr.4.3: Hysterezní smyčka pro parciální tlak reaktivního plynu [26].....	- 21 -
Obr.4.4: Hysterezní smyčka pro depoziční rychlost [26]	- 22 -
Obr.4.5: Princip vzniku mikrooblouků [26].....	- 23 -
Obr.5.1: Znárodnění zářivých toků [27].....	- 24 -
Obr.5.2: Fotografie spektrofotometru SPECORD 210	- 26 -
Obr.5.3: Fotografie spektrometru FTIR Nicolet 380	- 28 -
Obr.5.4: Schéma Michelsonova interferometru [19]	- 29 -
Obr.5.5: Princip měření vzorku pomocí elipsometrie.....	- 30 -
Obr.6.1: Fotografie celé depoziční aparatury.....	- 31 -
Obr.6.2: Závislost reflektivity R na vlnové délce λ pro úhel natočení 40° , vzorky 1 a 2 ..-	33 -
Obr.6.3: Závislost reflektivity R na vlnové délce λ pro úhel natočení 40° , vzorky 3 a 4 ..-	33 -
Obr.6.4: Závislost reflektivity R na vlnové délce λ pro úhel natočení 40° , vzorky 5 a 6 ..-	34 -
Obr.6.5: Závislost reflektivity R na vlnové délce λ pro úhel natočení 40° , vzorky 8 a 9 ..-	34 -
Obr.6.6: Závislost reflektivity R na vlnové délce λ pro úhel natočení 20° , vzorky 1 a 2 ..-	35 -
Obr.6.7: Závislost reflektivity R na vlnové délce λ pro úhel natočení 20° , vzorky 3 a 4 ..-	35 -
Obr.6.8: Závislost reflektivity R na vlnové délce λ pro úhel natočení 20° , vzorky 5 a 6 ..-	36 -
Obr.6.9: Závislost reflektivity R na vlnové délce λ pro úhel natočení 40° , vzorek 1, 2 a 3 ..-	37 -

Obr.6.10: Detail naměřených charakteristik pro vzorek 3 a čistý Si substrát jako reference	- 38 -
Obr.6.11: Naměřené charakteristiky pro vzorek 3 a čistý Si substrát jako reference v jednotném měřítku	- 38 -
Obr.6.12: Barevný gradient Yttrium oxidu	- 40 -
Obr.6.13: Závislost indexu lomu vzorku YO7 na vlnové délce.....	- 40 -
Obr.6.14: Závislost indexu lomu vzorku YO8 na vlnové délce.....	- 41 -
Obr.6.15: Závislost indexu lomu vzorku YO9 na vlnové délce.....	- 41 -
Obr.6.16: Závislost indexu lomu vzorku YO10 na vlnové délce.....	- 42 -
Obr.6.17: Závislost indexu lomu vzorku YO11 na vlnové délce.....	- 42 -
Obr.6.18: Závislost indexu lomu vzorku YO12 na vlnové délce.....	- 43 -
Obr.6.19: Závislost indexu lomu všech vzorků na vlnové délce	- 43 -
Obr.6.20: Závislost extinkčního koeficientu vzorků YO7 a YO8 na vlnové délce ...	- 44 -
Obr.6.21: Závislost extinkčního koeficientu vzorků YO9 a YO10 na vlnové délce .	- 44 -
Obr.6.22: Závislost extinkčního koeficientu vzorků YO11 a YO12 na vlnové délce	- 45 -