

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

Edice Habilitační a inaugurační spisy, sv. 254

ISSN 1213-418X

Jiří Spousta

**SVĚTLO CHARAKTERIZUJÍCÍ
(OD BODU K PLOŠE
A ZPĚT K NANOSTRUKTURÁM)**

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta strojního inženýrství

Doc. RNDr. Jiří Spousta, Ph.D.

SVĚTLO CHARAKTERIZUJÍCÍ
(od bodu k ploše a zpět k nanostrukturám)

LIGHT — A TOOL FOR PROBING
(from a point to an area and back to nanostructures)

TEZE PŘEDNÁŠKY K PROFESORSKÉMU JMENOVACÍMU ŘÍZENÍ
V OBORU
„APLIKOVANÁ FYZIKA“



BRNO 2008

KLÍČOVÁ SLOVA

IBAD, in situ analýza, zobrazovací reflektometrie, Kerrův jev, GMR, nanostruktury

KEYWORDS

IBAD, in situ analysis, imaging reflectometry, MOKE, GMR, nanostructures

© Jíří Spousta, 2008

ISBN 978-80-214-3588-9

ISSN 1213-418X

OBSAH

1	ÚVOD	5
2	STANOVENÍ PARAMETRŮ TENKÝCH VRSTEV: OD BODU K PLOŠE PŘI <i>in situ</i> A <i>ex situ</i> MĚŘENÍCH	7
2.1	Zobrazovací <i>in situ</i> reflektometrie: nástroj ke studiu optických vlastností tenkých vrstev . . .	8
2.2	<i>In situ</i> měření spektrální odrazivosti v jednom bodě vzorku	11
2.3	<i>In situ</i> měření spektrální odrazivosti na ploše vzorku	11
3	MAGNETOOPTICKÝ KERRŮV JEV: NÁSTROJ KE STUDIU MAGNETICKÝCH VLASTNOSTÍ TENKÝCH VRSTEV	16
3.1	Měření longitudinálního Kerrova jevu v jednom bodě povrchu	18
3.2	Měření longitudinálního Kerrova jevu na ploše vzorku: zobrazování magnetických domén .	19
3.3	Příprava magnetických nanostruktur pomocí selektivního růstu a jejich vizualizace	21
4	PEDAGOGICKÁ ČINNOST	23
4.1	Tvorba systému studijních opor výuky fyziky: <i>e-learning</i>	23
4.2	Výuka v předmětech oborového studia <i>Fyzikální inženýrství</i>	23
5	ZÁVĚR	24
	PODĚKOVÁNÍ	25
	LITERATURA	25
	PŘEDSTAVENÍ AUTORA	28
	ABSTRACT	30

1 ÚVOD

Budiž světlo! Pod tímto slovním spojením si jen málokdo z nás nic nepředstaví. Jsme vděční všem, kteří přinášejí do našich životů světlo, díky světlu vidíme věci, které jsou jinak skryté ve tmě. Světlo pomáhalo našim prapředkům zbavit se strachu a připravit si potravu, světlo nás provází od našeho zrození — spatřit světlo světa může abstraktní teorie i předmět neživý. Světlo se pro nás stává každodenní samozřejmostí, o níž mnohdy neuvažujeme jako o daru, o který můžeme přijít. V přeneseném slova smyslu nám světlo umožňuje chápat nepoznané — vnést světlo do nějaké záležitosti znamená lépe ji pochopit. Bez fotosyntézy by na Zemi neexistoval život v podobě, jakou dnes známe. Dárce tohoto života — světlo — se ale může lehce stát ničitelem všeho živého jako důsledek zneužití moderní vědy. Co je světlo a jak je lze využít k poznání našeho světa zaměstnávalo a stále zaměstnává mnohé skvělé mozky lidstva. Stav poznání světa „odráží“ celkový stav poznání ve společnosti — naše poznávání okolního světa je podobno odrazům světla od stále novějších a novějších věcí kolem nás. Od prehistorických dob kralování ohně se lidstvo posouvalo k dnešnímu stavu vědění obtížně, ale téměř vždy byl pokrok spojen s vývojem nových citlivějších detektorů. Od prostého lidského oka se tak dostáváme k oku „ozbrojenému“ první optikou umožňující detailnější sledování záření hvězd a pohybu planet, jež vedlo ve svých důsledcích ke vzniku nových fyzikálních teorií, zpřesňujících nebo zcela bořících ty předešlé. Newton by bez výsledků dosažených při měření pohybů planet, o nichž nám přináší informace světlo, sotva dospěl ke svým zákonům, které tak „osvětlily“ celý svět, řečeno slovy básníka A. Popa¹: *Nature and Nature's laws laid in night, God said let Newton be and all was light*. Bez dalšího „vrhnutí světla“ na stáčení poloos eliptické dráhy Merkuru by možná nespátřila „světlo světa“ obecná teorie relativity Alberta Einsteina, kterého (v návaznosti na A. Popa) obviňuje J. C. Squire v epigramu XX. století: *It did not last: the Devil howling: „Ho, Let Einstein be“*, restored the status quo. Není se čemu divit — v době triumfu Maxwellovy teorie popisující všechny tehdy známé interakce světla s látkou a jeho šíření pomocí čtyř rovnic, které „nade vši pochybnost“ činí ze světla vlnění, přichází A. Einstein s hypotézou interakce záření s hmotou pomocí světelných kvant². Tato práce, která si nekladla za cíl zpochybnit vlnový charakter světla, sloužila jako inspirace pro (zpočátku myšlenkové) propojení světla a hmoty. Pro mnohé vědce nebylo vůbec snadné přijmout obecně akceptovaný vlnově-částicový dualismus světla. Dnes je tento koncept brán jako fakt i studenty středních škol (ovšem mnohdy bez hlubšího porozumění). V knize *Waves and Grains – reflections on light and learning* se světoznámý fyzik Mark P. Silverman³ [1] za-

¹Alexander Pope (1688–1744) bývá považován za největšího anglického básníka počátku osmnáctého století.

²Albert Einstein: *Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt*, Ann. Phys. 17 (1905) 132.

³Je profesorem fyziky na Trinity College, kde působil svého času Isaac Newton.

bývá popisem základního konceptu interakce světla s látkou, který jej vede k hlubším úvahám o smyslu bádání. Popisuje svůj „kacírský“ experiment ve výuce fyziky, který pomáhá učitelům a tvůrčím pracovníkům zaujmout studenty a motivovat je ke studiu. Zavádí pojem *self-directed learning*, který se v mnohém inspiroje dětským způsobem nazírání na svět. Základem tohoto přístupu je uznání zvědavosti a zvědavosti za hnací motor touhy po poznání. V rámci tohoto konceptu se hlavní rolí učitele stává kladení podněcujících otázek studentům, kteří se při hledání svých vlastních odpovědí mohou dopouštět chyb, které však tvoří součást učení a neměly by být trestány. Laboratoř se stává místem spíše volného bádání a vzrušujícího objevování než striktního dodržování zaběhnutých „kuchařských“ receptů. Vědecké návyky a dovednosti jsou rozvíjeny projektovou činností, která spočívá převážně v práci s literárními zdroji, provádění experimentů a modelování reálných jevů. Důraz je kladen rovněž na zřetelné formulování dosažených výsledků (písemnou či ústní formou). Hodnocení by mělo být založeno spíše na celkové práci studenta než na základě výsledků jednoho výstupního testu. Tyto Silvermanovy zásady tvoří spíše rámec a způsob vedení výuky než striktní pravidla, jimiž by se měla řídit. Některé z výše uvedených zásad lze rozeznat ve způsobu vedení výuky a přístupu ke studentům oboru *Fyzikální inženýrství*. Aby učitel lépe poznal těžkosti, se kterými bývá jeho student téměř každodenně konfrontován, musí se sám čas od času dostat do role studenta, kdy mu mnoho věcí není jasných. Je velmi cenné, zabývá-li se vysokoškolský učitel vědeckým výzkumem se stejným zápalem, s jakým studuje, zkoumá a vyhodnocuje svět dítě. Na Ústavu fyzikálního inženýrství FSI VUT v Brně se tvůrčí pracovník může vžít do role studenta vzdělávajícího se (s nadšením dítěte) po celý život například studiem příprav a vlastností tenkých vrstev.

Předložená práce s názvem *Světlo charakterizující (od bodu k ploše a zpět k nanostrukturám)* pojednává o využití světla jako nástroje ke zkoumání vlastností hmoty. Variabilnost užití světelného svazku pokrývá značný interval rozměrů vzorku — světelná sonda může podávat informace o vlastnostech z jednoho „makro“ bodu (tj. lokálně), je možné ji použít ke zjišťování vlastností tenkých vrstev z celého povrchu vzorku, nebo naopak z oblastí rozměrů tak malých, že pro ně můžeme použít slovo nanostruktury. Rovněž rozsah fyzikálních vlastností, které můžeme pomocí světelné sondy určovat, je překvapivě široký — pomocí světla můžeme zjistit magnetické vlastnosti i ultratenkých vrstev, optické vlastnosti systémů vrstev, ale například i rozměry nanostruktur.

Sondou použitou k získání těchto informací o vzorku (tenké vrstvě, nanostruktuře) bude ve většině dále popsáných případů světlo. Světlo, díky němuž vidíme věci, které jsou jinak skryté ve tmě.

2 STANOVENÍ PARAMETRŮ TENKÝCH VRSTEV: OD BODU K PLOŠE PŘI *in situ* A *ex situ* MĚŘENÍCH

Technologie příprav tenkých vrstev procházejí v současné době nebyvalým rozvojem. Je to způsobeno především neustále narůstajícími požadavky převážně elektrotechnického průmyslu na výrobu elektronických komponent (integrovaných obvodů) stále menších rozměrů. Potřeba větší hustoty záznamu základních jednotek informace vede k rozvoji nanotechnologií, který bude zdárně pokračovat, pokud budeme schopni zajistit reprodukovatelný přechod od velkých rozměrů k velmi malým, tedy od našeho „makro“světa k „nano“světu. Proto ani v době „nadvlády“ magického slova „nano“ nepozbývá svého významu další rozvoj fyziky příprav struktur o laterálních rozměrech v oboru mikrometrů a tlouštěk desítek nanometrů a menších. Co se však děje bez rozdílu v „nano“ i „mezo“ světech a technologiích, je snaha o dokonalé zvládnutí reprodukovatelné přípravy struktur požadovaných vlastností. Značná pozornost je věnována nejen studiu přípravy a analýze výsledných fyzikálních vlastností tenkých vrstev a struktur, ale i vývoji metod, které umožňují vyhodnocovat některé důležité fyzikální vlastnosti výsledného produktu přímo v průběhu jeho výroby, tedy *in situ*. Pokud tuto možnost máme, můžeme nastavovat depoziční podmínky (parametry procesu) vhodným způsobem tak, aby bylo dosaženo požadovaného výsledku, a to s vysokým stupněm reprodukovatelnosti.

Na Ústavu fyzikálního inženýrství FSI VUT v Brně (ÚFI) je od počátku devadesátých let minulého století soustavně rozvíjeno vybavení laboratoře ke studiu povrchů a tenkých vrstev. V současné době lze zaměření laboratoře rozdělit do dvou hlavních směrů: příprava tenkovrstevnatých systémů a nízkodimenzionálních struktur a rozvoj metod analýz (*in situ*, *ex situ*) vlastností vzniklých produktů. Technologie přípravy vrstev a (nano)struktur je uskutečňována ve vysokovakuové depoziční aparatuře založené na metodě IBAD (*Ion Beam Assisted Deposition*) [2] (viz obr. 2.1) a v komplexu navzájem propojených UHV (*Ultra High Vacuum*) komor [3], kde je možno deponovat ultratenké vrstvy (případně modifikovat vlastnosti povrchu). V tomto komplexu, který je schematicky znázorněn na obr. 2.2, jsou vytvářeny ultratenké vrstvy pomocí atomárně svazkového napařování, případně přímou depozicí hypertermálních iontových svazků. K němu je připojena celá řada analytických technik, např. SIMS (*Secondary Ion Mass Spectroscopy*) [4], TOF–LEIS (*Time of Flight Low Energy Ion Spectroscopy*) [5], XPS (*X-ray Photoelectron Spectroscopy*) [6], STM (*Scanning Tunneling Microscopy*) [7] a elipsometrie [8], které zajišťují potřebnou zpětnou vazbu k řízení technologického procesu, aniž by vzorek byl vystaven degradujícímu vlivu prostředí mimo UHV aparaturu. Výběr výše citovaných převážně studentských prací není náhodný — odpovídá významu jejich zapojení při řešení vědeckých úkolů v rámci ÚFI.

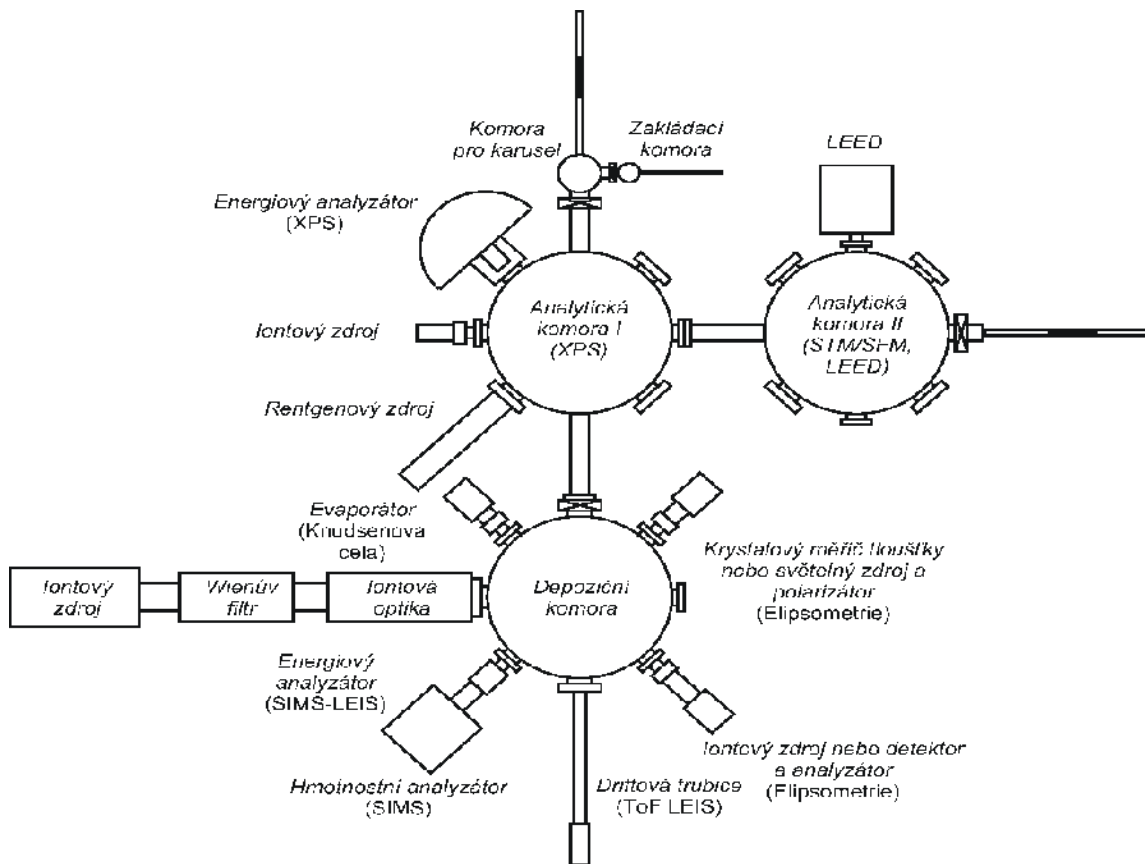


Obr. 2.1. Vizualizace 3D konstrukčního modelu HV komory k depozici tenkých vrstev a modifikaci povrchů pomocí metody IBAD [2]. Širokosvazkový iontový zdroj (horní část) je bombardován terč (umístěn na trojúhelníkovém nosiči uprostřed komory) například ionty Ar^+ . Atomy terče vylétávají směrem k substrátu (vlevo) a utvářejí na něm vrstvu. Vlastnosti vrstvy mohou být modifikovány ionty z bočního (vpravo) asistujícího zdroje. Terče mohou být měněny v průběhu depozice pootočením nosiče o 120° .

Zmiňované spektrum dostupných *in situ* analytických technik bylo v posledních letech rozšířeno o další dvě optické metody. První je založena na *in situ* sledování relativní změny spektrální odrazivosti vzorku v průběhu růstu (příp. leptání) tenké vrstvy a druhá metoda slouží k *ex situ* měření magnetických vlastností velmi tenkých vrstev vyhodnocením magnetooptického Kerrova jevu.

2.1 ZOBRAZOVACÍ *in situ* REFLEKTOMETRIE: NÁSTROJ KE STUDIU OPTICKÝCH VLASTNOSTÍ TENKÝCH VRSTEV

Snaha o zlepšení řízení depozičního procesu stála u zrodu unikátního vědeckého přístroje, jehož funkce je založena na principu autorem nově vyvinuté metody zobrazovací *in situ* reflektometrie. Základní fyzikální myšlenka tohoto inženýrského díla je založena na staré úvaze: použít dopadající světlo jako sondu k určování optických parametrů tenkých vrstev. Její realizaci můžeme najít téměř v každé technologické lince na výrobu tenkovrstevnatých systémů. Snad nejhojněji užívanou metodou je metoda elipsometrická [8], která slouží například k přesnému určení tloušťky termického oxidu křemíku užívaného v polovodičovém průmyslu. Je založena na stanovení změny polarizace světla po odrazu na vzorku, případně po jeho průchodu. Nehodí se však k plošnému stanovení optických parametrů tenkých vrstev. Jako vhodnější se jeví optická metoda založená na principu porovnání intenzity světla odraženého od vzorku s intenzitou světla na vzorek dopadajícího, tzv. reflektometrie. Při její realizaci je třeba



Obr. 2.2. Schéma komplexu UHV komor k depozici ultratenkých vrstev, modifikaci povrchů a výrobě nanostruktur [3].

zajistit kolmý dopad světla, jehož vlnová délka může pokrývat široký spektrální obor. Optické parametry jedné tenké vrstvy na známém substrátu lze pak určit z odrazivosti tohoto systému¹. Odrazivost (tj. veličina, kterou můžeme experimentálně stanovit) souvisí s Fresnelovými koeficienty [9]:

$$\tilde{r}^{\text{II}} = \frac{\tilde{r}^{\text{I},12} + \tilde{r}^{\text{I},23} \exp(-i2\beta)}{1 + \tilde{r}^{\text{I},12} \tilde{r}^{\text{I},23} \exp(-i2\beta)} \quad (2.1)$$

kde $\tilde{r}^{\text{I},12}$ a $\tilde{r}^{\text{I},23}$ jsou Fresnelovy koeficienty pro jedno rozhraní (12: vzduch – vrstva, 23: vrstva – substrát). Při kolmém dopadu platí:

$$\tilde{r}^{\text{I},12} = \frac{\tilde{N}_2 - n_1}{\tilde{N}_2 + n_1} \quad , \quad \tilde{r}^{\text{I},23} = \frac{\tilde{N}_3 - \tilde{N}_2}{\tilde{N}_3 + \tilde{N}_2} \quad (2.2)$$

kde n_1 je index lomu vzduchu a \tilde{N}_2 je *komplexní index lomu* vrstvy definovaný jako

$$\tilde{N}_2(\lambda) = n_2(\lambda) - ik_2(\lambda). \quad (2.3)$$

¹Tento systém představuje dvě rozhraní: první mezi vzduchem a vrstvou, druhé mezi vrstvou a substrátem. Odtud značení II v exponentu.

Zde $n_2(\lambda)$ představuje *index lomu* a $k_2(\lambda)$ *index absorpce (extinkční koeficient)* vrstvy pro dané vlnové délky λ dopadajícího světla. Obdobně \tilde{N}_3 je komplexní index lomu známého substrátu, kterým bývá zpravidla Si. Podrobný postup odvození Fresnelových koeficientů je uveden např. v [10].

V rovnici (2.1) se vyskytuje rovněž interferenční člen odpovídající fázovému posuvu vln odražených od rozhraní mezi vzduchem a vrstvou a od rozhraní mezi vrstvou a substrátem:

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} \tilde{N}_2 d, \quad (2.4)$$

kde d je hledaná tloušťka vrstvy.

Odrazivost R je definována jako poměr intenzity světla odraženého a světla dopadajícího. Pro odrazivost v případě kolmého dopadu světla platí:

$$R = \tilde{r}\tilde{r}^* = |\tilde{r}|^2. \quad (2.5)$$

Z rovnic (2.4) a (2.5) pro optické parametry je zřejmé, že odrazivost systému jedné absorbující vrstvy tloušťky d na absorbujícím substrátu je transcendentní funkcí proměnných \tilde{N}_2 , d a optických parametrů substrátu, tj. \tilde{N}_3 . Pro zmíněný systém tak platí obecně známá teoretická závislost:

$$R = R(n_1, \tilde{N}_2(\lambda), d, \tilde{N}_3(\lambda)). \quad (2.6)$$

Z výše uvedených vztahů je patrné, že zmiňované rovnice nelze řešit analyticky. K určení optických parametrů, které jsou navíc podle rovnice (2.3) funkcí vlnové délky dopadajícího světla, se tedy užívají počítače, které v současné době dosahovaným výkonem zaručují rychlý průběh simulačních výpočtů teoretických hodnot odrazivosti R^{teor} . Do funkční závislosti rovnice (2.6) dosadíme tzv. „startovací“ vektor parametrů a minimalizujeme sumu čtverců odchylek teoretických a experimentálních hodnot fitováním [11]. Abychom mohli vyhodnotit naměřená data spektrálních odrazivosti $R^{\text{exp}}(\lambda)$, bylo vyvinuto na ÚFI několik programů ([12]). Výchozí experimentálně měřitelnou veličinou je relativní odrazivost $R^{\text{rel,vz}}(\lambda)$ vzorku s vrstvou. Absolutní odrazivost $R^{\text{exp}}(\lambda)$ vzorku s vrstvou určíme porovnáním s referenčním měřením známého vzorku (zpravidla se jedná o křemíkový substrát) $R^{\text{rel,Si}}(\lambda)$ podle vztahu:

$$R^{\text{exp}}(\lambda) = \frac{R^{\text{rel,vz}}(\lambda)}{R^{\text{rel,Si}}(\lambda)} R^{\text{tab,Si}}(\lambda) = \frac{I^{\text{vz}}(\lambda)}{I^{\text{Si}}(\lambda)} R^{\text{tab,Si}}(\lambda), \quad (2.7)$$

kde $I^{\text{vz}}(\lambda)$, respektive $I^{\text{Si}}(\lambda)$, jsou intenzity světla po odrazu od neznámého vzorku (případně od referenčního vzorku Si) a $R^{\text{tab,Si}}(\lambda)$ je tabelovaná absolutní odrazivost čistého křemíku (viz např. [13]). Pokud stanovujeme absolutní odrazivosti *ex situ*, je důležité (a někdy ne zrovna triviální) zajistit velmi přesné a reprodukovatelné výměny vzorku s vrstvou za vzorek referenční. Tento problém se projevuje ještě výrazněji

při plošných měřeních pomocí snímkování povrchu CCD kamerou, při kterých požadujeme vysokou laterální rozlišovací schopnost, řádově v desítkách mikrometrů. Při měření *in situ* vzorkem nepohybujeme, neznámá zkoumaná vrstva roste na známém substrátu, který je původním referenčním povrchem².

2.2 *In situ* MĚŘENÍ SPEKTRÁLNÍ ODRAZIVOSTI V JEDNOM BODĚ VZORKU

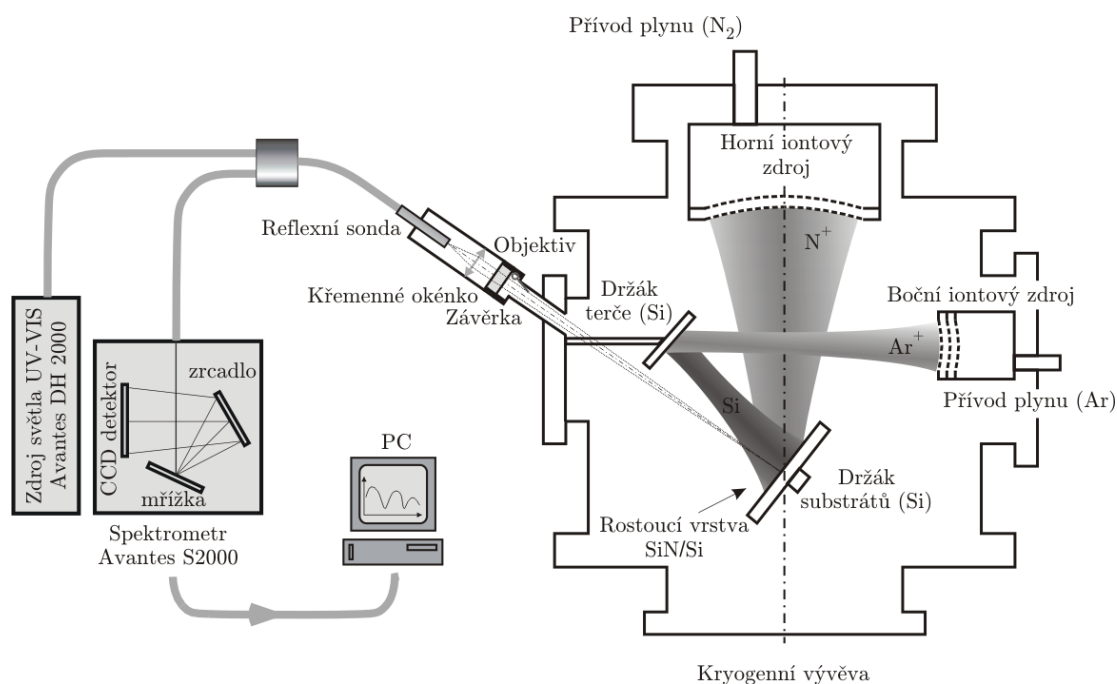
Vývoj nové metody zobrazovací *in situ* reflektometrie předpokládal dokonalé zvládnutí stanovení hodnot spektrální odrazivosti tedy $R^{\text{exp}}(\lambda)$ v jednom bodě vzorku v průběhu jeho přípravy. Proto byl týmem autora navržen, vyvinut a na ÚFI zkonstruován v rámci řešení projektu [14] bodový *in situ* reflektometr. Jádrem zmíněného optického zařízení je tzv. reflexní sonda³ ve spojení s duálním spektrofotometrem OceanOptics. Vhodnou optickou soustavou je vzorek osvětlen UV-VIS světlem ze šesti osvětlovacích vláken sondy, zatímco centrálním vláknem je snímáno světlo odražené od vzorku [15]. Tak lze získat *in situ* spektrální odrazivost systému tenká vrstva–substrát v závislosti na čase (tj. na tloušťce rostoucí, případně leptané vrstvy) v průběhu depozice v jednom „makro“ bodě (o průměru cca 2 až 3 mm) povrchu vzorku ([16]). Pomocí tohoto zařízení byly stanoveny *in situ* optické parametry SiN vrstev na substrátu Si v průběhu několika 60 minutových depozic, lišících se depozičními podmínkami. Schéma tohoto optického zařízení s konfigurací připojení k depoziční aparatuře IBAD [2] je na obr. 2.3. Na obr. 2.4 je pak uveden příklad experimentálně zjištěných spektrálních závislostí odrazivosti $R^{\text{exp}}(\lambda)$ (viz rovnice (2.7)) v jednom bodě vzorku vrstvy SiN na Si v různých okamžicích jeho přípravy. Z průběhu křivek je zřejmá změna odrazivosti v důsledku změny (nárůstu) tloušťky tenké vrstvy s časem depozice. Pomocí fitování lze stanovit pro každou z křivek optické parametry odpovídající různým časům depozice a vyhodnotit například závislost depoziční rychlosti na čase, viz [16]. Překvapivě se nejednalo o konstantní hodnotu — pro počátek depozice byla charakteristická depoziční rychlost vyšší než u časů pokročilejších.

2.3 *In situ* MĚŘENÍ SPEKTRÁLNÍ ODRAZIVOSTI NA PLOŠE VZORKU

Nároky technologických postupů na sledování plošné homogenity optických parametrů tenkých vrstev motivují týmy vědců a techniků k vývoji a zavádění nových a stále dokonalejších analytických metod. Na ÚFI byl pod vedením autora v rámci řešení dvou projektů GAČR ([14] a [17]) vyvinut unikátní přístroj (viz obrázek 2.5), který umožňuje měřit mapy odrazivosti na ploše vzorku o průměru 15 až 20 mm, aniž by se světelná sonda nad vzorkem pohybovala nebo se naopak pod sondujícím svazkem muselo pohybovat vzorkem.

²V případě užití Si substrátu se jedná o funkci $R^{\text{tab,Si}}(\lambda)$.

³Reflexní sonda Avantes FCR-7-UV-200-2.



Obr. 2.3. Schéma depoziční aparatury IBAD s připojeným bodovým *in situ* reflektometrem. Konfigurace zařízení byla oproti situaci znázorněné na obr. 2.1 pozměněna: došlo k záměně funkcí horního a bočního zdroje. Boční zdroj nyní slouží k rozprašování křemíkového terče (ionty Ar^+). Atomy Si „dosedají“ na substrát (rovněž Si) a vytvářejí vrstvu, jejíž vlastnosti jsou modifikovány bombardujícími ionty N_2^+ z horního zdroje — vzniká tak vrstva SiN na Si. Na rostoucí vrstvu dopadá kolmo svazek z reflexní sondy a je měřena relativní změna spektrální odrazivosti systému substrát–tenká vrstva v jednom bodě vzorku [16].

Ze zdroje světla (halogenová výbojka) je světlo fokusováno v kondenzoru na vstupní štěrbinu monochromátoru⁴. Z monochromátoru je pak světlo o různých „kvazi“ diskrétních vlnových délkách⁵ vyvedeno pomocí speciálního svazku optických vláken k osvětlovacímu prvku, který umožňuje rovnoměrně osvětlit vzorek v depoziční komoře po odrazu svazku prvním děličem a následným průchodem vakuovým okénkem do komory. Na povrch vzorku je nasměrováno kulové odrazné zrcadlo, které odražené světlo z povrchu vzorku (prošlé opět prvním a následně i druhým děličem) odrazí a po opětovném odrazu od druhého děliče zobrazí povrch vzorku na čip CCD kamery.

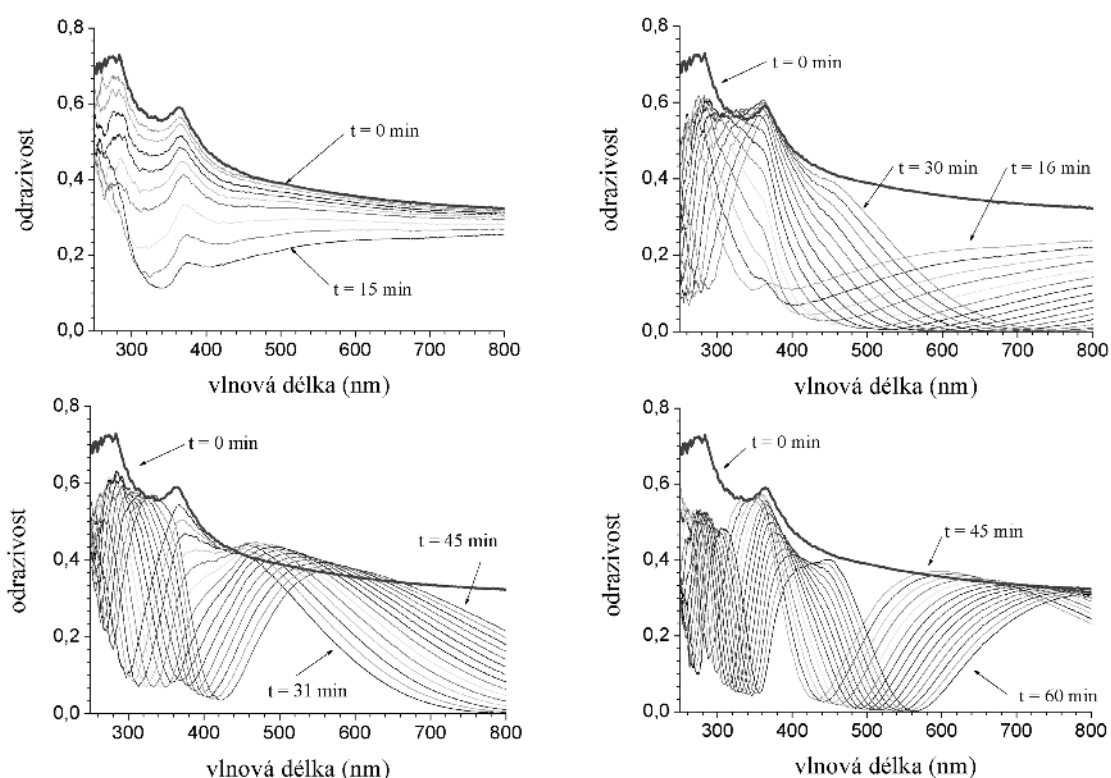
Určení spekter absolutní plošné odrazivosti: stanovení „map“ odrazivosti

Výstupem měření zobrazovacím *in situ* reflektometrem je série snímků z CCD kamery povrchu vzorku v bodech (x, y) osvětlené plochy. Dané vlnové délce λ_i v každém čase procesu přípravy či leptání vrstvy tak odpovídá trojice snímků⁶. Snímek referenčního

⁴Firma Oriel, typ Cornerstone 150, počítačem lze vybírat požadovanou vlnovou délku světla.

⁵Zpravidla se jedná o 25 vlnových délek v rozsahu: (350 ± 5) nm, (360 ± 5) nm až (600 ± 5) nm.

⁶Obdobně tomu bylo i v případě měření v jednom bodě, kdy bylo třeba stanovit tři veličiny k určení absolutní odrazivosti, viz rovnice (2.7).



Obr. 2.4. Experimentálně stanovené spektrální odrazivosti měřené bodovým *in situ* spektrometrem v průběhu depozice vrstvy SiN na Si v konfiguraci z obr. 2.3 v různých okamžicích její přípravy [16].

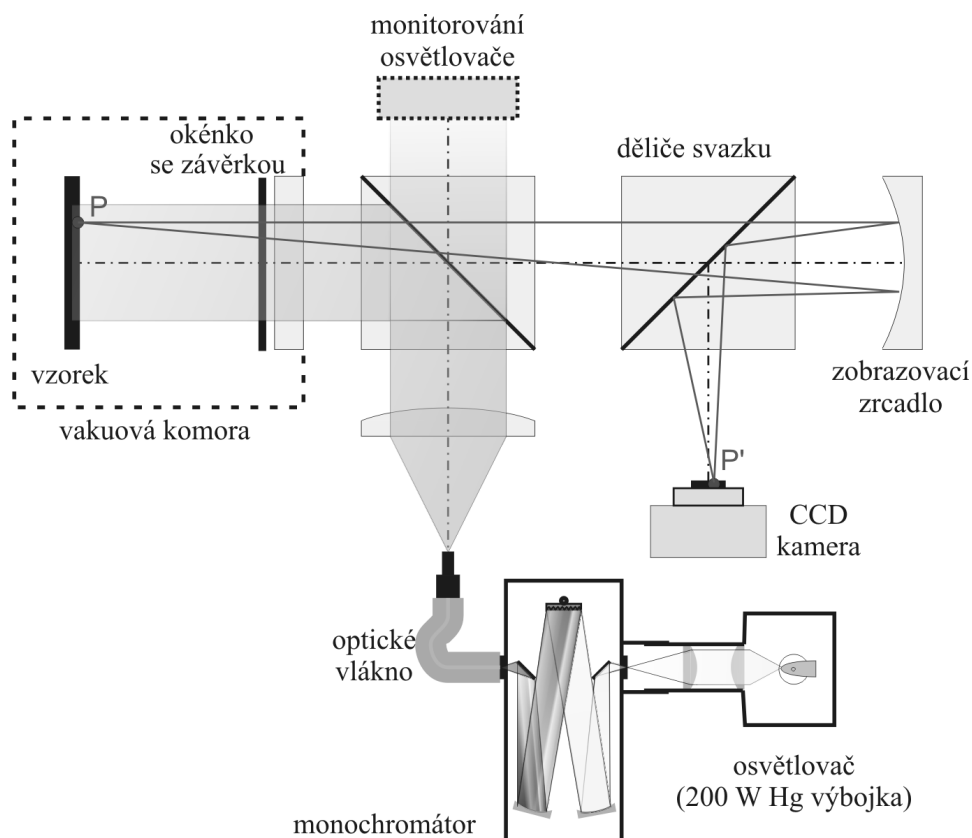
povrchu $I^{\text{ref}}(x, y)$, snímek světelného pozadí $I^{\text{poz}}(x, y)$ a snímek měřené tenké vrstvy $I^{\text{vz}}(x, y)$. Z této trojice snímků spočteme pro danou vlnovou délku λ_i mapu absolutní odrazivosti pomocí vztahu:

$$R(x, y, \lambda_i) = \frac{I^{\text{vz}}(x, y) - I^{\text{poz}}(x, y)}{I^{\text{ref}}(x, y) - I^{\text{poz}}(x, y)} R^{\text{tab, Si}}(x, y, \lambda_i), \quad (2.8)$$

kde $R^{\text{tab, Si}}(x, y, \lambda_i)$ je (známá) odrazivost v odpovídajících bodech plochy vzorku pro danou vlnovou délku dopadajícího světla před začátkem depozice (zpravidla Si) nebo leptání. Konstrukční návrh zobrazovacího *in situ* reflektometru je uveden na obr. 2.6.

Testování přístroje Testování funkce zobrazovacího *in situ* reflektometru bylo provedeno sérií měření plošné odrazivosti tenké vrstvy SiO_2 na Si. Byla *in situ* stanovena mapa odrazivostí vrstev připravených v aparatuře IBAD (obr. 2.3). Rovněž byl vyleptán a současně měřen schodovitý reliéf do vrstvy SiO_2 na Si substrátu. V tomto případě byla jako etalon pro určení absolutní odrazivosti užita původní struktura SiO_2 na Si známých (referenčních) vlastností.

Schodovitá struktura byla vyleptána kyselinou fluorovodíkovou. Mapy tloušťek (obrázek 2.7) byly vyhodnoceny s přesností 1 nm a s laterálním rozlišením 30 μm . Index

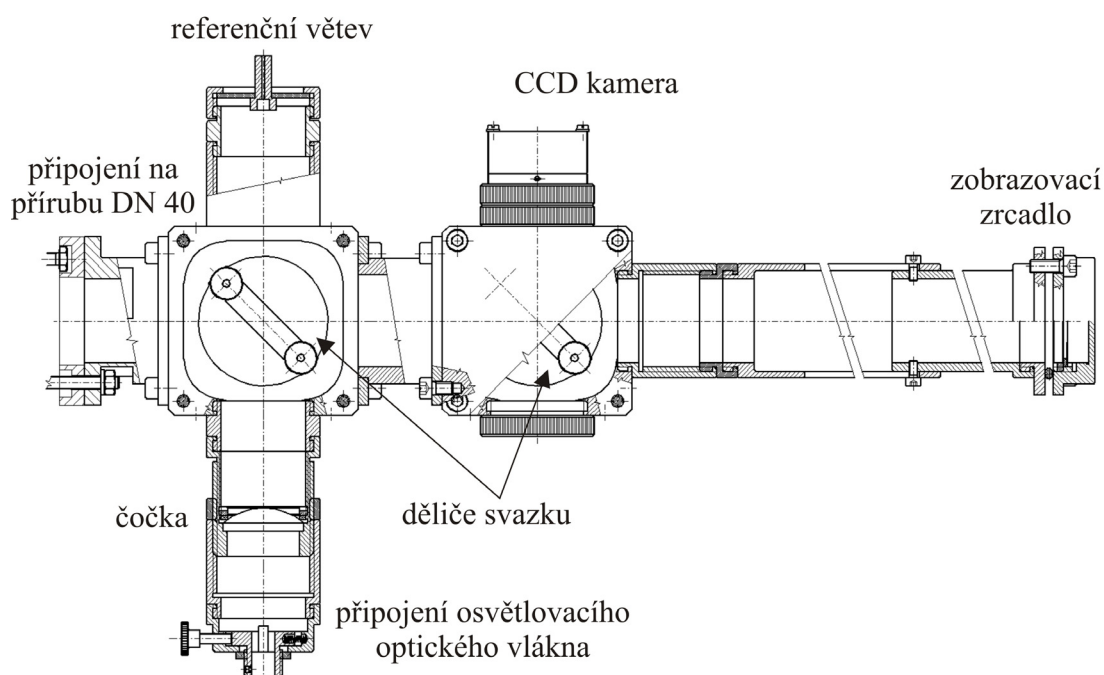


Obr. 2.5. Schéma zobrazovacího *in situ* reflektometru. Vzorek je postupně osvětlován monochromatickým světlem o různých vlnových délkách a bod P na povrchu vzorku je pomocí zobrazovacího zrcadla zobrazen do bodu P' . Mapa intenzit dopadajícího světla v odpovídajících vlnových délkách je poté zaznamenána CCD kamerou [18].

lomu byl ve fitovací proceduře pro jednotlivé vlnové délky zafixován podle vztahu $n = 1,44 + 7\,000/\lambda^2$, absorpce nebyla uvažována, tj. $k = 0$.

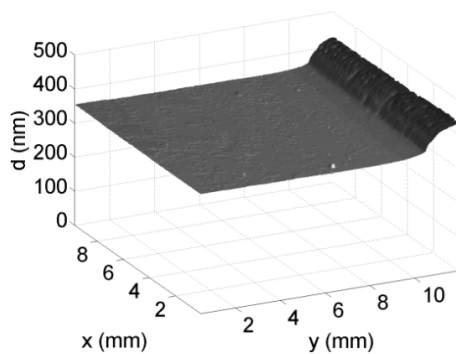
Z uvedených výsledků je patrné, že zobrazovací *in situ* reflektometr je vhodný k plošnému vyhodnocování optických parametrů tenkých vrstev a je možno jej použít pro efektivní kontrolu a řízení technologického procesu příprav tenkovrstevnatých slabě absorbujících systémů. O zařízení projevila zájem například firma ON Semiconductors (Rožnov p. Radhoštěm), která vyrábí pro polovodičový průmysl Si desky s vrstvou termického oxidu SiO_2 . Další vývoj tohoto přístroje může být dále spojen s rozvojem vyhodnocovacího softwaru.

Výše popsaná problematika vzniku a testování funkčnosti vědeckého přístroje — inženýrského díla tvořila náplň řešení dvou grantů GAČR ([17], [14]), jednoho doktorského studia ([12]) a tří diplomových úkolů ([19], [20], [21]). Dosažené výsledky byly publikované v mezinárodních časopisech ([11], [15] a [18]), v národních časopisech ([22],[23], [24] a [25]) a prezentované na několika mezinárodních a národních konferencích.

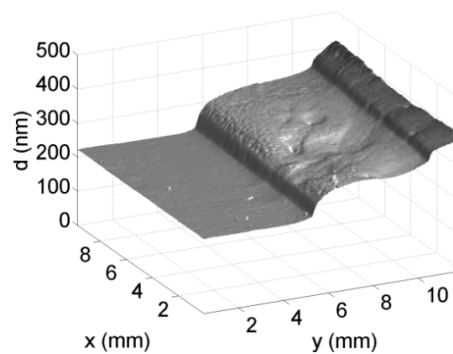


Obr. 2.6. Konstrukční provedení zobrazovacího *in situ* reflektometru [19].

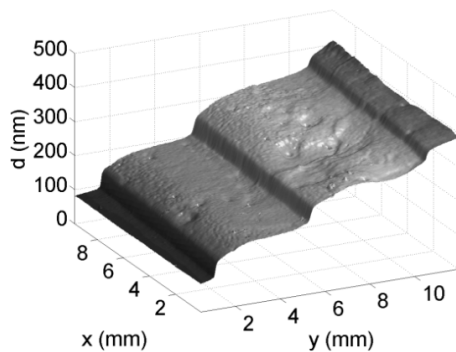
krok 1



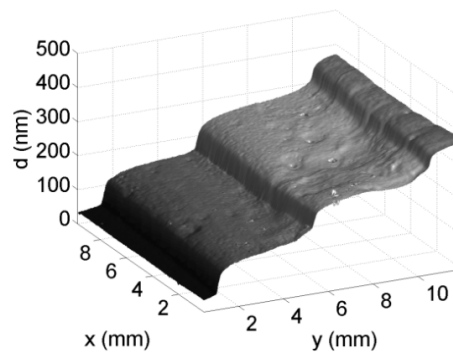
krok 2



krok 3



krok 4

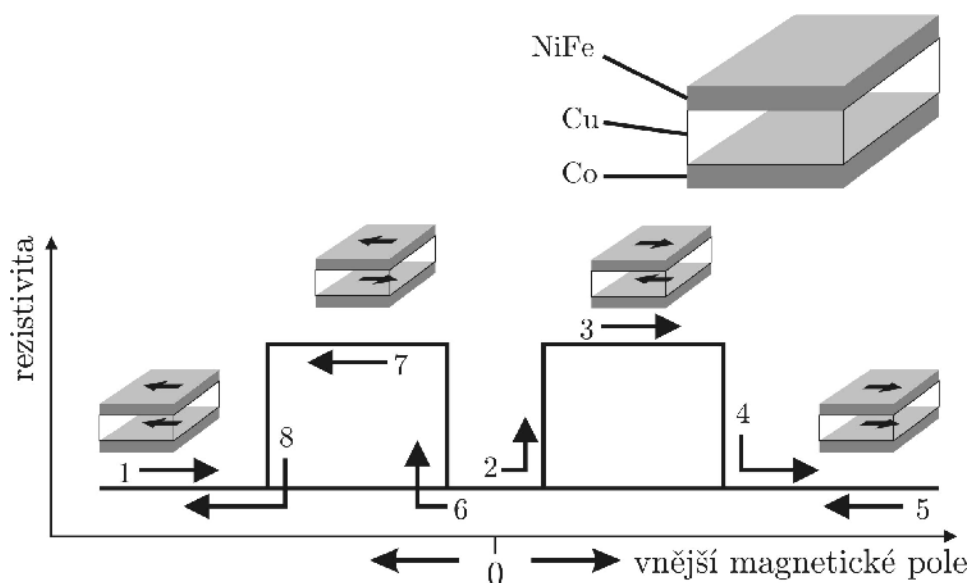


Obr. 2.7. Schodovitá struktura vyleptaná v tenké vrstvě SiO_2 na Si pomocí kyseliny fluorovodíkové. Kroky 1, 2, 3 a 4 byly vytvořeny leptáním příslušné části vzorku po různou dobu [18].

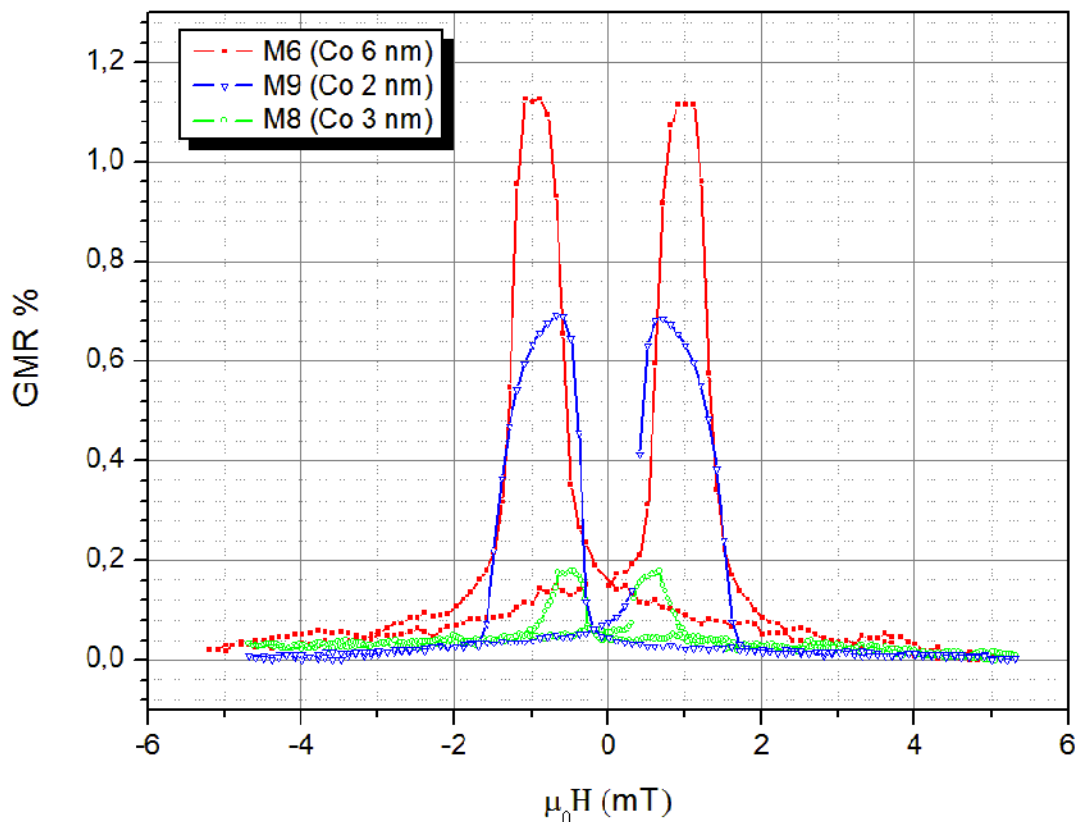
3 MAGNETOOPTICKÝ KERRŮV JEV: NÁSTROJ KE STUDIU MAGNETICKÝCH VLASTNOSTÍ TENKÝCH VRSTEV

V posledních desetiletích je možno sledovat obrovský nárůst hustoty magnetického záznamu, která je dána součinem počtu informačních bitů (na jednom centimetru záznamové stopy) a počtem záznamových stop (na jednom centimetru). V devadesátých letech minulého století dosahovala hustota záznamu setin gigabitů na cm^2 , v současnosti je v řádech jednotek až desítek gigabitů na cm^2 . Čemu vděčíme za takový nárůst? Obrovské magnetorezistivitě (*Giant Magnetoresistivity* – GMR), která byla objevena v roce 1988 týmy Petera Grünberga (Jülich) a Alberta Fertu (Paříž). V minulém roce (2007) získali oba vědci za svůj objev Nobelovu cenu za fyziku (viz [26]). Princip GMR spočívá v existenci rozdílného odporu magnetické vrstvy v závislosti na směru její výsledné magnetizace. Pokud navíc vytvoříme systém složený z vrstev magneticky „tvrdého“ (např. Co) a „měkkého“ materiálu (např. NiFe), odděleného materiálem nemagnetickým tzv. *spacerem*¹ (zpravidla Cu), můžeme získat elektronickou součástku nazývanou „spinový ventil“ [27]. Elektron se spinem souhlasně orientovaným s vektorem magnetizace \vec{M} na rozhraní „*spacer*–magnetická vrstva“ není na tomto rozhraní tolik rozptylován (usměrněnému proudu elektronů je tak kladen menší odpor), než je tomu v případě, kdy má spin orientován opačně. Proto odpor zmíněného systému vrstev závisí na vzájemné orientaci výsledných magnetizací v obou vrstvách — pro souhlasné směry vektoru \vec{M} je menší než v případě antiparalelní orientace. V závislosti na směru a velikosti vnějšího magnetického pole, kterým může být magnetická doména záznamového média, můžeme sledovat změny v rezistivitě (např. v obvodu s čtecí hlavičkou) podle schématu na obr. 3.1. Abychom mohli tyto závislosti měřit, musíme být schopni určit odpor tenké vrstvy, případně systémů magnetických tenkých vrstev, v závislosti na přiloženém vnějším magnetickém poli, kterému je vzorek vystaven. Jedno z měření takovéto závislosti je na obr. 3.2, na kterém jsou porovnány relativní změny magnetovodivosti různých systémů Co/Cu/NiFe, lišících se tloušťkou spodní vrstvy Co, připravených v aparatuře na obr. 2.1. Aby bylo možno studovat magnetické vlastnosti výše popsaných *spin valve* systémů, rozvíjí se na ÚFI optická metoda založená na měření tzv. magnetooptického Kerrova jevu. Kerrův jev můžeme pozorovat při odrazu lineárně polarizovaného světla od magnetického materiálu. Můžeme popsat jeho tři různé geometrické konfigurace (viz obr. 3.3) v závislosti na vzájemné poloze roviny dopadu a vektoru magnetizace látky.

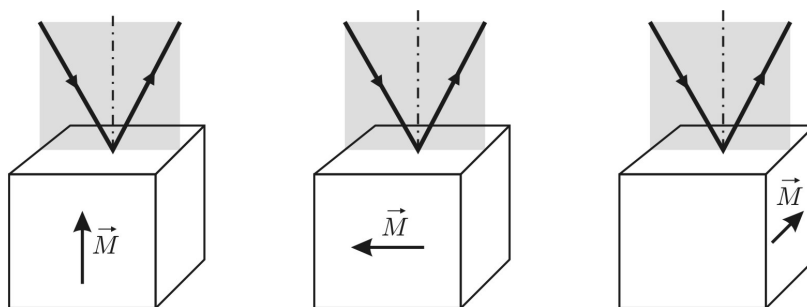
¹*Spacer* nesmí být příliš silný, aby neodstínil vzájemnou feromagnetickou vazbu mezi oběma magnetickými vrstvami. Jeho tloušťka se pohybuje řádově v jednotkách nanometrů.



Obr. 3.1. Schematické znázornění závislosti změny rezistivity například trojvrstvy Co/Cu/NiFe na vnějším přiloženém poli. Feromagnetická vrstva Co je magneticky „tvrdá“ a vrstva permaloy (NiFe) naopak měkká. Mezi oběma vrstvami existuje tzv. výměnná interakce, tj. směr magnetizace NiFe vrstvy „sleduje“ směr magnetizace ve vrstvě Co, pokud není působení vnějšího pole „silnější“. Převzato z [27].



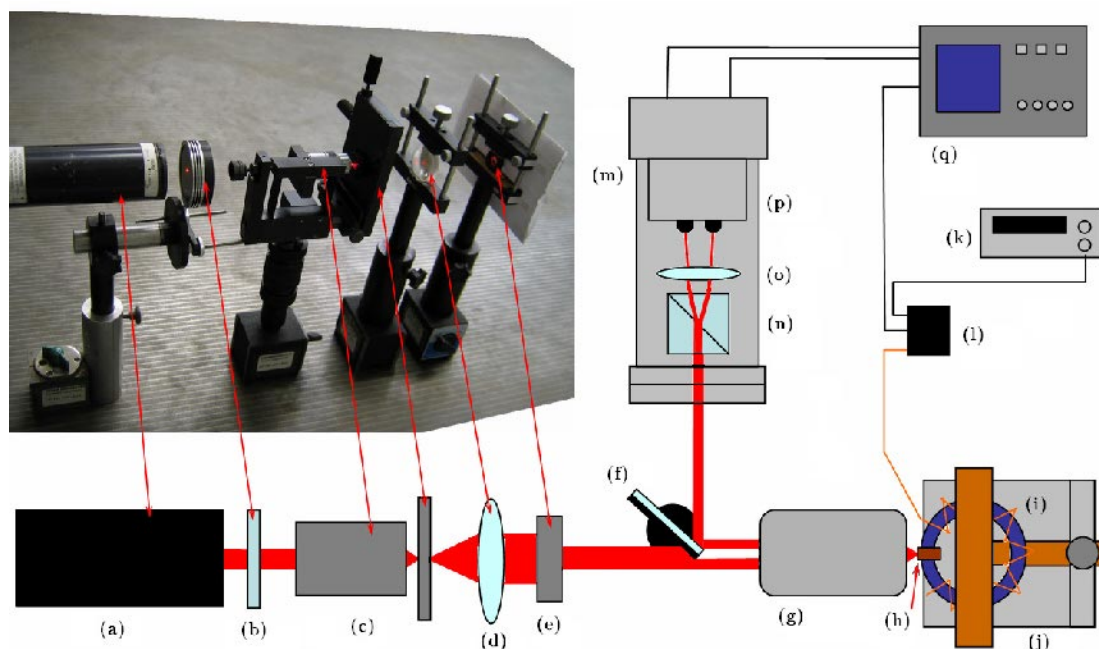
Obr. 3.2. Měření GMR jevu na ÚFI: srovnání relativní změny magnetovodivosti různých systémů Co/Cu/NiFe na Si deponovaných v aparatuře na obr. 2.1, lišících se tloušťkou spodní vrstvy Co.



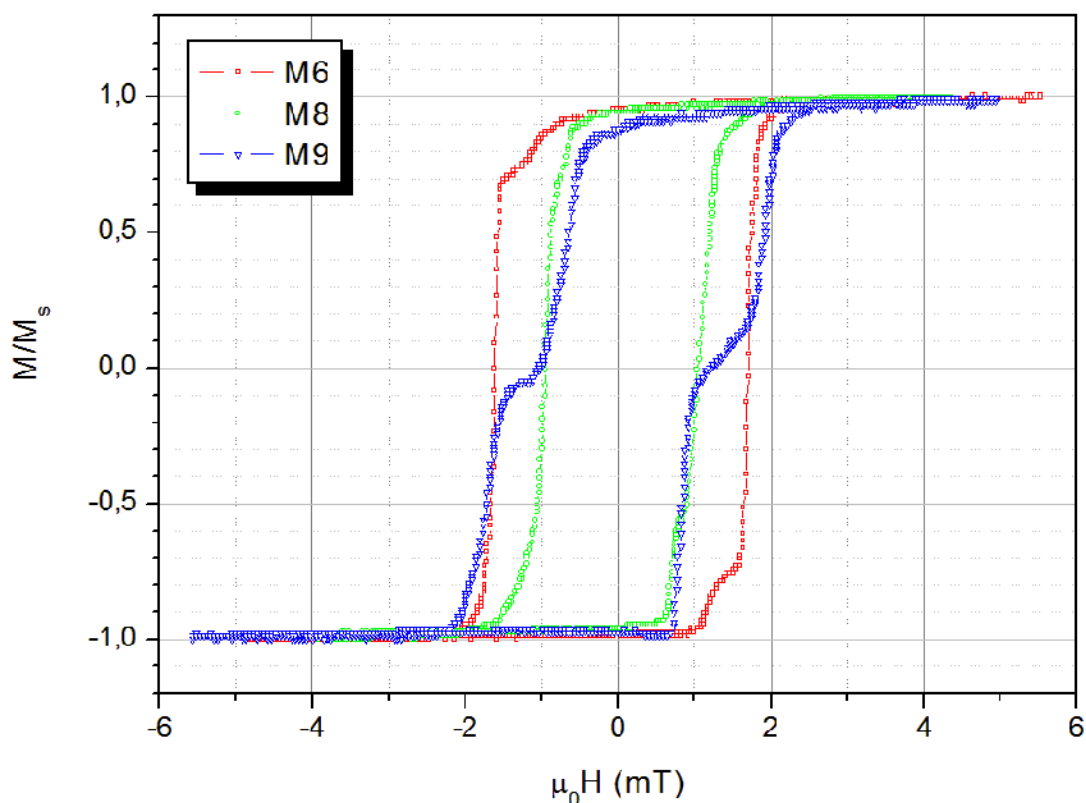
Obr. 3.3. Geometrické konfigurace magnetooptického Kerrova jevu. (a) – polární konfigurace – magnetizace leží v rovině dopadu kolmo k povrchu vzorku, (b) – longitudinální konfigurace – magnetizace leží v rovině vzorku rovnoběžně s rovinou dopadu, (c) – transverzální konfigurace – magnetizace leží v rovině vzorku kolmo na rovinu dopadu.

3.1 MĚŘENÍ LONGITUDINÁLNÍHO KERROVA JEVU V JEDNOM BODĚ POVRCHU

Zařízení, které bylo navrženo a zkonstruováno v rámci práce [28], bylo užito ke stanovení magnetických vlastností vrstev Co na Si, připravených metodou IBAD v aparatuře na obr. 2.3. Povrchová citlivost metody byla zvýšena řadou konstrukčních úprav, takže lze detekovat magnetický signál vrstev Co o tloušťce cca 3 nm. Jedna z prvních variant zařízení zkonstruovaného na ÚFI k určování Kerrovy rotace magnetické vrstvy je znázorněna na obr. 3.4. Světlo z laseru (lineárně polarizované ve



Obr. 3.4. Schéma aparatury pro měření Kerrova jevu na ÚFI: (a) laser, (b) polarizátor, (c) prostorový filtr, (d) čočka, (e) irisová clona, (f) zrcátko, (g) mikroobjektiv, (h) držák vzorku, (i) elektromagnet, (j) držák elektromagnetu, (k) funkční generátor, (l) proudový zesilovač, (m) analyzátor s fotodiodami, (n) Wollastonův hranol, (o) čočka, (p) elektronika, (q) osciloskop.



Obr. 3.5. Stanovení M/M_{sat} pomocí měření Kerrovy rotace vrstev Co na Si (přípravených v aparatuře na obr. 2.1) optickou sestavou z obr. 3.4.

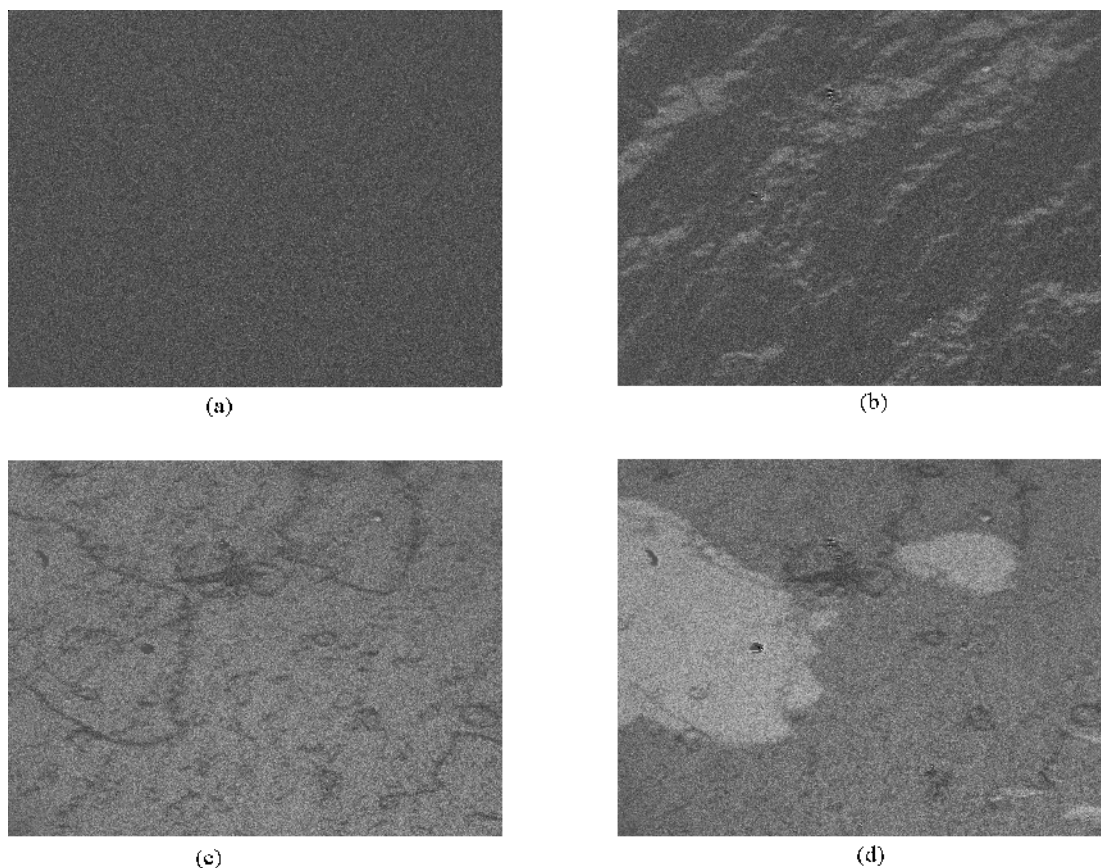
svislé rovině) dopadá na zmagnetovaný vzorek a poté na Wollastonův hranol natočený vůči svislému směru o 45° . Hranol pak rozdělí svazek na světlo polarizované kolmo k rovině dopadu a světlo polarizované rovnoběžně s rovinou dopadu o shodné (resp. téměř shodné při vlastním měření) amplitudě. Odrazem světla na magnetickém vzorku dochází ke stočení polarizační roviny, a proto dochází také k malé změně intenzity v těchto dvou kolmých směrech. Tato změna je detekována dvěma fotodiodami, na které oba světelné paprsky dopadají.

Na obr. 3.5 je uvedena závislost poměru M/M_{sat} na vnějším magnetickém poli, kterému byly vystaveny různě tenké vrstvy Co na Si.

3.2 MĚŘENÍ LONGITUDINÁLNÍHO KERROVA JEVU NA PLOŠE VZORKU: ZOBRAZOVÁNÍ MAGNETICKÝCH DOMÉN

Studium vzniku, tvaru a pohybu magnetických domén je možné pomocí Kerrova mikroskopu, který zvýrazňuje stav polarizace světla odraženého od vzorku s různou magnetickou doménovou strukturou a prošlého fixně nastaveným polarizátorem. Změna magnetizace po ploše vzorku má za následek vznik Kerrovy rotace světla a tím i změnu intenzity světla dopadajícího na detektor.

Na obr. 3.6 je znázorněn povrch vzorku CoO/Cu/NiFe, který byl vystaven vlivu proměnného magnetického pole. Je na něm zřetelně vidět vznik magnetických domén magneticky slabšího materiálu NiFe, následován vznikem a pohybem domén spodní vrstvy Co při silnějších vnějších magnetických polích. Snímky byly pořízeny v rámci studijního pobytu autora pojednání v *Laboratoire Louis Néel*, CNRS, Grenoble.



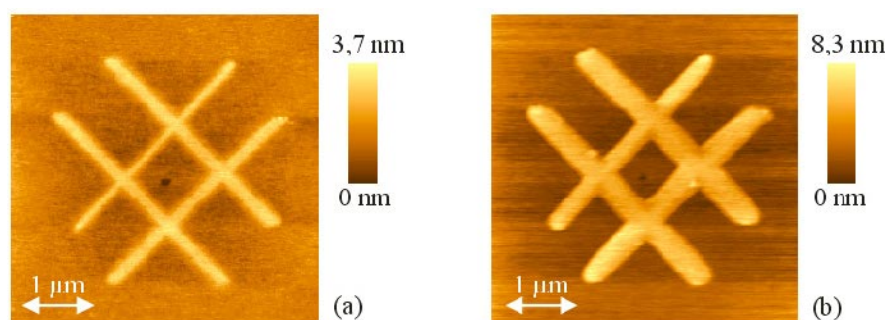
Obr. 3.6. Snímek z Kerrova mikroskopu vzorku CoO/Cu/NiFe připravený na ÚFI metodou IBAD. Pole $(30 \times 40) \mu\text{m}^2$: (a) referenční obraz povrchu pro nulové vnější magnetické pole, odpovídá shodnému směru nasycené magnetizace obou magnetických vrstev, (b) nárůst pole „převrátí“ magnetické momenty v části vrstvy NiFe — světlá místa odpovídají magnetickým doménám NiFe, (c) další nárůst vnějšího magnetického pole zorientuje i ostatní domény vrstvy NiFe (dojde k saturaci), celá plocha vzorku se jeví jako světlá, (d) pole dosáhlo velikosti potřebné k překlopení některých magnetických momentů spodní vrstvy (nejsvětlejší místa odpovídají doménám v CoO). Změřeno autorem v *Laboratoire Louis Néel*, CNRS, Grenoble.

3.3 PŘÍPRAVA MAGNETICKÝCH NANOSTRUKTUR POMOCÍ SELEKTIVNÍHO RŮSTU A JEJICH VIZUALIZACE

Další zmenšování rozměrů záznamových jednotek klade stále vyšší nároky na technologie příprav magnetických nosičů.

Na ÚFI je mimo jiné rozvíjena metoda přípravy nanostruktur pomocí lokální anodické oxidace (*Local Anodic Oxidation* – LAO [29]), která je založena na vytvoření oxidové struktury např. ve vrstvě Ti přiblížením hrotu mikroskopu AFM (detekující atomární síly), na který je přivedeno napětí řádově jednotek voltů oproti zemněnému substrátu. V okolí konce hrotu tak vznikne silné elektrické pole, které zvyšuje difúzi kyslíku obsaženého v iontových fragmentech vody, která ulpěla na povrchu kondenzací vodní páry z okolní atmosféry. Rastrováním hrotu nad povrchem vzorku lze získat oxidové struktury různých výšek v závislosti na rychlosti posuvu a relativní vlhkosti [30]. Poloha hrotu (jeho výška) je sledována pomocí vychylování laserového svazku, zaostřeného na raménko s hrotem. Pokud dojde k vychýlení, odražený paprsek dopadne na jiné místo čtyřsegmentové fotodiody. Zpětná vazba posune raménko tak², aby paprsek dopadl na původní místo. Tímto způsobem lze získat topografii povrchu vzorku.

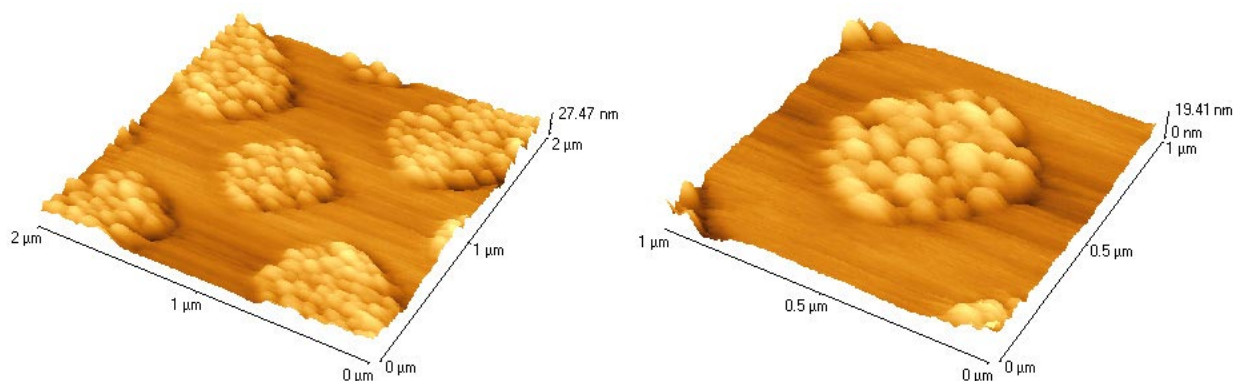
V současnosti je na ÚFI intenzivně zkoumána možnost tzv. selektivního růstu nanostruktur. Vytvoříme-li na povrchu vzorku oxidové čáry, může dojít k ovlivnění růstu vrstvy — na místech nezoxidovaných bude probíhat růst jinak než na oxidových čarách, případně v jejich blízkosti.



Obr. 3.7. Snímek AFM oxidového motivu na povrchu Si (vlevo). Depozice vrstvy Co, která proběhla v aparatuře na obr. 2.2 za určitých podmínek selektivně — atomy vytvořily vrstvu o výšce cca 10 nm pouze na oxidovém kříži. (Vyrobeno a změřeno na ÚFI.)

Na obr. 3.7 je AFM snímek oxidového kříže na povrchu Si (vlevo) ve srovnání s následně deponovanou vrstvou atomů Co, které selektivně utvořily vrstvu na místě oxidového kříže (vpravo). Depozice byla uskutečněna v aparatuře schematicky znázorněné na obr. 2.2.

²Pohyb je zajištěn pomocí piezokeramických elementů. Tyto materiály mění definovaně své rozměry v závislosti na velikosti přiloženého napětí. Hodnoty napětí jsou pro jednotlivé body rastru zaznamenávány. Tímto způsobem lze vytvořit snímek, na kterém jsou „vidět“ atomy zkoumaného povrchu.



Obr. 3.8. Snímek z AFM mikroskopu: depozice vrstvy Co, která proběhla v aparatuře na obr. 2.2 za určitých podmínek selektivně — atomy vytvořily vrstvu mimo oxidový kříž (tj. jinde, než tomu bylo na obr. 3.7). Vpravo detail magnetické nanostruktury vytvořené mezi oxidovými čarami. Délka struktury $0,5 \mu\text{m}$, výška přibližně 20 nm. (Vyrobeno a změřeno na ÚFI.)

Změníme-li podmínky depozice, můžeme dosáhnout opačného efektu — atomy Co mohou vytvořit vrstvu mimo oxid, jak je vidět na obr. 3.8, kde selektivní růst Co vrstvy probíhal v místech, která nebyla metodou LAO ovlivněna. Klíč k úspěšnému selektivnímu růstu tedy spočívá ve znalosti vhodných depozičních podmínek, stavu substrátu a výběru vhodných materiálů. Tyto experimenty vznikly v rámci řešení projektu MŠMT LC06040: STRUNA – *Struktury pro nanofotoniku a nanoelektroniku*.

4 PEDAGOGICKÁ ČINNOST

4.1 TVORBA SYSTÉMU STUDIJNÍCH OPOR VÝUKY FYZIKY: *e-learning*

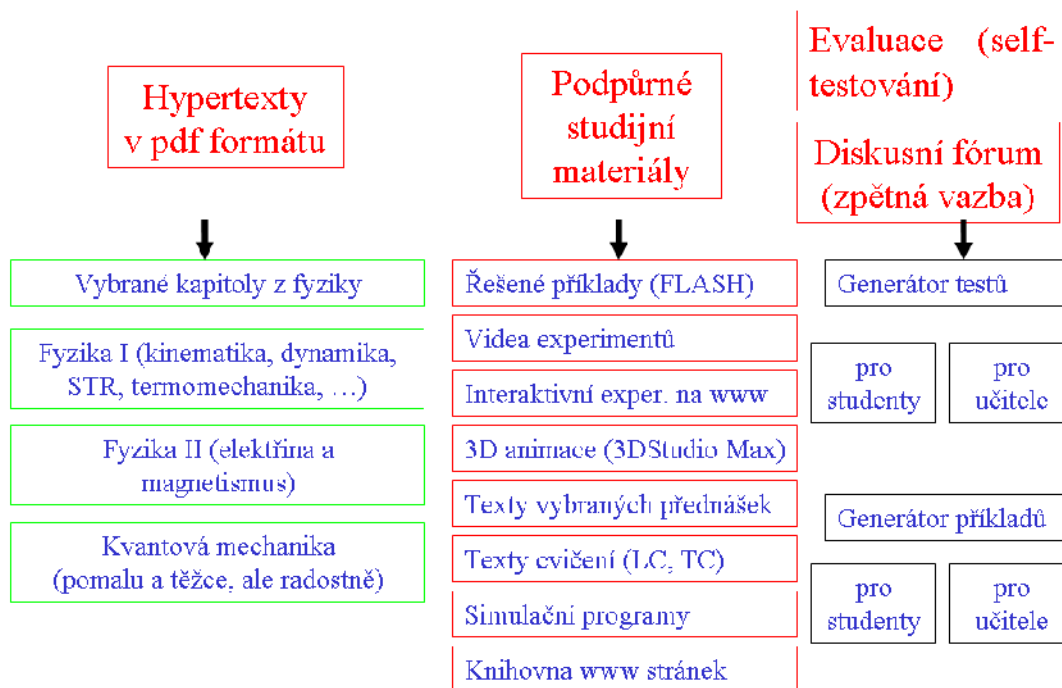
Od roku 1988 se autor věnuje pedagogické činnosti na Ústavu fyzikálního inženýrství, který zajišťuje výuku základních kurzů fyziky pro všechny obory bakalářských a magisterských studijních programů FSI VUT v Brně, a od roku 2002 působí také na PřF MU. Za tuto dobu došlo ke značnému snížení nároků na studenty, mimo jiné také proto, že poklesla úroveň jejich matematických a fyzikálních znalostí ze střední školy.

S odstupem času se ukazuje, že výuku fyziky na technických vysokých školách lze rozdělit na dobu před vydáním a po vydání učebnice *Fyzika* ([31]). Před rokem 2000 neměli studenti České republiky k dispozici ucelený přehled základů fyziky s přesahem do moderní fyziky vyjma slovenského překladu Feynmanových přednášek z fyziky [32]. Bohužel se ukazuje, že jen málo studentů je ze střední školy vybaveno správnými studijními návyky. V mnohých případech neumí absolvent české střední školy pracovat s odborným (ani běžným) textem, analyzovat jej a aktivně použít nejdůležitější myšlenky v něm obsažené při řešení samostatných úloh. Proto byl na ÚFI vytvořen systém tzv. studijních opor. Tyto opory zprostředkovávají studentům přístup k informačním zdrojům (přes www stránky ÚFI) a pomocí systému virtuálních studoven umožní studentům provést základní evaluaci dosažených znalostí prostřednictvím aktivních testů a velkého počtu řešených i neřešených příkladů s fyzikální tematikou. Schéma výstavby celé otevřené struktury studijních fyzikálních opor je na obr. 4.1. Poznatky získané při tvorbě studijních opor byly autorem prezentovány na konferenci o fyzikálním vzdělávání [33]. Pokud má dojít ke zvýšení zájmu studentů o relativně náročné studium na vysokých školách technického typu, je nutné věnovat velkou pozornost vzdělávání talentované mládeže [34].

4.2 VÝUKA V PŘEDMĚTECH OBOROVÉHO STUDIA *Fyzikální inženýrství*

Vzhledem k počtům studentů se výuka v jednotlivých ročnících studia oboru *Fyzikální inženýrství* vyznačuje individuálnější přístupem učitele ke studentovi, než je tomu v případě výuky základního kurzu fyziky pro bakaláře. Lze tak lépe sledovat průběh jeho studia po celý semestr, celkové hodnocení je komplexnější. Těžiště práce v bakalářském stupni spočívá v osvojení si základní úrovně fyziky absolvováním kurzů *Obecná fyzika I až IV*, ve kterých student získá potřebné znalosti, které může dále použít v projektové výuce. Na tu je kladen patřičný důraz ať už formou předmětů *Semestrální projekt*, ve kterých mají studenti možnost participovat na řešení vědeckých úkolů jednotlivých výzkumných skupin na ÚFI, nebo v rámci svých bakalářských prací a diplomových úkolů.

Díky úrovni dosažených výsledků, konkurenceschopnosti a jazykovým znalostem jsou absolventi oboru *Fyzikální inženýrství* na současném trhu práce velmi žádaní.



Obr. 4.1. Schéma výstavby otevřeného systému studijních opor výuky fyziky na ÚFI. Hypertextové studijní materiály jsou s dalšími základními částmi navzájem propojeny přímými křížovými odkazy. Celý systém studijních pomůcek je možno dále modulárně doplňovat o nové prvky [33].

5 ZÁVĚR

Na ÚFI jsou v posledním desetiletí intenzivně rozvíjeny metody příprav a analýz tenkých vrstev a povrchů ve škále pokrývající mezoskopickou fyziku i nanotechnologie. V rámci těchto aktivit byla autorem vypracována metoda zobrazovací reflektometrie, na jejímž principu byl sestaven unikátní měřicí optický přístroj vhodný k určování *in situ* plošné homogenity tenkých vrstev. Vznik tohoto přístroje lze použít jako vhodný příklad pro popis způsobu vědecké práce, který je pro ÚFI charakteristický. Představuje spojení dvou vzájemně se doplňujících přístupů: inženýrského a fyzikálního. Fyzika stojí u zrodu základní metody, na které je funkce přístroje založena, inženýrství pak zajišťuje realizaci díla od návrhu ideového a konstrukčního, přes výrobu, sestavení a ověření funkčnosti finálního přístroje. Jedná se o týmový přístup fyzikálních inženýrů současných i budoucích (tj. studentů oboru fyzikálního inženýrství, kteří se podíleli na vývoji zařízení v rámci svých bakalářských prací, diplomových úkolů a disertačních prací) s fyziky (např. z PřF MU, FzÚ AV ČR, MFF UK Praha v rámci projektů GAČR atd.). Problematika vzniku a testování funkčnosti vědeckého přístroje — inženýrského

díla tvořila náplň řešení dvou grantů GAČR ([17], [14]), jednoho doktorského studia ([12]) a tří diplomových úkolů ([20], [21], [19]). Dosažené výsledky byly publikované v mezinárodních časopisech ([11], [15] a [18]), v národních časopisech a prezentované na mezinárodních a národních konferencích.

Vědecká a pedagogická činnost na ÚFI se rovněž intenzivně rozvíjí v širším rámci dlouholeté spolupráce s ostatními institucemi tuzemskými (PřF MU, ÚPT a FzÚ AV ČR) i zahraničními (University of Salford (UK), University of Aston (UK), University College in London (UK), Eindhoven University of Technology (NL), Université Joseph Fourier, Grenoble (FR), University of Bari (I), University of Minho (PR), University of Linz (A) a další). Vzhledem ke kvalitám studentů oboru Fyzikální inženýrství je zahraničními partnery velmi vítána spolupráce v rámci výměnného programu ERASMUS, který umožňuje studentům 4. ročníku magisterského studia uskutečnit šestiměsíční stáž na zahraniční univerzitě, která se v některých případech rozvinula do formy doktorského studia. Pokud budeme chtít udržet vysokou úroveň absolventů oboru Fyzikálního inženýrství, o které je velký zájem (FEI (Philips) Czech Republic, TESCAN s.r.o., Autopal Nový Jičín (FORD), ON Semiconductors (Rožnov p. Radh.), MEOPTA Přerov a další), bude třeba věnovat odpovídající úsilí vyhledávání mladých talentů z řad středoškoláků nad rámec pravidelně konaných akcí pořádaných FSI, ke kterým patří například Dny otevřených dveří na FSI, Gaudeamus apod. Touto problematikou se bude zabývat projekt [34] a především připravovaný Operační program ke zvyšování konkurenceschopnosti absolventů vysokých škol, který by měl na rozvoj vzdělávání v technických oborech uvolnit nemalé finanční částky z fondů EU. Důvody této politiky jsou jasné — inženýři a technici v Evropě chybí a noví absolventi vysokých škol technických směrů nestačí nahrazovat stárnoucí populaci současných vědeckých pracovníků.

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji všem svým milým kolegům, bez jejichž velkorysé pomoci by nikdy práce popsaná v těchto tezí nevyšla. Zvláště pak bych chtěl zmínit dva vzácné kolegy a skvělé přátele, kteří již nejsou mezi námi — Vladimíra Mitvalského a Zdeňka Harnu, jejichž památce je tato práce s vděčností věnována.

Tato práce souvisí s tematikou projektů MŠMT ČR (MSM0021630508 a LC04060), GAAV ČR (IAA1010413 a KAN400100701) a projektu EUROCORES–GAČR (FON/06/E001).

LITERATURA

- [1] Mark P. Silverman: *Waves and Grains: Reflections on Light and Learning*. Princeton University Press, 1998.
- [2] T. Šikola, J. Spousta & L. Dittrichová: „Equipment for modification, etching

- and deposition of thin films based on broad beam ion source.“ *Scripta Fac. Sci. Nat. Univ. Brun.* **13** (1992), pp. 119–137.
- [3] S. Voborný, M. Kolíbal, J. Mach, J. Čechal, P. Bábor, S. Průša, J. Spousta & T. Šikola: „Deposition and in-situ characterization of ultra-thin films.“ *Thin Solid Films* **459** (2004), pp. 17–22.
- [4] P. Bábor: *Hmotnostní spektroskopie sekundárních iontů v analýze povrchů a tenkých vrstev*. Disertační práce, ÚFI FSI VUT, Brno 2005.
- [5] M. Kolíbal: *Analysis of ultra thin films by TOF-LEIS*. Disertační práce, ÚFI FSI VUT, Brno, v tisku, (školitel J. Spousta).
- [6] J. Čechal: *Analýza povrchu a tenkých vrstev využitím fotoelektronové spektroskopie*. Disertační práce, ÚFI FSI VUT, Brno 2006.
- [7] F. Lopour: *Development and application of an UHV SPM microscope*. Disertační práce, ÚFI FSI VUT, Brno 2005.
- [8] E. Brandejsová: *Spektroskopická elipsometrie tenkých vrstev a multivrstev pevných látek*. Disertační práce, ÚFI FSI VUT, Brno, v tisku, (školitel J. Spousta).
- [9] E. Wolf and M. Born: *Principles of Optics* (7th ed.). Cambridge University Press, 1999.
- [10] A. Vašíček: *Optika tenkých vrstev*, Nakladatelství ČSAV, Praha 1956.
- [11] J. Spousta, M. Urbánek, R. Chmelík, J. Jiruše, J. Zlámal, K. Navrátil, A. Nebojsa & T. Šikola: „In Situ Measurements of Surface Homogeneity of Optical Parameters of Weakly Absorbing Thin Films.“ *Surf. Interface Anal.* **34** (2002), pp. 664–667.
- [12] M. Urbánek: *In situ monitorování optických vlastností pevných látek*. Disertační práce, ÚFI FSI VUT, Brno, v tisku, (školitel J. Spousta).
- [13] D. F. Edwards, *Silicon (Si)*, In: E. D. Palik (ed.), *Handbook of Optical Constants of Solids*. Academic Press, New York 1991, pp. 547–569.
- [14] *Návrh a konstrukce UV optického měřicího zařízení k in situ monitorování plošné homogenity růstu tenkých vrstev deponovaných metodou IBAD*, projekt GA102/02/0506, řešitel J. Spousta.
- [15] M. Urbánek, J. Spousta, K. Navrátil, R. Szotkowski, R. Chmelík, M. Buček & T. Šikola: „Instrument for thin film diagnostics by UV spectroscopic reflectometry.“ *Surf. Interface Anal.* **36** (2004), pp. 1 102–1 105.
- [16] J. Spousta, M. Urbánek, K. Navrátil, T. Šikola: *In situ UV-VIS reflectometry*. XIV. Mezinárodní optická konference, Nitra, 2004.
- [17] *Návrh a konstrukce zařízení pro in situ měření plošné homogenity tenkých vrstev*, projekt GA101/98/0772, řešitel J. Spousta.
- [18] M. Urbánek, J. Spousta, T. Běhounek & T. Šikola: „Imaging Reflectometry In situ.“ *Appl. Optics*, **46** (2007), pp. 6 309–6 313.
- [19] P. Neugebauer: *Vývoj zařízení na principu spektroskopické reflektometrie v oblasti UV/VIS záření*. Diplomová práce ÚFI FSI VUT, Brno 2005, (vedoucí J. Spousta).

- [20] M. Urbánek: *Optické zařízení pro plošné in situ monitorování homogenity tlouštěk tenkých vrstev*. Diplomová práce ÚFI FSI VUT, Brno 2000, (vedoucí J. Spousta).
- [21] R. Szotkowski: *Vývoj zařízení na principu spektroskopické reflektometrie v oblasti UV/VIS záření*. Diplomová práce ÚFI FSI VUT, Brno 2004, (vedoucí J. Spousta).
- [22] J. Spousta, T. Šikola, R. Chmelík, Z. Harna, M. Jákl, J. Zlámal, J. Jiruše, M. Urbánek, K. Kollarčík & A. Nebojsa: „Zařízení pro in situ monitorování plošné homogenity tenkých neabsorbujících vrstev.“ *Jemná mechanika a optika*, **44** (1999), pp. 355–358.
- [23] M. Urbánek, J. Spousta, T. Šikola, J. Zlámal, R. Chmelík, Z. Harna, J. Jiruše & M. Jákl: „In situ plošné monitorování optických parametrů tenkých vrstev.“ *Jemná mechanika a optika*, **46** (2001), pp. 143–145.
- [24] M. Urbánek, J. Spousta, K. Matějka, M. Buček, P. Neugebauer & T. Šikola: „Systém pro měření homogenity optických vlastností tenkých vrstev.“ *Jemná mechanika a optika*, **48** (2003), pp. 163–166.
- [25] J. Spousta, M. Urbánek, R. Chmelík, T. Běhounek, R. Plšek, T. Šikola & K. Navrátil: „Vývoj zařízení k in-situ stanovení rozložení tlouštěk vrstev pomocí UV-VIS zobrazovací reflektometrie.“ *Jemná mechanika a optika*, **51** (2006), pp. 239–245.
- [26] Viz například <http://almaz.com/nobel/physics/physics.html>.
- [27] E. du Trémolet de Lacheisserie: *Magnétisme I — fondements*. Presses universitaires de Grenoble, 1999.
- [28] V. Uhlíř: *Studium tenkých vrstev a povrchů pomocí magnetooptických jevů*. Diplomová práce ÚFI FSI VUT, Brno 2006, (vedoucí J. Spousta).
- [29] F. Lopour, R. Kalousek, D. Škoda, J. Spousta, F. Matějka & T. Šikola: „Application of AFM in Microscopy and in Fabrication of Micro/Nanostructures.“ *Surf. Interface Anal.* **34** (2002), pp. 352–355.
- [30] M. Bartošík, D. Škoda, O. Tomanec, R. Kalousek, P. Jánský, J. Zlámal, J. Spousta & T. Šikola, *J. Phys.: Conference Series* **61** (2007), p. 75.
- [31] D. Halliday, R. Resnick, J. Walker: *Fyzika*. Nakladatelství VUTIUM — Prometheus Praha, Brno 2000, (upravený a doplněný 1. dotisk 2003, 2. dotisk 2006).
- [32] R. P. Feynman, R. B. Leighton, M. Sands: *Feynmanove přednášky z fyziky*. Nakladatelství ALFA, Bratislava 1980.
- [33] J. Spousta, P. Dub, R. Kalousek, J. Zlámal & S. Průša: „Physics distant education at the BUT Institute of Physical Engineering.“ *New Trends in Physics*, VUT, Brno 2004, pp. 351–354.
- [34] M. Liška, J. Spousta, P. Dub: *Práce s talentovanou mládeží*, rozvojový projekt MŠMT, 2008.

PŘEDSTAVENÍ AUTORA

Jiří Spousta je docentem na Ústavu fyzikálního inženýrství Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně. Narodil se 24. června 1962 v Brně, kde v roce 1981 ukončil maturitou s vyznamenáním studium ve třídě pro vrcholové sportovce gymnázium na ulici Vídeňská. V témže roce byl přijat ke studiu na Přírodovědecké fakultě UJEP, nyní Masarykova univerzita, na které v roce 1986 obhájil diplomovou práci *Tenké vrstvy pro malé diskové paměti* a ukončil s vyznamenáním studium oboru Fyzika pevné fáze a obdržel titul RNDr. Po absolvování základní prezenční vojenské služby v letech 1986–1987 na letišti v Pardubicích nastoupil do podniku Zbrojovka Brno, ve kterém se zabýval vývojem malých diskových pamětí typu Winchester. V roce 1988 byl na základě konkurzu přijat na místo asistenta na Katedru fyziky Fakulty strojní VUT v Brně, na které se zapojil do výuky základního kurzu fyziky. Rovněž se stal členem výzkumného týmu zabývajícím se vývojem vakuového zařízení k přípravě a modifikaci tenkých vrstev založeného na metodě IBAD (*Ion Beam Assisted Deposition*), což v tehdejší době představovalo zcela nový směr vědeckého bádání na katedře. V roce 1991 se na základě konkurzu stal stipendistou francouzské vlády a začal doktorské studium na Université de Denis Diderot Paris VII. Tam se zabýval přípravou, modifikací a studiem vlastností hydrogenovaných uhlíkových vrstev diamantu a polymeru podobných. K jejich přípravě používal metodu PECVD (*Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition*) a k analýze chemického složení především metody RBS (*Rutherford Backscattering Spectroscopy*) a ERDA (*Elastic Recoil Detection Analysis*) pomocí místního Van de Graaffova 2,5 MeV akcelérátoru částic. Z této doby rovněž pochází jeho práce *Laser-Induced Modifications in a-C:H Films*, která byla oceněna jako nejlepší studentský příspěvek na mezinárodním kongresu Evropské materiálové společnosti (E-MRS/ICEM) v roce 1992 ve Štrasburku. Na pařížské univerzitě se zapojil i do výuky základního kurzu fyziky vedením *Travaux dirigés*. V roce 1994 v Paříži úspěšně obhájil disertační práci *Étude de la croissance de couches de carbone amorphe hydrogéné* a získal titul *Docteur es science de l'Université Paris VII* (Ph.D). Po návratu na Ústav fyzikálního inženýrství FSI VUT v Brně se jako odborný asistent zapojil do výuky a podílel se na rozvoji laboratoře povrchů, tenkých vrstev a rozhraní — kromě metod příprav tenkých vrstev a nanostruktur se zabýval a zabývá dodnes analytickými technikami vhodnými k jejich *in situ* charakterizaci, ke kterým patří:

- (a) nedestruktivní optické metody (elipsometrie a reflektometrie),
- (b) metody založené na užití iontových svazků SIMS (*Secondary Ion Mass Spectroscopy*), TOF-LEIS (*Time of Flight Low Energy Ion Spectroscopy*),
- (c) sondové mikroskopie AFM/STM (*Atomic Force Microscopy/Scanning Tunneling Microscopy*).

V roce 2002 se habilitoval na PřF MU v oboru „Fyzika kondenzovaných látek a akustika“ obhájením práce *Depozice tenkých vrstev a modifikace povrchů iontovými svazky a in situ analýzy v UHV podmínkách*.

Vědecká činnost Jiřího Spousty je spojena především s fyzikou povrchů a rozhraní — tato problematika byla podporována dvěma grantovými projekty GAČR:

- GA101/98/0772: *Návrh a konstrukce zařízení pro in-situ měření plošné homogenity tenkých vrstev* (1998–2000), řešitel,
- 102/02/0506: *Návrh a konstrukce UV optického měřicího zařízení k in situ monitorování plošné homogenity růstu tenkých vrstev deponovaných metodou IBAD* (2002–2004), řešitel.

Byl, případně je členem řešitelských týmů projektů:

- výzkumný záměr MSM262100002: *Progresivní funkčně gradientní a nanostrukturální materiály* (1999–2004), člen řešitelského týmu,

- výzkumný záměr MSM0021630508: *Anorganické nanomateriály a nanostruktury* (1999–2004), člen řešitelského týmu,
- centrum LC06040: *Struktury pro nanofotoniku a nanoelektroniku* (2006–2010), člen řešitelského týmu a tajemník Rady centra.

Byl rovněž řešitelem dvou mezinárodních projektů Barrande, které byly založeny na spolupráci mezi ÚFI FSI VUT v Brně a Laboratoire Louis Néel v Grenoblu, Francie:

- Barrande 97088: *Deposition of thin magnetic films by broad ion beams and their characterization I* (1997–1998), řešitel,
- Barrande 98088: *Deposition of thin magnetic films by broad ion beams and their characterization II* (1998–1999), řešitel.

Rovněž uskutečnil několik krátkodobých pobytů a přednášek v rámci výměnného programu ERASMUS na univerzitách v Bari (Itálie) a Grenoblu (Francie).

Získané výsledky své vědecké práce Jiří Spousta publikoval ve 20 původních článcích, zejména v mezinárodních vědeckých časopisech, s citačním ohlasem přesahujícím počet 50 (bez autocitací), a v 53 příspěvcích ve sbornících mezinárodních konferencí. Pod jeho vedením rovněž vznikl unikátní vědecký přístroj, který umožňuje sledovat *in situ* plošnou homogenitu slabě absorbujících tenkých vrstev.

Současná pedagogická činnost Jiřího Spousty je zaměřena na přednášky jednak základního kurzu fyziky v bakalářském studiu (*Fyzika I* a *Fyzika II*) a jednak předmětů oborového studia (*Obecná fyzika I*, *Kvantová a statistická fyzika*, *Úvod do fyziky mikrosvěta* a *Fyzika a technika vakua*) pro bakaláře oboru Fyzikální inženýrství. V rámci spolupráce s Masarykovou univerzitou přednáší rovněž na přírodovědecké fakultě kurz *Mechanika a molekulová fyzika* pro odborné fyziky a astrofyziky a učitele kombinace matematika–fyzika. Byl rovněž jedním z hlavních řešitelů projektu, který se zaměřil na přípravu studijních materiálů v elektronické podobě především pro studenty bakalářského a magisterského studijního programu. Tento systém virtuálních učeben je rozšířen o odkazy do odpovídajících částí vysokoškolské učebnice *Fyzika* autorů D. Hallidaye, R. Resnicka a J. Walkera, na jejímž překladu se Jiří Spousta v roce 2000 podílel.

Je spoluorganizátorem pravidelných mezinárodních letních škol z oblasti fyziky a inženýrství povrchů pro mladé vědecké pracovníky a doktorandy, které se konaly v letech 1993, 1996, 1999, 2002, 2005. Další se bude konat i v roce 2008. Od roku 2002 je členem komisí pro státní závěrečné zkoušky na FSI VUT (obory Fyzikální inženýrství a Přesná mechanika a optika). Je školitelem v doktorských studijních programech na FSI VUT (vede 4 doktorandy interní, 2 externí, z nichž 1 úspěšně ukončil studium v roce 2005, 3 další budou obhajovat disertační práce začátkem roku 2008). Je rovněž členem oborové komise oboru Fyzika kondenzovaných látek doktorského studijního programu Fyzika na PřF MU.

Jiří Spousta se rovněž věnuje mimoškolním pedagogickým aktivitám — podílí se na výuce plavání školní mládeže (SKP Kometa Brno, dobrovolný cvičitel) a odbíjené (reprezentační výběr VUT v Brně).

Je ženatý a má tři děti.

ABSTRACT

A light as a probe for inspection of the world around us is used by humans from the ancient beginning. This thesis named *Light — A Tool For Probing* deals with a usage of light allowing characterization of matter properties. Dimensions of analyzed surfaces described here can vary over a large interval, starting from centimeters and ending at nanometers. Also a number of characteristics and properties which can be quantified by a light probe is surprisingly high, including for example morphology, and electronic, optical and magnetic properties of surfaces, thin films and various nanostructures.

Such properties can be investigated during the film growth (*in situ*) or after its completion (*ex situ*). In the Institute of Physical Engineering (IPE) there are two ways how to prepare samples of unique properties — one is based on an IBAD technique comprising two broad ion sources and the other one is represented by a complex of UHV chambers equipped with evaporation Knudsen cells, ultra-low energy ion beam source and possessing various *in situ* analyzing techniques. One of the state-of-the-art results achieved in this equipment was the preparation of Co nanostructures performed by a selective growth method based on differences in sticking coefficients of Si surfaces patterned by means of a LAO technique. The morphology of the selectively grown nanostructures was monitored by AFM measurements.

Magneto-electrical properties of spin valve systems (Co/Cu/NiFe) prepared by the IBAD method were studied by means of GMR measurements. To be able to tune magnetic behaviour of ultrathin Co layers properly, magneto-optical Kerr effect measurements were carried out as well. In this way one can optimize deposition parameters and, hence, enhance the quality and reproducibility of technological processes.

The main goal of this review is to present an innovative method on *in situ* real-time optical monitoring of thin film deposition and etching. An apparatus based on this method was designed, fabricated and tested in IPE. The process of building of this apparatus is an example of the scientific work representing the concerted action provided by the staff and students of the IPE in a close collaboration with the co-workers and scientists from other institutions (MU, ISI CAS, IP CAS, etc.). As the basic principles of this method are bound to physics, realization and testing of the apparatus represent engineering approaches.

The research work having been done on building the instrument was a part of two GACR projects, one PhD study and three diploma works. The results were published in scientific journals and presented at national and international conferences.

Last but not least, it is worth mentioning that activities described have been carried out via intense interactions between the author and the colleagues and students of IPE.