

PRINCIPY MODERNÍCH OPTICKÝCH ZOBRAZOVACÍCH METOD – PRAKTIKUM

jarní semestr 2016

Autoři návodů: Mgr. Mojmír Meduňa, Ph.D.
doc. RNDr. Petr Mikulík, Ph.D.

Úvod	2
1. Principy optických přístrojů – Teoreticko-konstrukční blok A	3
1.1. Studium principů optických mikroskopů (meziobraz, plnní čočka, temné pole s rovnoběžným a divergentním osvětlením preparátu)	4
1.2. Studium principů polarizačního mikroskopu (polarizátory, polarizace odrazem, jednostupňový polarizační mikroskop, průchod světla přes tlustý dvojlomný preparát, vznik interferenčního kontrastu na tenkém dvojlomném preparátu)	6
1.3. Koherenční vlastnosti světla a interference (jednoduchý optický difraktograf, interference na dvojtěrbině, mřížce, na tenkých vrstvách, na planparalelním skle, Newtonova skla – laserové světlo, bílé světlo)	8
2. Práce s mikroskopy – Pozorovací blok B	10
2.1. Profesionální projekční mikroskop Zeiss E2	11
2.2. Interferenční mikroskopy Peraval (na průchod) a Epival (na odraz)	16
2.3. Stereo a polarizační mikroskop Motic	21
3. Aplikace mikroskopie v polovodičovém průmyslu – Aplikační blok C	23
3.1. Čisté prostory – principy	24
3.2. Fotolitografie	26
3.3. Měření tlouštěk a morfologie povrchu pomocí profilometru	27
3.4. Hrotové měření a další využití stereomikroskopů	28
3.5. Organizace praktika v čistých prostorách	29
4. Pokročilé aplikace mikroskopů: SEM a AFM – Aplikační blok D	30
4.1. Skenovací elektronová mikroskopie (SEM)	30
4.2. Mikroskopie atomových sil (AFM)	32
5. Rentgenové zobrazovací metody – Aplikační blok E	34
5.1. Rentgenová radiografie	34

Úvod

V aplikované části studia principů moderního optického zobrazování v rámci předmětu „Praktikum z moderních zobrazovacích metod“ se studenti seznámí s několika průmyslovými mikroskopy navrženými jak pro použití v polovodičovém oboru tak použitelných v řadě jiných materiálových nebo biologických aplikací.

Aby student získal praktickou představu o základním fungování optického mikroskopu, absolvuje nejdříve část úloh na optických lavicích, kde si sám nebo ve dvojicích sestaví příslušné optické přístroje ve zjednodušeném provedení pomocí základních zobrazovacích prvků (čochy, clony, štěrby, polarizátory, ...). V tomto prvním „teoreticko-konstrukčním bloku“ A jsou obsaženy konkrétně 3 úlohy probíhající v praktiku školních pokusů, kde cílem studenta je osvojit si a vyzkoušet základy fyzikálně optických metod používaných u profesionálních mikroskopů.

Následně studenti zamíří do aplikované laboratoře mikroskopie na ÚFKL s řadou několika jak starších tak moderních mikroskopů, sloužících pro aplikace hlavně v materiálovém výzkumu. Cílem studenta v tomto „pozorovacím bloku“ B je osvojit si práci u profesionálních mikroskopů, naučit se a fyzikálně porozumět speciálním zobrazovacím technikám používaných ve fyzice pevných látek a biologii.

Aplikační blok C slouží studentům pro seznámení s aplikacemi mikroskopie při výrobě polovodičových součástek a integrovaných obvodů, který probíhá převážně v laboratoři čistých prostor na ÚFKL. V rámci tohoto bloku si studenti vyzkouší a osvojí práci s průmyslovými zobrazovacími přístroji pro výrobu polovodičových čipů uvnitř bezprašných místností, kde se také seznámí s pravidly práce v takovýchto laboratořích.

Jako volitelná součást výuky jsou pak aplikační bloky D a E, v rámci nichž proběhne exkurze u atomového silového mikroskopu a skenovacího elektronového mikroskopu. Následně se studenti seznámí se základy rentgenové radiografie.

Studenti splní během semestru všechny úlohy a budou se věnovat experimentům podle vlastního návrhu. Studenti odevzdají z vybraných úloh z bloku A stručnou zprávu v rozsahu maximálně 2 stránek A4, která bude obsahovat optická schémata, popis a výsledky pozorování. V rámci bloku B u vybraných úloh sestaví z mikrofotografií s měřítkem prezentaci, která bude obsahovat stručný popis principu pozorovaných jevů.

1. Principy optických přístrojů – Teoreticko-konstrukční blok A

Studijní materiály viz přednáška „Principy moderních optických zobrazovacích metod (FD010)“ nebo starší zdroj <http://www.physics.muni.cz/~kubena/PDF/Modmetv78.pdf>.

Seznam úloh na optické lavici:

- 1.1. Studium principů optických mikroskopů v projekčním uspořádání (meziobraz, polní čočka, temné pole s rovnoběžným a divergentním osvětlením preparátu).
- 1.2. Studium principů polarizačního mikroskopu (polarizátory, polarizace odrazem, jednostupňový polarizační mikroskop, průchod světla přes tlustý dvojlomný preparát, vznik interferenčního kontrastu na tenkém dvojlomném preparátu).
- 1.3. Koherenční vlastnosti světla a interference (jednoduchý optický difraktograf, interference na dvojtěrbíně, mřížce, na tenkých vrstvách, na planparalelním skle, Newtonových sklech – laserové světlo, bílé světlo).

Doporučená literatura:

1. G. Schröder, Technická optika, SNTL Praha 1981.
2. J. Kuběna, Úvod do optiky, Masarykova univerzita, Brno 1994.
3. J. Fuka, B. Havelka, Optika — fyzikální kompendium, SPN Praha 1961.
http://www.opto.cz/fuka_havelka/

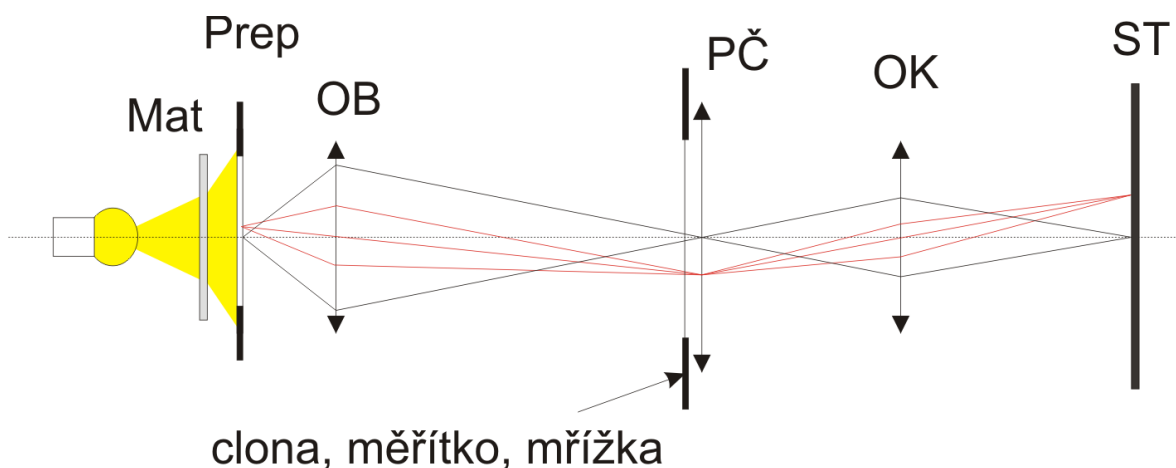
1.1. Studium principů optických mikroskopů (meziobraz, polní čočka, temné pole s rovnoběžným a divergentním osvětlením preparátu)

Než přistoupíte k úkolům tohoto bloku, zamyslete se (kromě teoretické přípravy na jednotlivé úlohy) nad následujícími zdánlivě triviálními otázkami (odpovědi si můžete prakticky ověřit na optické lavici):

- jak získat ostrý obraz předmětu na lavici dané délky, jak zajistit, aby byl tento obraz zvětšený (zmenšený)
- kam vkládat clony, aby nezpůsobovaly vinětaci
- jak správně osvětlit preparát, jaký je vliv matnice na osvětlení preparátu a kdy je a kdy není vhodné matnici používat
- jak získat rovnoběžný svazek, jaké čočky a jaký zdroj používat

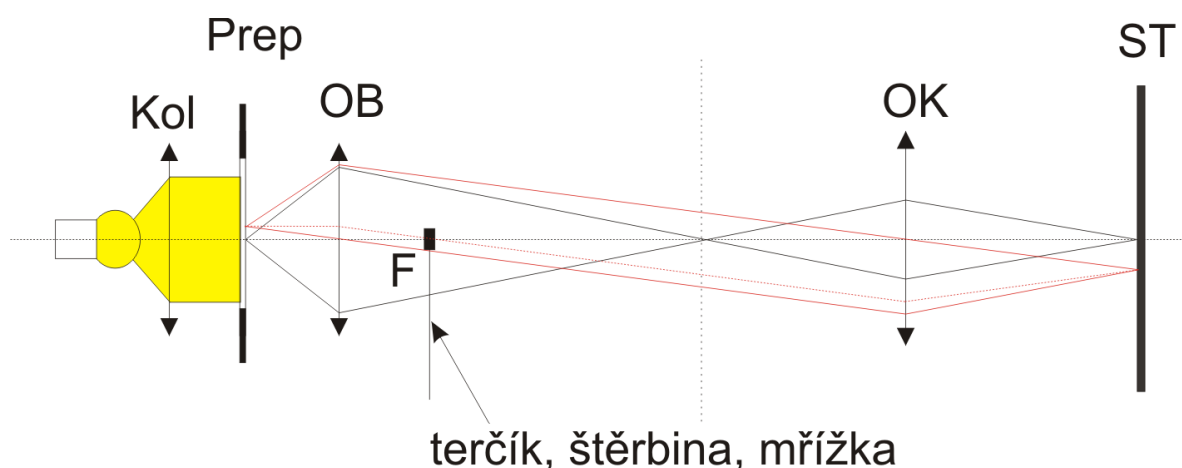
Mikroskop s polní čočkou:

1. Při osvětlení absorbujícího preparátu použijte matnici (proč?). Pomocí objektivu 2.8/75 mm vytvořte ostrý meziobraz ve vzdálenosti přibližně 70 cm od čočky. Tento meziobraz zobrazte čočkou o ohniskové vzdálenosti 30 cm na stínítko.
2. Použijte polní čočku (ploskovypuklá čočka velkého průměru $f \sim 10$ cm), vložte ji do roviny meziobrazu. Jak zkontrolujete, že rovina meziobrazu leží v hlavní rovině polní čočky? Polohu polní čočky případně jemně zkorigujte.
3. Do roviny meziobrazu vkládejte clony, případně měřítko. Prozkoumejte, zda se tyto předměty zobrazují ostře.
4. Změřte zvětšení objektivu, okuláru a celého mikroskopu, ověřte správnost výsledků.
5. Určete zvětšení zorného pole po vložení polní čočky vůči situaci, kdy mikroskop polní čočku neobsahuje.
6. Zamyslete se nad vlastnostmi polní čočky. Bylo by možné tuto čočku nahradit při stejném objektivu a okuláru jinou čočkou anebo by bylo nutné zaměnit i objektiv a okulár?



Metoda temného pole:

1. Připravte si koherentní osvětlení preparátu (jakou čočku je nevhodnější použít na vytvoření rovnoběžného svazku?).
2. Preparát (kapka laku na sklíčku) vložte do držáku tak, aby se uprostřed zorného pole objevila hrana preparátu. Tu pak pomocí objektivu a okuláru zobrazte na stínítku.
3. Preparát vyjměte z držáku, do ohniska objektivu umístěte terčik. Vytvořte na stínítku světlé a temné pole.
4. Preparát vložte zpět do držáku a prohlédněte si jej ve světlém a temném poli. Chcete-li přeostrřit na jinou rovinu preparátu, musíte pohybovat čočkou anebo preparátem? Vysvětlete existenci temných míst na preparátu ve světlém poli a světlých míst na preparátu ve světlém poli.
5. Je při této metodě vhodné používat nekoherentní osvětlení pomocí matnice? Úvahu můžete ověřit experimentem.
6. Zájemci si mohou v temném poli prohlédnout i otisk palce či jiný preparát, který si přinesou.
7. Použijte jako preparát v zobrazení temného pole drátěnou mřížku.
8. Vložte do ohniska objektivu místo terčíku otočnou štěrbinu. Jak se změnil obraz na stínítku? Pozorujte obraz v závislosti na šířce otvoru štěrbiny a jeho otočení. Interpretujte výsledky pozorování na základě Abbeovy teorie zobrazování.



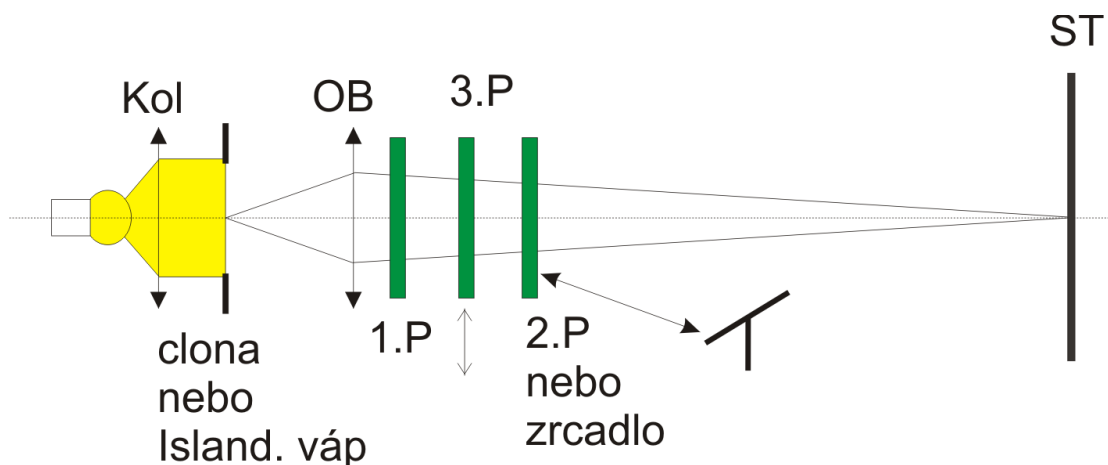
1.2. Studium principů polarizačního mikroskopu (polarizátory, polarizace odrazem, jednostupňový polarizační mikroskop, průchod světla přes tlustý dvojlomný preparát, vznik interferenčního kontrastu na tenkém dvojlomném preparátu)

Před řešením tohoto bloku se zamyslete nad následujícími zdánlivě jednoduchými otázkami:

- jakým způsobem může docházet k polarizaci světla
- kde se efekt polarizace používá v běžném životě aniž bychom si to na první pohled uvědomovali

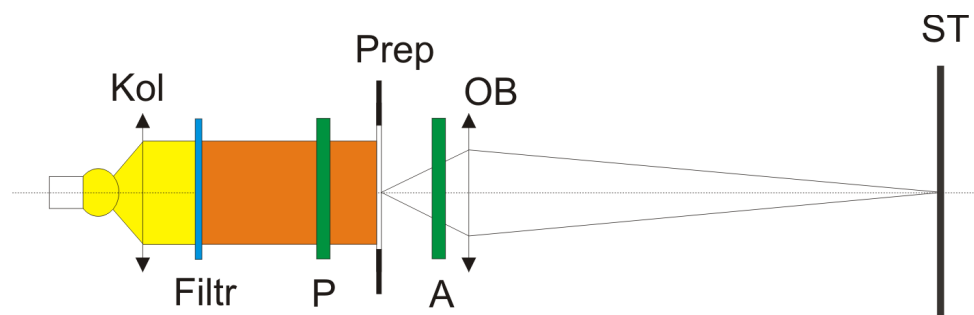
Funkce polarizačních filtrů, polarizace odrazem a dvojlomem:

1. Na optické lavici vytvořte rovnoběžný svazek paprsků čočkou $f \sim 15$ cm. Do svazku vložte irisovou clonu a zobrazte ji projekční čočkou $f \sim 6$ cm na stínítko.
2. Do svazku vložte polarizační filtr a otáčejte jím. Vysvětlete výsledek experimentu.
3. Do svazku vložte druhý polarizační filtr. Filtry otáčejte tak, aby směry propustnosti vektoru elektrické intenzity obou filtrů svíraly různé úhly. Vysvětlete výsledky pozorování.
4. Polarizační filtry nastavte tak, aby směry propustnosti svíraly pravý úhel. Mezi tyto filtry vložte třetí filtr. Vysvětlete pozorování. Třetí filtr vyjměte a vložte jej znovu tak, aby a) soustavou neprocházelo světlo, b) soustavou procházelo co nejvíce světla.
5. Polarizujte světlo odrazem. Na stropě vytvořte po odrazu na skleněné destičce obraz irisové clony, najděte Brewsterův úhel. Jak musíte nastavit polarizační filtr, který vložíte do svazku dříve, než se svazek odrazí na destičce, aby bylo hledání úspěšné? Ověřte, že světlo odražené pod Brewsterovým úhlem je lineárně polarizované. Pokud použijete místo skleněné destičky kovové zrcadlo, bude pokus úspěšný?
6. Prozkoumejte vlastnosti krystalu islandského vápence. Krystal vložte na do svazku v uspořádání podle bodu 1) na stejný stojan jako irisovou clonu. Určete, který ze svazků na stínítku odpovídá řádnému a který mimořádnému paprsku. Ověřte, že polarizace řádného a mimořádného paprsku jsou na sebe kolmé. Proč nedochází k interferenci řádného a mimořádného svazku?



Polarizační mikroskop:

1. Sestavte polarizační mikroskop (přidejte do předchozího uspořádání polarizátor a analyzátor s rovnoběžnými směry propustnosti, jako preparát použijte tenkou dvojlomnou látku, například destičky různé tloušťky ze sádrovce anebo lepící pásku, osvětlete monochromaticky přes červený filtr).
2. Proč nastává interference? Proč je pro ni nutné použít oba polarizační filtry?
3. Otáčejte oběma filtry tak, že směry jejich propustnosti zůstanou rovnoběžné. Vysvětlete, proč při určitých polohách filtrů je interference velmi dobře viditelná a při jiných nenastává.
4. Nastavte filtry do polohy, v níž je interference velmi dobře viditelná, a poté otočte jedním z nich o 90° . Vzniklý jev vysvětlete.
5. Všechny experimenty je možné provádět i v bílém světle.
6. Pozorujte takto řadu různých preparátů – vzorky minerálů, lepící pásky, elektronické displeje. Studujte polarizační odezvu v materiálu v závislosti na různém mechanickém pnutí.



1.3. Koherenční vlastnosti světla a interference (jednoduchý optický difraktograf, interference na dvojštěrbině, mřížce, na tenkých vrstvách, na planoparalelním skle, Newtonova skla – laserové světlo, bílé světlo)

Než začnete provádět pokusy s interferencí světla, rozmyslete si:

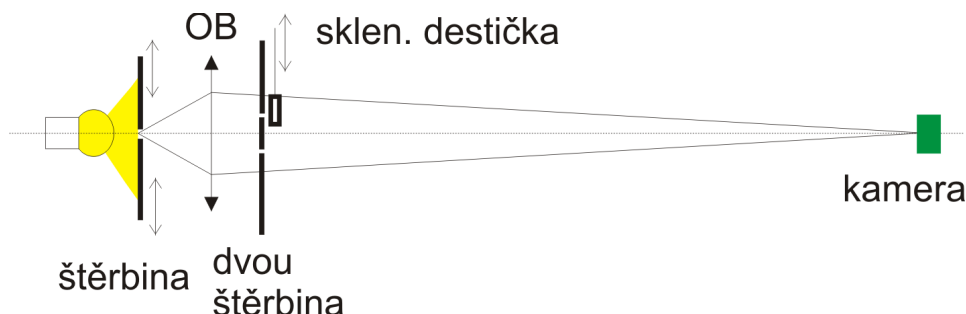
- co je to vůbec interference a difrakce
- za jakých podmínek může k interferenci nebo difrakci docházet
- kde můžeme interferenci běžně pozorovat, zkuste si vzpomenout alespoň na tři jevy ze života

Interference a difrakce v laserovém světle:

1. Pomocí laserového světla realizujte interferenci na dvojštěrbině (Youngův pokus). Proveďte geometrická měření a určete vzdálenost vrypů dvojštěrbiny.
2. Pomocí laserového světla a mřížky se známou mřížkovou konstantou se pokuste určit vlnovou délku laserového světla. Odhadněte chybu měření, výsledek porovnejte s údajem výrobce laseru.
3. Pomocí laserového světla, rozptylky a tenké skleněné destičky realizujte interferenci na této destičce na odraz. Je možné z obrazce odhadnout rovnoběžnost obou stěn destičky? V případě zájmu můžete realizovat interferenci na plátku slídy.
4. Pozorujte difrakční obrazce na různých strukturách (mřížky, sítky, hologramy apod.) v laserovém světle, pokuste se vysvětlit tvar obrazců.

Youngův pokus v bílém světle:

1. Sestavte experiment bez čoček (zdroj, štěrbina, dvojštěrbina), pozorujte obrazec pouhým okem na vzdáleném stínítku.
2. Sestavte experiment, použijte jednoduchý difraktograf (zdroj, štěrbina, čočka $f \sim 20$ cm zobrazující obraz štěrbiny na stínítku, dvojštěrbina, případně mřížky místo ní). Jaké jsou výhody a nevýhody tohoto přístupu?
3. Sestavte experiment bez čoček, k pozorování použijte digitální kameru. POZOR na zahlcení čipu světlem velké intenzity!!! V tomto uspořádání demonstруйте pojmy koherenční délka (pokus se zakrýváním štěrbin dvojštěrbiny sklíčkem – vymizení obrazce) a koherenční šířka (pozorování tvaru obrazce při změně šířky zdrojové štěrbiny anebo vzdálenosti od štěrbiny, odhad šířky, při které nastane první vymizení interference, výpočet koherenční šířky pro tento případ).



Interference dělením amplitudy:

1. Bílým světlem osvětlíte Newtonova skla, zobrazte je zároveň na odraz i na průchod (skla musí být orientována šikmo vůči optické ose, například pod úhlem 45° , rozmyslete si, jakou ohniskovou vzdálenost musí mít čočka, kterou zobrazujete skla na odraz).
2. Vysvětlete, proč je interferenční obrazec lépe viditelný na odraz než na průchod.
3. Vysvětlete, proč nedochází k interferenci na celé ploše skel (jak by toho šlo dosáhnout?).
4. V případě zájmu můžete experiment zopakovat s mýdlovou blánou (použijte determnální sklo, které vložíte před zdroj).

Volitelné úlohy čili další náměty pro práci v laboratoři

- Proveďte demonstraci filtrace prostorových frekvencí pro vhodný preparát, jev vysvětlete.
- Vymyslete způsob, jak změřit, kolik procent intenzity světla projde polarizačním filtrem, dvojicí, trojicí, ... vzájemně různě natočených polarizačních filtrů. Naměřené výsledky porovnejte s teoretickou předpovědí.
- Pomocí polarizovaného světla zviditelněte namáhání ve vhodných průhledných předmětech (kromě vzorků v laboratoři jsou vhodné i předměty denní potřeby, které vznikly odléváním či lisováním).

2. Práce s mikroskopy – Pozorovací blok B

Studijní materiály viz původní dokumentace mikroskopů a návody k obsluze v laboratoři.

Seznam úloh práce s profesionálními mikroskopy:

- 2.1. Zobrazení nekонтastního preparátu v režimu světlého pole a temného pole na odraz na mikroskopu Zeiss E. Zobrazení reliéfu povrchu krystalického preparátu Nomarského kontrastem (vzorek křemíku s naleptanými dislokacemi). Stanovení zvětšení digitálních mikrofotografií.
- 2.2. Práce s interferenčním mikroskopem Zeiss Peraval. Nastavení interferometru na vytvoření homogenního zorného pole a na vytvoření interferenčních proužků v bílém a monochromatickém světle, pozorování nerovného povrchu preparátu, vliv rozštěpení obrazu na kontrast, vliv šířky štěrbinového zdroje. Pozorování odpařování kapek vody. Měření tloušťky tenké vrstvy.
- 2.3. a) Zobrazení dvojlomných preparátů polarizačním mikroskopem na průchod (dvojlomné preparáty mineralogické, dvojlomná vlákna, deformace PE folie).
b) Metoda světlého pole u stereomikroskopu. Prohlídka čipů integrovaných obvodů, světelné diody a biologických preparátů.

2.1. Profesionální projekční mikroskop Zeiss E2

Úkoly:

1. Zvětšení digitálních mikrofotografií: Nastavíme mikroskop na režim světlé pole, zobrazíme skleněné pravítko objektivem $5\times$, u fotoaparátu použijeme maximální zvětšení. Obraz ostříme podle monitoru.
 - a) Zkopírujeme mikrosnímek do počítače.
 - b) Zjistíme kolik pixelů N ($5\times$) odpovídá vzdálenosti 1 mm.
 - c) Obdobně jako v a) a b) vytvoříme tabulku počtu pixelů pro objektivy $5\times$, $10\times$, a $20\times$.
2. Na skleněné pravítko otiskneme prst a při vhodném zvětšení uděláme snímek téhož otisku v režimu světlé a temné pole. Proměříme charakteristickou velikost potních kapiček pro různá zvětšení.
3. Nastavíme režim Nomarského kontrastu a při objektivu $20\times$ pořídíme snímek potních kapiček na skle. Všimneme si směru zdánlivého osvětlení kopečků potu.
4. Zobrazíme reliéf povrchu křemíku, uděláme snímek dislokačních důlků uspořádaných do skluzových směrů (okraj vzorku).
5. Zobrazíme reliéf povrchu čipu integrovaného obvodu s metalizací a bez metalizace po selektivním leptání na zviditelnění dislokací. Při objektivu $20\times$ zobrazíme dislokační smyčky a vrstevné chyby uspořádané do dvou na sebe kolmých směrů.
6. Na vzorku polykrystalického křemíku se přesvědčíme o existenci schodku o výšce asi 100 nm mezi kruhovým jádrem a okolním krystalem. Použijeme Nomarského kontrast a objektiv $20\times$.

Detailní popis ovládání mikroskopu:

Projekční mikroskop Zeiss E je vyroben speciálně pro použití během různých pracovních procesů během mikro-elektronické výroby. Vizualní kontrola v polovodičové technologii při výrobě mikročipů je nezbytná pro uchování kvality konstrukčních prvků integrovaných obvodů. Variabilní konstrukce mikroskopu však umožňuje jeho použití i v mnoha jiných aplikacích, které využívají osvětlení na odraz nebo na průchod.

Projekční Mikroskop Zeiss E pochází z období okolo roku 1979 a byl vyroben, podobně jako mnoho dalších mikroskopů situovaných v mikroskopické laboratoři, v tehdejší NDR v podniku Carl Zeiss Jena. V té době optická kvalita zobrazovacích přístrojů dosahovala prakticky špičkové kvality a od té doby se dnešní vyráběné mikroskopy zkvalitnily jen především díky dokonalejší elektronice než díky výraznější optické kvalitě. I tento mikroskop byl během mnoha let v laboratoři částečně zmodernizován a doplněn. Původní mikroskop obsahoval projekční nástavec, který je dnes nahrazen digitálním fotoaparátem připojeným k monitoru. Mikroskop jako celek se nachází na pracovním stole, který zahrnuje většinu elektrického příslušenství, viz fotografie 2.1 a 2.2. Zobrazení světlého pole, temného pole a Nomarského kontrastu byly časem rozšířeny také o možnost zobrazení v polarizačním kontrastu.

Základními součástmi projekčního mikroskopu Zeiss E jsou nastavitelný binokulár 1, sada čtyř objektivů ($5\times$, $10\times$, $20\times$ a $50\times$) 2, polohovatelný průhledný stolek s možností x-y posuvu a rotací preparátu 3, podstavec se zdrojem osvětlení na průchod 4 a xenonová výbojka vzadu pro osvětlení na odraz. Tubus s polní čočkou 5 a digitální fotoaparát s výstupem do TV monitoru 23 jsou umístěny v horní části mikroskopu v pozici původně určené pro projekční zařízení, viz schéma na obr. 2.3.

Před použitím celý systém zapneme hlavním síťovým spínačem 7 (fotoaparát a TV monitor se zapínají zvlášť). Při pozorování v režimu na odraz musíme zapnout napájení xenonové výbojky spínačem 9 a nastartovat ji tlačítkem 11. V případě použití spodního osvětlení na průchod je potřeba uvést do provozu základnu mikroskopu 4 spínačem ve spodní části stolu 12 a zapnout zdroj tlačítkem 15. Použití jemného posuvu stolku pro vzorek je také podmíněno spínačem 12 a poté spínačem 16.

Mikroskop umožňuje jemnou a hrubou navigaci vzorku pomocí elektromagneticky vázaného křížového stolu s rotací, přičemž posuv se reguluje tlačítka 17–21 a ovládá šrouby 27–28, viz obr. 2.2. Kolečko 19 s tlačítkem slouží k jemnému motorickému doostřování, které ovšem není v současnosti v provozu. Hrubé zaostřování se provádí otočným knoflíkem v pozadí stojanu 31.

Částečné optické uspořádání mikroskopu je znázorněno na obr. 2.3. Jako světelný zdroj pro osvětlení na odraz slouží xenon-vysokotlaká výbojka XB150. Asférickým kolektorem je zobrazeno ohnisko a jeho zrcadlový obraz provedený dutým zrcadlem do roviny ústí aperturní clony, intenzitu světla ovládáme tedy regulací 36.

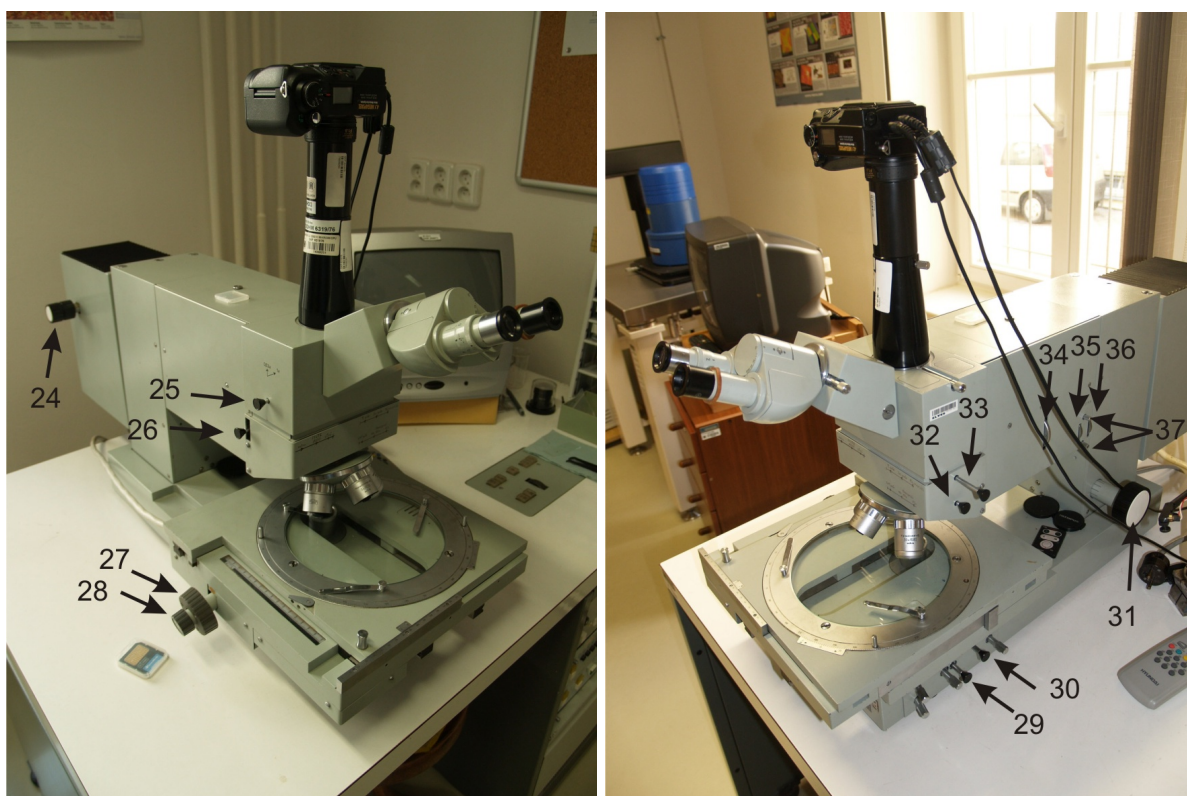


Obrázek 2.1. Základní přehled součástí mikroskopu a několika jeho ovládacích prvků: 1. binokulár, 2. sada objektivů, 3. posuvný stolek, 4. základna mikroskopu s osvětlením na průchod, 5. tubus s polní čočkou, 6. digitální fotoaparát, 7. hlavní síťový spínač, 8. rezervní spínač, 9. spínač xenonové výbojky, 10. počítadlo hodin provozu xenonové výbojky, 11. zapalovací tlačítko xenonové výbojky, 12. hlavní spínač základny mikroskopu, 13. spínač pohybu stínítka, 14. spínač svítidla na kloubovém rameni, 15. spínač svítidla pro osvětlení na průchod, 16. spínač ovládní posuvného stolku, 17. tlačítko pro jemné nastavení x-posuvu, 18. tlačítko pro jemné nastavení y-posuvu, 19. kolečko pro zaostření jemného převodu, 20. tlačítko pro aretaci x-posuvu, 21. tlačítko pro aretaci y-posuvu, 22. tlačítko pro rychlost fokuse.

Podle Köhlerova principu je vedlejší clona světelného pole, regulace velikosti viditelné plochy 35, následující achromatické čočky zobrazena nejdříve do nekonečna. Po částečném odrazu osvětlovacích paprsků na polopropustném zrcadle umístěném nad objektivy se však tato clona zobrazí po průchodu daným objektivem na pozorovaný objekt. Aperturní clona je zároveň zobrazena achromatickou čočkou do výstupní pupily objektivu. V optické dráze se také nacházejí barevné 34 a šedé filtry 26. V režimu na průchod měníme filtry osvětlení pomocí šoupátka v základně mikroskopu 29. Obraz z preparátu prochází zpět daným objektivem přímo přes polopropustné sklo a tubusovou čočku do okuláru nebo do oblasti, kde je umístěno projekční zařízení nebo digitální fotoaparát.

V případě pozorování v režimu temného pole je osvětlení preparátu realizováno polopropustným zrcadlem kruhového tvaru s tmavým terčem uprostřed, během zobrazení ve světlém poli je toto zrcadlo nahrazeno polopropustným sklem. V režimu zobrazení, interferenční Nomarski kontrast, je na polopropustné sklo zařazen navíc pevně orientovaný polarizátor, k němu Wollastonův hranol k diferencovanému rozštěpení obrazu a nad to analyzátor. Přepínání jednotlivých zobrazovacích režimů se děje pomocí šoupátka 33, přičemž při Nomarskiho kontrastu je také třeba nastavit ten správný Wollastonův hranol šoupátkem 32 za účelem správného rozdělení obou paprsků.

Před pozorováním v dopadajícím světle v režimu světlého pole je vhodné provést několik kontrolních nastavení. Clonu světelného pole otáčením rýhového kotouče 35 uzavřít tak, že se její obraz objeví v zorném poli mikroskopu. V případě nutnosti je vhodné ji vycentrovat středícími šrouby 37 a znovu otevřít tak že okraje clony zmizí. Aperturní clonu otáčením rýhového kotouče 36 plně otevřeme. Tuto clonu je vhodné mít mírně zavřenou jen ve zvláštních případech, kdy je důležité zvýšení hloubky ostrosti obrazu nebo pro vylepšení kontrastu. Pokud situace vyžaduje použití barevného filtru (vysoká intenzita, nevhodný kontrast) nastavíme jej rýhovým kotoučem 34. U některých filtrů je intenzita již natolik nízká, že je potřeba povytáhnout táhlo se šedými filtry 26. Preparát zaostřujeme otočným knoflíkem na stojanu mikroskopu 31, přičemž u objektivů s největším zvětšením musíme dbát na dostatečnou vzdálenost objektivu od preparátu, tak aby nedošlo ani



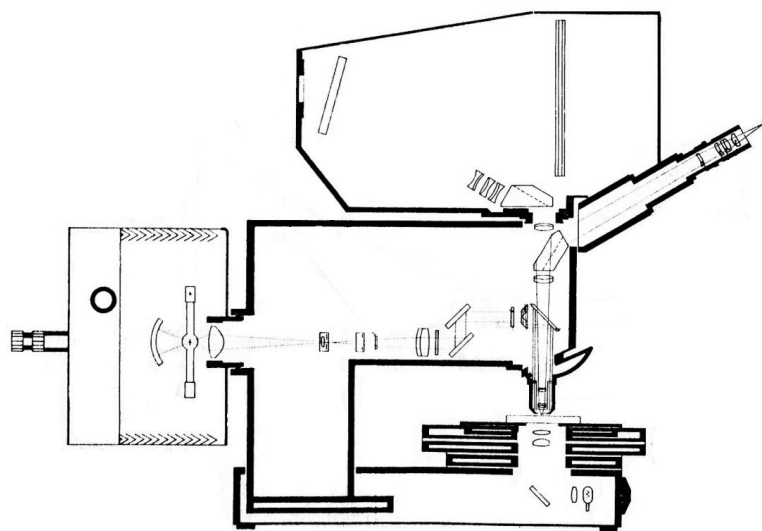
Obrázek 2.2. Přehled dalších ovládacích prvků mikroskopu: 24. středovací šrouby pro xenonovou vysokotlakou výbojku XBO150, 25. táhlo pro převedení obrazu z okuláru do fotoaparátu, 26. táhlo pro vložení šedých filtrů různé propustnosti, 27. posun x – vedení stolku, 28. posun y – vedení stolku, 29. táhlo pro vložení filtru dolního osvětlení, 30. táhlo pro širokoúhlou čočku, 31. zaostřování – vertikální posuv mikroskopu, 32. táhlo pro Wollastonovy hranoly, 33. táhlo pro změnu zobrazovacího režimu, 34. kotouč pro změnu barevného filtru, 35. kotouč pro změnu clony světelného pole, 36. kotouč pro změnu aperturní clony, 37. středící šrouby pro nastavení clony světelného pole.

k poškození objektivu ani k poškození preparátu, a to obzvláště při přechodu do jiného místa pozorovaného objektu.

Během pozorování v dopadajícím světle v režimu temného pole, které přepneme zasunutím táhla 33 dovnitř, bychom měli nejdříve plně otevřít clonu světelného pole a aperturní clonu rýhovými kotouči 35 a 36 a kotouč filtrů 34 nastavit na volný průchod. Šoupátko šedého filtru 26 pak zcela vysunout na volný průchod, čímž zajistíme maximální intenzitu světla během pozorování. Další manipulace jsou totožné s režimem světlého pole.

Metoda interferenčního kontrastu podle Nomarskiho s rozdílným rozštěpením obrazu polarizačně-optickými pomocnými prostředky se osvědčuje při zobrazení velmi malých povrchových nerovností, zejména rozdíly výškového nebo lomového indexu na povrchu čipů. Na projekčním mikroskopu E2 to bývá realizováno pro planachromatické objektivy HD 10×, HD 20×, HD 50× a HD 100×. K tomu jsou nezbytné dva Wollastonovy hranoly, které jsou uspořádány na stejném šoupátku 32. Jsou pevně justovány, takže vycházející rozdíl dráhy paprsků je asi 70 μm ($\lambda/8$). Při přechodu k pozorování v dopadajícím světle v režimu interferenčního kontrastu je potřeba táhlo iluminátoru pro interferenční kontrast 33 (obsahuje polarizátor a analyzátor) vytáhnout do dráhy paprsku. Dále je nutné správný Wollastonův hranol s táhlem 32 zasunout do dráhy paprsku. Při použití planachromátu HD 10×, HD 20× a HD 100× se jedná o středovou polohu a pro HD 50× je táhlo 32 úplně vysunuto. Při přechodu zpět ke světlému nebo tmavému poli je třeba táhlo zasunout zpět zcela dovnitř.

Před pozorováním v prošlém světle v režimu světlého pole je nezbytné zapnout navíc síťový vypínač pro základnu mikroskopu 12 a halogenovou žárovku pod stolkem mikroskopu pro osvětlení na průchod spínačem 15. Po uložení preparátu na skleněný stolek, nastavení x-y polohy a azimutu φ zasuneme táhlo 33 do střední polohy světlého pole a táhlo 32 úplně zasuneme tak, aby v cestě nebyl žádný Wollastonův hranol. Nastavíme



Obrázek 2.3. Konstrukční schéma projekčního mikroskopu Zeiss E.

objektiv planchromat HD 20. Vytáhneme táhlo 30 s širokoúhlou čočkou a otáčíme rýhovaným držadlem vedle tohoto táhla proti směru hodinových ručiček až uzavřeme clonu světelného pole. Rýhovaným držadlem na druhé straně dále od pozorovatele zaostříme kondenzor až je clona světelného pole ostře zobrazena. Otáčením dvou středovacích šroubů můžeme centricky vyrovnat clonu světelného pole. Clonu světelného pole pak ve směru hodinových ručiček lehce otevřeme tak, až její obraz ze zorného pole zmizí. V případě potřeby zapneme tlumicí filtr D282 nebo zelený filtr VG52 táhlem 29. Během tohoto nastavení je potřeba vyklonit objektiv, aby bylo možné pozorovat stopu osvětlení na skle pozorovacího stolku. V případě práce s objektivy s nízkým zvětšením HD5× a HD10× je nutné zapnout širokoúhlou čočku zasunutím táhla 30 a otevřít clonu světelného pole. Ostatní nastavení zůstávají zachována.

Pro některé práce s mikroskopem je vhodné použít pozorování ve smíšeném světle v režimu světlého pole, kdy se při osvětlení na průchod používá dodatečně osvětlení horním dopadajícím světlem. Nastavení osvětlení na průchod se provede podle předchozího odstavce a poté zapneme dodatečně horní osvětlení tak, jak bylo popsáno v předchozích odstavcích. Musí být v činnosti spínače 7 a 8 a táhla 32 a 33 musí být v poloze světlého pole bez Wollastonových hranolů. Pro lepší kontrast se doporučuje použití barevných filtrů jednak pro horní i spodní osvětlení.

V rámci rozšíření pozorovacích možností mikroskopu Zeiss E byla optická dráha v režimu osvětlení na průchod rozšířena navíc o polarizátor, umístěný pod sklem stolku na poslední čočce dolního osvětlení, a o analyzátor volitelně situovaný ve výstupu obrazu pro projekční zařízení pod tubusem 5 s digitálním fotoaparát. Vložení jednoho ze sady polarizačních filtrů (analyzátor), viz obr. 2.4, mezi tělo mikroskopu a



Obrázek 2.4. Sada polarizačních filtrů pro použití s mikroskopem Zeiss E.

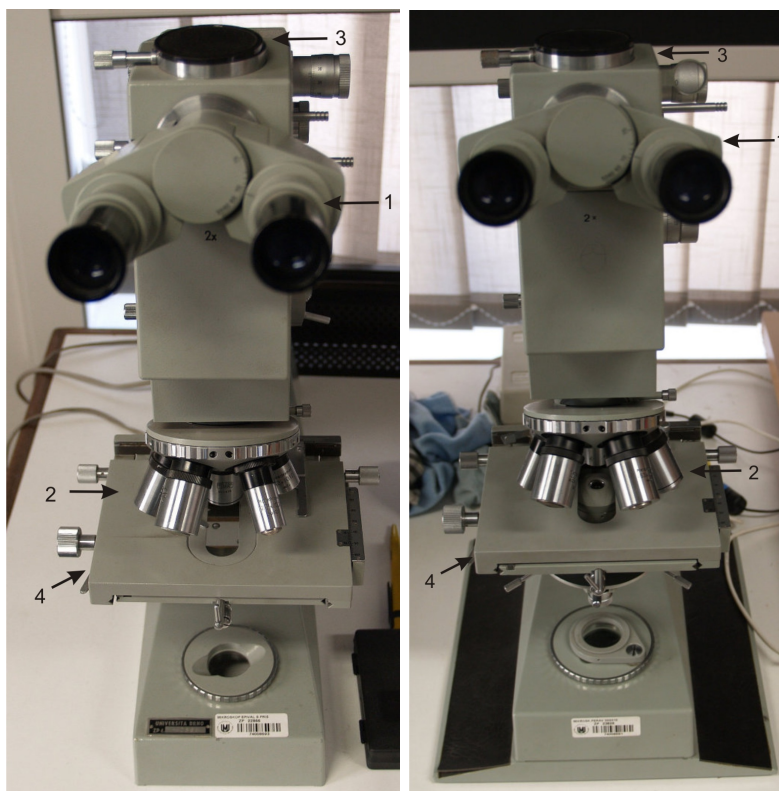
2.2. Interferenční mikroskopy Peraval (na průchod) a Epival (na odraz)

Úkoly:

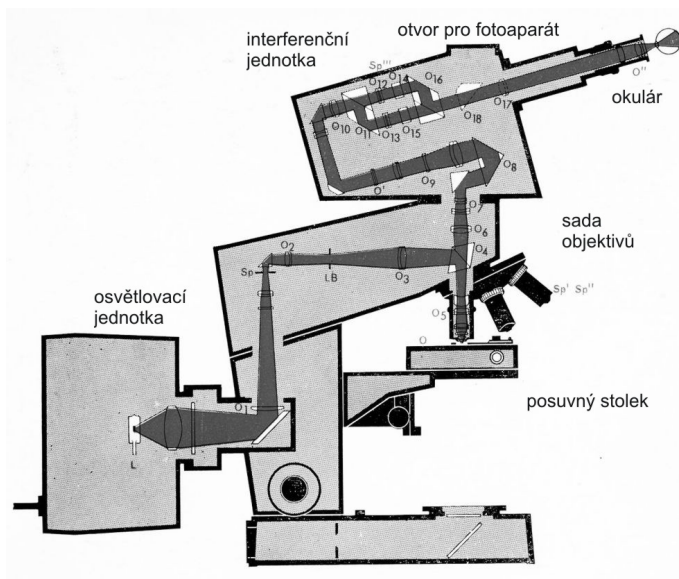
1. Mikroskopem Peraval zobrazíme např. prachové částice na sklíčku a seznámíme se s ovládacími prvky: rozštěpení obrazů, náklon vlnoploch v jednom a druhém směru, retardační destička na změnu dráhového rozdílu mezi interferujícími vlnoplochami.
2. Nastavíme úzkou osvětlovací štěrbinu a nastavíme ovládacími prvky homogenně osvětlené pole. Retardační destičkou budeme měnit barvu zorného pole.
3. Homogenní pole využijeme na zobrazení hrany tenké průhledné vrstvy (tenká vrstva laku) při malém rozštěpení obrazů. Nyní nakloníme vlnoplochy tak, aby vznikly interferenční proužky. Všimneme si vlivu spektrálního složení a šířky štěrbinu na viditelnost interferenčních proužků (efekt časové a prostorové koherence interferujících svazků).
4. Nafotografujeme monochromatické proužky na hraně a pokusíme se určit tloušťku schodku na okraji tenké vrstvy.
5. Na sklíčku vytvoříme vhodnou kapku vody a budeme pozorovat její odpařování.
6. Prohlídka preparátů, které si student přinese (cibulová blána apod.).

Detailní popis mikroskopů:

Interferenční mikroskop Epival je určen pro pozorování mikroskopických preparátů v uspořádání na odraz. Interferenční mikroskop Peraval se od předchozího liší optickými prvky zajišťujícími pozorování v proslém světle na průchod. Uplatnění obou typů mikroskopů je především v mikroelektronice a biologii, kdy je žádoucí zvýraznění kontrastu na základě rozdílné fáze při interakci světla se vzorkem, ať už díky výškovým nerovnostem povrchu preparátu nebo různému indexu lomu jednotlivých struktur preparátu.



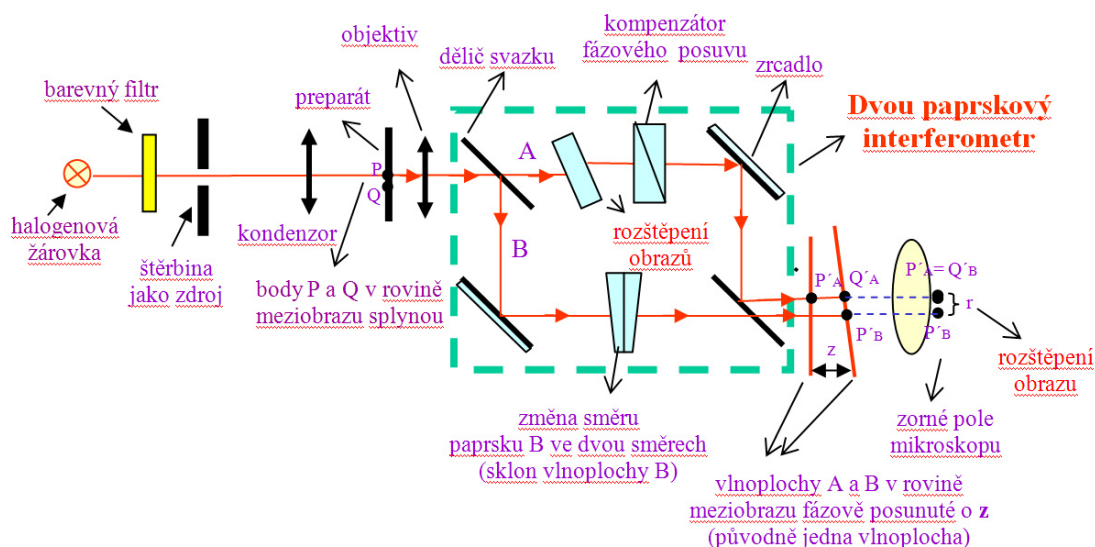
Obrázek 2.6. Základní přehled součástí mikroskopů Epival (vlevo) a Peraval (vpravo) a několika jeho ovládacích prvků: 1. binokulár, 2. sada objektivů, 3. promítací otvor pro digitální fotoaparát, 4. posuvný stolek.



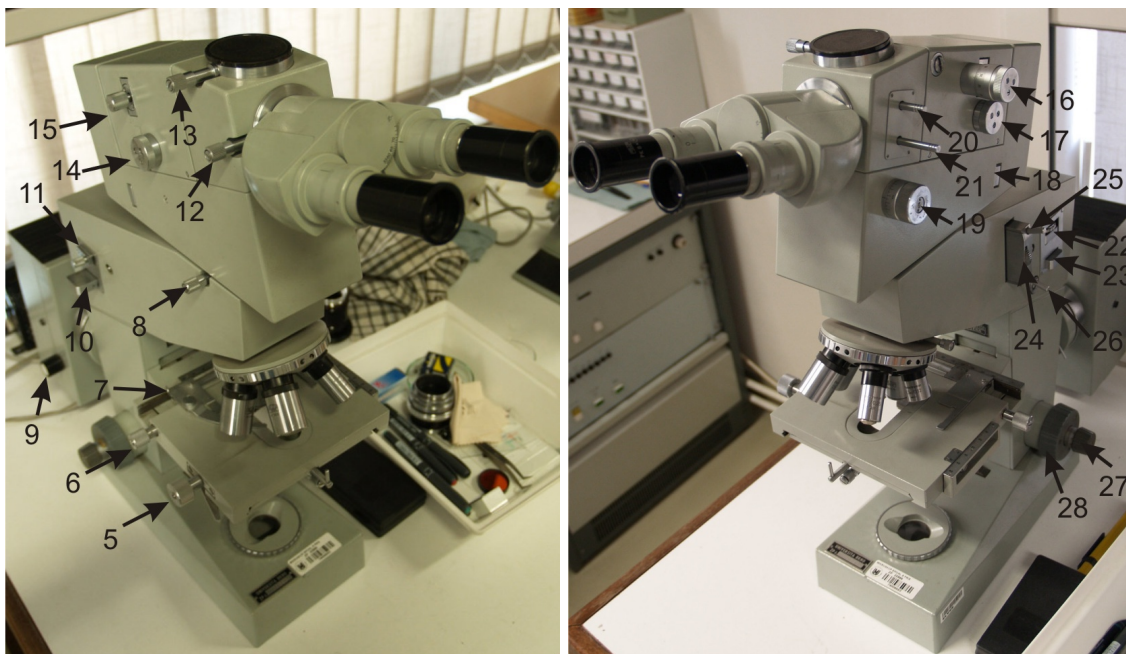
Obrázek 2.7. Konstrukční schéma projekčního mikroskopu Epival. Ve spodní části podstavce je připravený prostor pro uspořádání na průchod – mikroskop Peraval.

Interferenční mikroskopy Epival a Peraval pocházejí rovněž z období konce 70. let z výroby tehdejšího východoněmeckého závodu Carl Zeiss v Jeně. Optická kvalita zobrazovacích elementů tedy dosahuje odpovídající kvality. V poslední době byly tyto mikroskopy doplněny o digitální fotoaparáty (Olympus nebo Pentax) s možným výstupem na monitor. Mikroskopy jako celek se nachází na pracovním stole odděleně, a umožňují nezávislé pozorování, viz fotografie 2.6. Konstrukčně jsou oba mikroskopy velmi podobné, liší se pouze jednotkou pro osvětlování preparátu, budeme je tedy popisovat oba společně.

Základními součástmi interferenčních mikroskopů Zeiss jsou nastavitelný binokulár 1, sada čtyř objektivů ($5\times$, $10\times$, $20\times$ a $50\times$) 2, digitální fotoaparát s výstupem do TV monitoru umístěným na horním otvoru 3 a polohovatelný stolek s možností x-y posuvu 4, viz schéma na obr. 2.6. Velmi podstatnou součástí těchto mikroskopů je interferenční jednotka, umístěná v horní části tubusu a osvětlovací jednotka v zadní části mikroskopu, viz schéma na obrázku 2.7. Horní části mikroskopů Epival a Peraval jsou prakticky stejné a liší se pouze osvětlovací jednotkou s kondenzorem. Na obrázku 2.7 je vyobrazen mikroskop Epival, nicméně verze Peraval na průchod se liší pouze vedením optické cesty základnou mikroskopu, kdy navíc pod posuvným



Obrázek 2.8. Schéma dvoupaprskového interferometru.



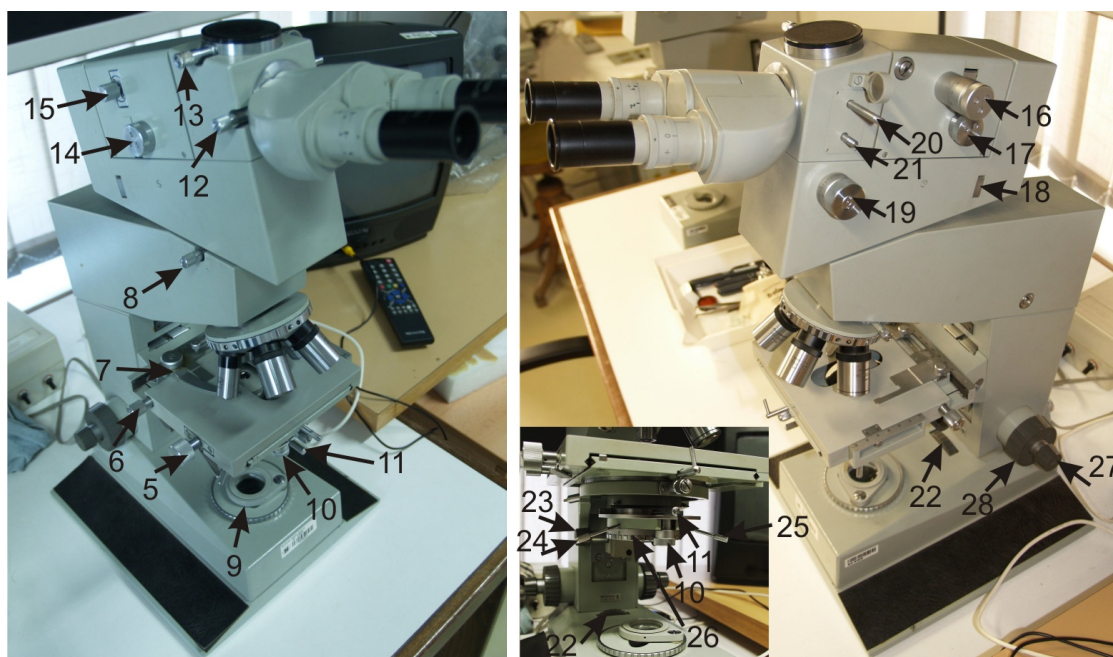
Obrázek 2.9. Přehled dalších ovládacích prvků mikroskopu Epival: 5. posun y – vedení stolku, 6. posun x – vedení stolku, 7. uchycení vzorku, 8. aretace těla interferometru, 9. zaostřování vlákna žárovky, 10. zásobník s filtry, 11. regulace štěrbin a mřížek, 12. aretace binokuláru, 13. aretace tubusu pro digitální fotoaparát, 14. nastavení směru interferenčních proužků horizontálně, 15. regulace rozštěpení obrazu posuvem, 16. regulace fázového posuvu, 17. nastavení směru interferenčních proužků vertikálně, 18. otvor pro dodatečný filtr, 19. regulace fokusace aperturní clony, 20. táhlo pro převedení obrazu z okuláru do fotoaparátu, 21. táhlo pro nastavení Bertrandovy čočky, 22. aperturní clona, 23. výměna štěrbin a mřížek, 24. regulace clony světlého pole, 25. středování clony světlého pole, 26. středování clony světlého pole, 27. jemné ostření, 28. hrubé ostření.

stolkem s preparátem jsou umístěny optické členy pro regulaci koherence osvětlení (kondenzor se štěrbinou a irisovou clonou). Detailní vyobrazení jednotlivých ovládacích prvků je uvedeno na fotografiích v obrázku 2.9 pro Epival a v obrázku 2.10 pro Peraval.

Před použitím mikroskopu celý systém zapneme hlavním spínačem vzadu na síťovém adaptéru, který slouží jako 12 V/6 V zdroj pro halogenovou lampu uvnitř osvětlovací jednotky. TV monitor a fotoaparát umístěný v horní části mikroskopu v otvoru 3 zapneme zvlášť. Než začneme provádět samotné pozorování je vhodné seřadit správně osvětlení preparátu ovládacími prvky umístěnými v blízkosti osvětlovací soustavy zaostřením a nastavením vlákna žárovky do správné polohy.

Vzhledem k tomu, že se jedná o interferenční mikroskop, který rozloží pozorovaný obraz na obrazy dva, u nichž můžeme samostatně regulovat jejich vlnoplochu, je vhodné na počátku nastavit ovládací prvky tak, aby byly obě vlnoplochy téměř rovnoběžné. Nastavení bychom měli provádět s umístěným vzorkem na pozorovacím stolku, abychom viděli rozštěpení obou obrazů jako referenci. Celý interferenční proces se odehrává v interferenční jednotce dvoupaprskového interferometru znázorněné na obrázku 2.8, kde je obraz rozdělen na dva paprsky, které pak mohou za určitých podmínek interferovat. Pokud tedy vidíme v mikroskopu obraz preparátu zdvojeně, je vhodné regulační prvky vlnoploch 14–17, viz pravá fotografie v obrázku 2.9 nebo v 2.10, nastavit tak, aby rozdvojené objekty splynuly. Paprsky pak budou rovnoběžné a v mikroskopu se nám přes obraz pravděpodobně přeloží interferenční proužky. Na levé straně regulujeme vertikální směr vlnoploch 14 a vzdálenost rozštěpení paprsků posuvem vertikálně 15. Na pravé straně regulujeme horizontální směr vlnoploch 17 a vzájemný fázový posuv obou obrazů 16. Ovládání tohoto dvoupaprskového interferometru je stejné u obou mikroskopů Epival a Peraval. Dále můžeme ovládat fokusaci aperturní clony regulátorem 19.

Po nastavení „nulové polohy“ interferometru můžeme dále šrouby 14–17 regulovat vzájemné rozložení paprsků a tím ovlivňovat podmínky pro interferenci a řídit tak rozložení kontrastu pozorovaného objektu. Podmínky pro vytvoření interference obou obrazů závisí ovšem také na koherenci dopadajícího osvětlení, kterou v případě interferenčních mikroskopů regulujeme optickými členy v kondenzoru, viz ovládací prvky



Obrázek 2.10. Přehled dalších ovládacích prvků mikroskopu Peraval: 5. posun y – vedení stolku, 6. posun x – vedení stolku, 7. uchycení vzorku, 8. aretace těla interferometru, 9. širokoúhlá čočka, 10. upevňovací šroub štěrbin v kondenzoru, 11. orientace a velikost štěrbin v kondenzoru, 12. aretace binokuláru, 13. aretace tubusu pro digitální fotoaparát, 14. nastavení směru interferenčních proužků horizontálně, 15. regulace rozštěpení obrazu posuvem, 16. regulace fázového posuvu, 17. nastavení směru interferenčních proužků vertikálně, 18. otvor pro dodatečný filtr, 19. regulace fokusace aperturní clony, 20. táhlo pro převedení obrazu z okuláru do fotoaparátu, 21. táhlo pro nastavení Bertrandovy čočky, 22. regulace clony světelného pole, 23. ostření kondenzoru, 24. středování aperturní clony kondenzoru, 25. středování aperturní clony kondenzoru, 26. aperturní clona kondenzoru, 27. jemné ostření, 28. hrubé ostření.

22–26. Regulace koherentního osvětlení se již u obou mikroskopů liší. V případě mikroskopu na průchod jsou umístěny pod posuvným stolem pro preparát (obrázek 2.10 vpravo) a v případě mikroskopu na odraz ve stojanu mikroskopu nad zaostřovacími šrouby 27–28 (obrázek 2.9 vpravo).

Mikroskop Epival na odraz má otočné lineární štěrbinu tři umístěné v zadní části stojanu mikroskopu 11 na výsuvném bloku, jehož polohou nastavíme patřičnou štěrbinu do cesty svazku. Směr těchto štěrbin pak nastavíme bočním šroubem na bloku. Nastavení aperturní clony je zde umístěno nad blokem se štěrbinami z pravé strany 22. Pod blokem se štěrbinami je další blok 10, kde je možné umístit barevné filtry pro pozorování v monochromatickém světle. Regulace clony světelného pole je umístěna v pravé části mikroskopu 26, jejíž polohu můžeme nastavit stavěcími šrouby 24–25.

Mikroskop Peraval na průchod má pod posuvným stolem umístěnou otočnou lineární štěrbinu jejíž šířku a směr můžeme měnit (10–11) a regulovat tak koherenci světla ozařující preparát. Vedle štěrbin je umístěna také aperturní clona 26 a čočka kondenzoru, jejichž polohu můžeme také nastavit regulátory 23–25. Světelné pole nastavíme regulátorem clony 22 a případně můžeme vložit do cesty osvětlení širokoúhlou čočku 9. Na širokoúhlou čočku je možno dále vkládat barevné filtry pro pozorování v monochromatickém světle.

Pro pozorování objektů v mikroskopu na monitoru je potřeba použít digitální zrcadlový fotoaparát, například Pentax K20, u něhož sejme objektiv a fotoaparát s patřičnou bajonetovou redukcí umístíme na mikroskop Peraval nebo Epival, viz obrázek 2.11. Zrcadlový fotoaparát zapneme otočným kolečkem u spouště do prostřední polohy ON a poté do krajní polohy s obrázkem clony, pokud chceme pozorovat obraz na TV monitoru, režim Live View. Televizor zapneme do režimu AV. Fotoaparát je možné napájet adaptérem ze sítě. Obvykle po 60 minutách pozorování se fotoaparát vypne sám z režimu Live View z úsporných důvodů, takže kolečkem u spouště opět zapneme přenos obrazu do TV. Fotografie se ukládají na paměťovou kartu SD buď ve formátu JPG nebo RAW, který pak lze patřičným softwarem převést (např. IrfanView apod.) Z karty přečteme soubory vhodnou USB čtečkou karet do PC.



Obrázek 2.11. Přehled ovládacích prvků fotoaparátu Pentax K20.

Příklady pozorování mikroskopických preparátů:

1. Tenká vrstva na skle.
2. Cibulová blána.
3. Kapalinové roztoky a jejich vysychání, aj.

2.3. Stereo a polarizační mikroskop Motic

Úkoly pro polarizační mikroskop:

1. Zapneme spodní osvětlení preparátu a zkontrolujeme zda je v mikroskopu vložen analyzátor tak, aby jeho směr propustnosti byl rovnoběžný s polarizátorem u osvětlení.
2. Zobrazíme sklíčko s PE páskou (nejmenší zvětšení) a budeme pozorovat kontrast při otáčení páskou. Kdy kontrast vymizí? Lze určit optickou osu? Jak by se dal měřit rozdíl indexů lomu řádného a mimořádného paprsku?
3. Zobrazíme preparát s dvěma páskami a prohlédneme si strukturu při největším zvětšení. Zkřížené a rovnoběžné polarizátory.
4. Prohlédneme si strukturu mineralogických preparátů.
5. Budeme „in-situ“ pozorovat tání krystalku ledu při zkřížených polarizátorech.

Úkoly pro stereomikroskop:

1. Prohlédneme si čip s integrovanými obvody bez metalizace a s metalizací a vhodným směřováním horního osvětlení budeme se snažit určit vlastnosti povrchu jednotlivých oblastí čipu na základě úvahy o vzniku obrazového kontrastu.
2. Prohlídka svítícího p-n přechodu ledky.
3. Prohlídka biologických preparátů, které si student přinese.

Detailní popis mikroskopu:

Moderní stereoskopický mikroskop od firmy Motic série SMZ168 slouží k pozorování preparátů v uspořádání jak v režimu na odraz tak v režimu na průchod. Původní pouze stereomikroskop byl navíc rozšířen o možnost pozorování v polarizačním režimu, což jeho použití rozšiřuje také směrem ke studiu geologických preparátů, jako jsou různé horniny a krystaly. Přitom je stále zachován stereoskopický efekt.

Na rozdíl od starších mikroskopů Zeiss, které bylo nezbytné dovybavit digitálním fotoaparátem, mikroskop Motic obsahuje přímo vestavěnou USB kameru, která je připojena přímo k PC a umožňuje tak pozorovat on-line pohled a pořizovat snímky rovnou do počítače. V PC je možné přímo zpracovávat mikroskopické snímky pomocí speciálního softwaru. Tento komfort je však vykoupen nižším rozlišením snímků pořízených z USB kamery.

Samotný mikroskop zapneme hlavním spínačem 14 v zadní části mikroskopu. USB kamera je napájena pomocí PC, proto pro provoz kamery je dostatečné mít zasunutý USB kabel v USB portu na přední straně počítače. Spínači 12 nebo 13 zapneme horní nebo spodní osvětlení dle potřeby, přičemž na pravé straně podstavce mikroskopu je otočný regulátor osvětlení.

Základní součástí mikroskopu Motic je stereoskopický okulár 1 a stereoskopický objektiv 2. Pozorovaný obraz z pravého zobrazovacího kanálu je možné převést táhlem 10 do USB kamery 3 a pak do počítače. V režimu on-line snímání tedy není možné využívat stereoskopický režim, je v provozu pouze levý okulár. Zvětšení obrazu je možné regulovat optickým zoomem pomocí šroubu 8. Vertikální polohu celého systému vzhledem k preparátu regulujeme šroubem 9 za účelem zaostření celého obrazu. Poněvadž zaostřovací šroub 9 umožňuje měnit polohu pouze v omezeném rozsahu, pro pozorování objemnějších preparátů je možné celkovou výšku mikroskopu nastavit posunem podél stojanu a zajistit aretací 11. Šroub 7 slouží ke správnému nastavení osvětlení preparátu shora.

Samotný preparát pokládáme na matné podložní sklo 4, které navíc umožňuje rotaci vzorku. Pod podložním sklem a na objektivu jsou umístěné polarizační filtry pro případ, že chceme využít mikroskop jako polarizační, polarizátor 5 a analyzátor se stupnicí 6. Vzorkem a analyzátozem můžeme natáčet vůči polarizátoru nezávisle.

Digitální záznam pozorovaného obrazu preparátu zajišťuje software Motic Image Plus 2.0, jehož odkaz je na pracovní ploše po přihlášení k počítači. Po spuštění programu se na hlavní liště programu objeví řada ikon pro obsluhu softwaru. Pro spuštění kamery v mikroskopu použijeme ikonu s obrázkem kamery (Capture window – Ctrl+M), kdy se nám objeví okno „Live Imaging Module“. Zde je nutné mít otevřené video zařízení



Obrázek 2.12. Přehled ovládacích prvků mikroskopu: 1. stereo-okulár, 2. stereo-objektiv, 3. digitální kamera, 4. matné podložní sklo s možností manuální rotace, 5. lineární polarizační folie pod matným sklem, 6. polarizační filtr, 7. regulace směru horního osvětlení, 8. regulace zvětšení, 9. zaostřování, 10. táhlo pro převedení obrazu z pravého okuláru do digitální kamery, 11. aretační šroub výšky mikroskopu, 12. spínač horního osvětlení, 13. spínač dolního osvětlení, 14. hlavní síťový spínač, 15. výstup usb kamery, 16. napájecí kabel, 17. kabel kamery. Na pravé straně základny mikroskopu je navíc regulátor intenzity osvětlení.

„Motic 3.0 MP“ společně s nastavenou expozicí na auto. V některých případech příliš tmavého nebo světlého obrazu je vhodné upravit také zisk signálu (Gain). Fotografie nebo video lze pak zaznamenávat na liště vlevo s obrázkem fotoaparátu, které jsou pak převedeny do hlavního programu. Odtud je možné fotografie a videosekvence dále zpracovávat a ukládat.

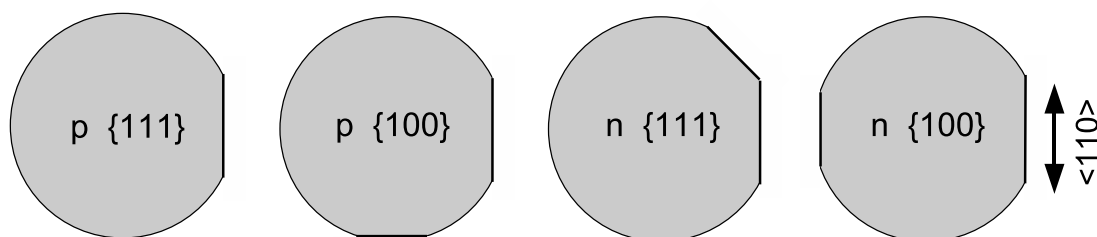
Příklady pozorování mikroskopických preparátů:

1. Mineralogické preparáty.
2. Elektronické součástky.
3. 3D vzorky rostlin, hmyzu apod.

3. Aplikace mikroskopie v polovodičovém průmyslu – Aplikační blok C

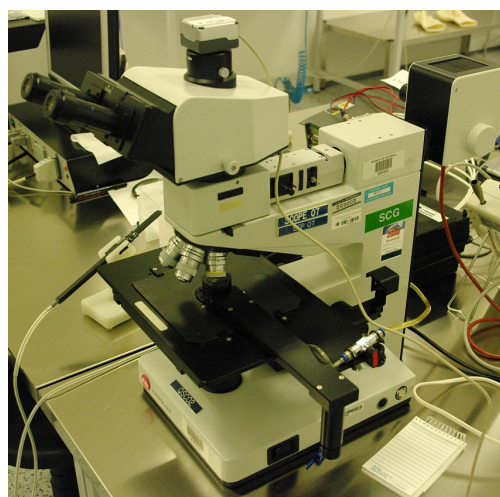
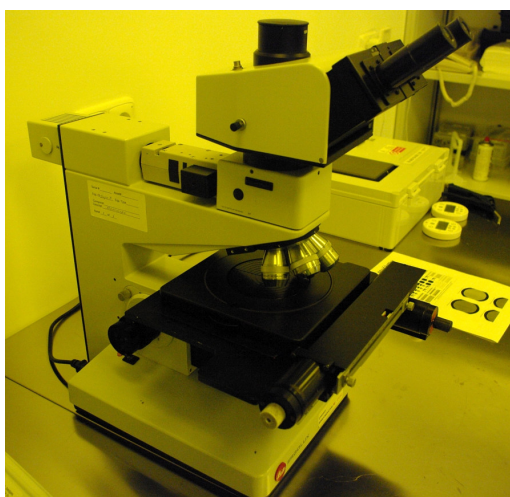
Čisté prostory a bezprašné prostředí jsou podmínkou pro vývoj a výrobu polovodičových součástek na křemíkových deskách, které jsou vysoce citlivé na kontaminaci. Čisté prostory i zařízení a technologie, které se v nich používají, jsou dnes již standardem ve specializovaných výzkumných laboratořích a ve vysoce vyspělých průmyslových odvětvích zabývajících se polovodičovou výrobou, mikroelektronikou, optikou, metrologií nebo farmacií.

Leštěné křemíkové desky o průměru 100 mm (4 palce), se kterými pracujeme na ÚFKL, mají typickou tloušťku 525 μm . Pro účely orientace desek v zařízeních a pro rozlišení typu vodivosti jsou desky opatřeny fazetami, viz obrázek 3.1. U velkých desek o průměru od 200 mm se kvůli šetření materiálu již používají zářezy místo fazet.



Obrázek 3.1. Orientace křemíkových desek podle hlavní fazety, identifikace typu vodivosti a orientace povrchu podle pomocné fazety.

V tomto praktiku se seznámíme s optickými mikroskopickými metodami, které se běžně používají při přípravě polovodičových součástek a čipů v laboratořích a průmyslu. Kromě běžných optických mikroskopů, viz obr. 3.2, tak uvidíme též optický litograf se speciálním mikroskopem pro sesazování dvou obrazů (z projekční masky a z již vytvořené struktury na desce) na sebe, mechanický profilometr pro mapování morfologie povrchu vzorků a stereomikroskop používaný při hrotovém měření elektrických charakteristik součástek vyrobených na desce.



Obrázek 3.2. Mikroskopy Leitz se speciálně upraveným stolcem pro umístění polovodičových desek. Mikroskop vpravo je navíc rozšířen o snímací kameru.

3.1. Čisté prostory – principy

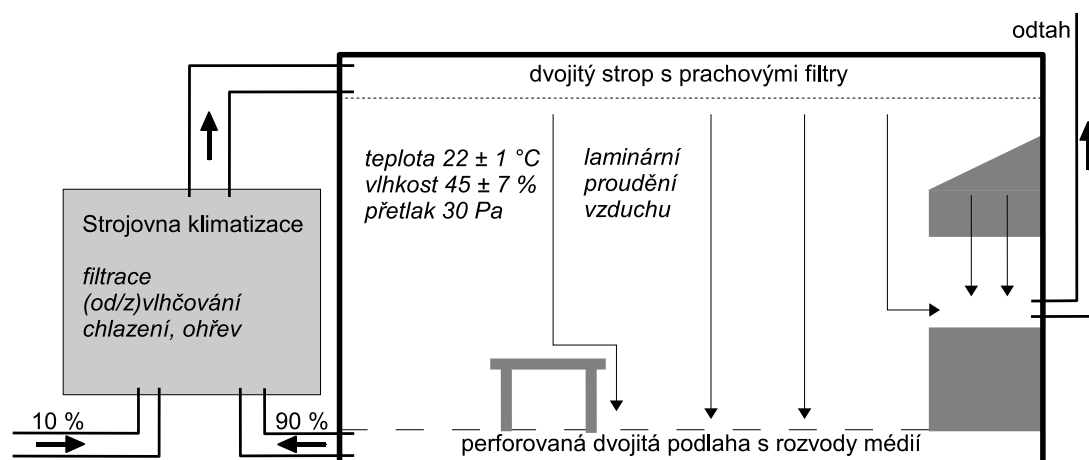
Čistota a bezprašnost laboratoře

Bezprašnost, čistota a používání speciálních přípravků a vysoce čistých médií jsou nezbytné při přípravě obvodů či systémů o mikrometrových rozměrech, kde případná přítomnost prachových částic či jiné kontaminace má fatální důsledky pro funkčnost vyrobených systémů. Stačí si například uvědomit, že průměr lidského vlasu je 100 mikrometrů, pylové nebo prachové částice jsou ještě menší, a přitom součástky v současné mikroelektronice (analogové řídicí obvody, čipy, paměti, procesory) se vyrábí s mikrometrovým až sub-mikrometrovým rozlišením. Tabulka 1 shrnuje označení tříd čistoty.

Tabulka 1. Označení tříd čistoty podle ISO normy a metrické a palcové konvence, a maximální limity koncentrace částic ve vzduchu pro velikost částic \geq limit. Čistá laboratoř na ÚFKL o rozloze 120 m² spadá podle průběžných měření do třídy čistoty 100 (ISO 5).

Třídy čistoty			0,1 μm (1/m ³)	0,2 μm (1/m ³)	0,3 μm (1/m ³)	0,5 μm (1/m ³)	0,5 μm (1/ft ³)	1 μm (1/m ³)	5 μm (1/m ³)
ISO 14644-1	Metrická	Palcová FS 209E							
Třída 1	M1		10	2					
Třída 2	M1.5	1	100	24	10	4	1		
Třída 3	M2		1 000	237	102	35		8	
Třída 4	M2.5	10	10 000	2 370	1 020	352	10	83	
Třída 5	M3.5	100	100 000	23 700	10 200	3 520	100	832	29
Třída 6	M4.5	1 000	1 000 000	237 000	102 000	35 200	1 000	8 320	293
Třída 7	M5.5	10 000				352 000	10 000	83 200	2 930
Třída 8	M6.5	100 000				3 520 000	100 000	832 000	29 300
Třída 9	M7.5	1 000 000				35 200 000	1 000 000	8 320 000	293 000

Bezprašnost v laboratoři je zaručena použitím jemných filtrů a zajištěním laminárního proudění vzduchu od stropu k podlaze, viz obrázek 3.3. Kromě bezprašnosti umožňuje klimatizace laboratoře dodržet přesně definované parametry teploty a vlhkosti. Toto je důležité zejména pro teplotní stabilizaci fotolitografu pro přípravu součástek s mikrometrovým rozlišením. Poznamenejme ještě, že ve sterilních čistých prostorách např. ve farmacii jsou požadavky na bezprašnost podstatně nižší, avšak je v nich malý podtlak a vystupující vzduch je sterilován UV lampami.



Obrázek 3.3. Schéma oběhu vzduchu v čistých bezprašných prostorách.

Největším zdrojem znečištění v laboratoři je člověk. Proto je nutné používat speciální bezprašné kombinézy, návleky na boty a rukavice. Pravidelný úklid (každodenní vytírání podlahy a pravidelná očista všech zařízení) je nezbytným předpokladem udržení čistoty a dosažení kvality připravených součástek.

Čistota a bezprašnost médií

Použité materiály i média (voda, plyny) musí být velmi čisté. Chemikálie se používají v čistotě označené p.p. (pro polovodiče), která je vyšší než čistota p.a. (pro analýzu). V našich čistých prostorách jsou používány chemikálie (fotolak, vývojka) od renomovaného výrobce a oplach desek je prováděn v demineralizované vodě.

Demineralizovaná voda je vysoce čistá voda, která neobsahuje minerály, ionty ani bakterie. Čistota vody se posuzuje jejím měrným odporem. Vzhledem k jeho závislosti na teplotě se hodnoty přepočítávají na teplotu 25 °C. Pro CMOS technologii je nutné dosáhnout hodnot 18 M Ω ·cm, která je velmi blízká maximálnímu možnému odporu 18,2 M Ω ·cm při 25 °C.

Všechna tato opatření se dělají kvůli *zamezení kontaminace křemíkových desek*. Proto taktěž:

- Křemíkovými deskami manipulujeme pouze pomocí pinzet. Nedotýkat se rukama!
- Nad deskami a jejich zásobníky nemáváme rukama ani žádnými pracovními nástroji.
- Desky nepokládáme na stůl, ale pouze do zásobníků a na pracovní plochu přístrojů.

3.2. Fotolitografie

Fotolitografie je soubor technologických procesů pro přípravu topologicky přesně definovaných struktur vytvrzením exponovaného fotorezistu na připraveném vzorku, a slouží k ohraničení oblastí, které budou v následujícím technologickém kroku předmětem lokálních operací, jako jsou např. leptání, difúze dopantů, implantace apod. Kromě optické litografie existuje též elektronová litografie, kdy se strukturování (foto)citlivého laku neprovádí světlem, ale elektronovým svazkem.

Fotolak (fotorezist) je chemikálie, která mění konformaci při ozáření, v našem případě spektrální čarou 365 nm rtuťové výbojky. Oblasti fotorezistu, které byly zakryté (zamaskované chromovou vrstvou na křemenném skle) po expozici a vyvolání ve vývojce zůstanou na desce, zatímto exponované části se odplaví, a to v případě užití *pozitivního laku*. V případě *negativního laku* se naopak odplaví neozářené části laku.

Fotolak je citlivý na blízkou UV oblast, proto je místnost fotolitografie typická svým žlutým světlem (folie na zářivkách) pro odfiltrování tvrdé části viditelného spektra.

Postup při fotolitografii je následující:

1. Kapku laku kápneme do středu desky vycentrované na rotační lakovce, kterou následně roztočíme (rychlost rotace od 1000 do 6000 otáček za minutu, doba rotace 30 sekund). Výsledná tloušťka vrstvy laku závisí na rychlosti rotace.
2. Vytvrzení laku na horké plotně při teplotě 85 až 90 °C po dobu 3 minuty (tzv. soft-bake).
3. Expozice desky na expozičním zařízení (optickém litografu) Perkin-Elmer s Hg výbojkou, viz obr. 3.4. Masky bude obsahovat struktury pro další úroveň součástek. Doba osvitů (expozice) závisí na typu a tloušťce fotorezistu.
4. Vyvolání desky ponorem ve vývojce a osušení na centrifuze.
5. Vytvrzení laku na teplotě kolem 110 °C (tzv. hard-bake).
6. S nalakovanou deskou je možné provést tato pozorování a měření:
 - (a) Ověření homogenity nanoseného laku pozorováním pod šikmým světlem.
 - (b) Pozorování exponovaných motivů pod mikroskopem.
 - (c) Měření tloušťky fotorezistu optickým spektrometrem.
7. Nyní se provede leptání vrstvy (např. oxid nebo kov) pod okénky ve strukturované vrstvě laku.
8. Finálním krokem litografie je smytí pozitivního fotorezistu z desky. Toto můžeme provést chemicky acetonem (ponorem nebo ostříkem) nebo suchým plazmatickým leptáním v kyslíkovém plazmatu.



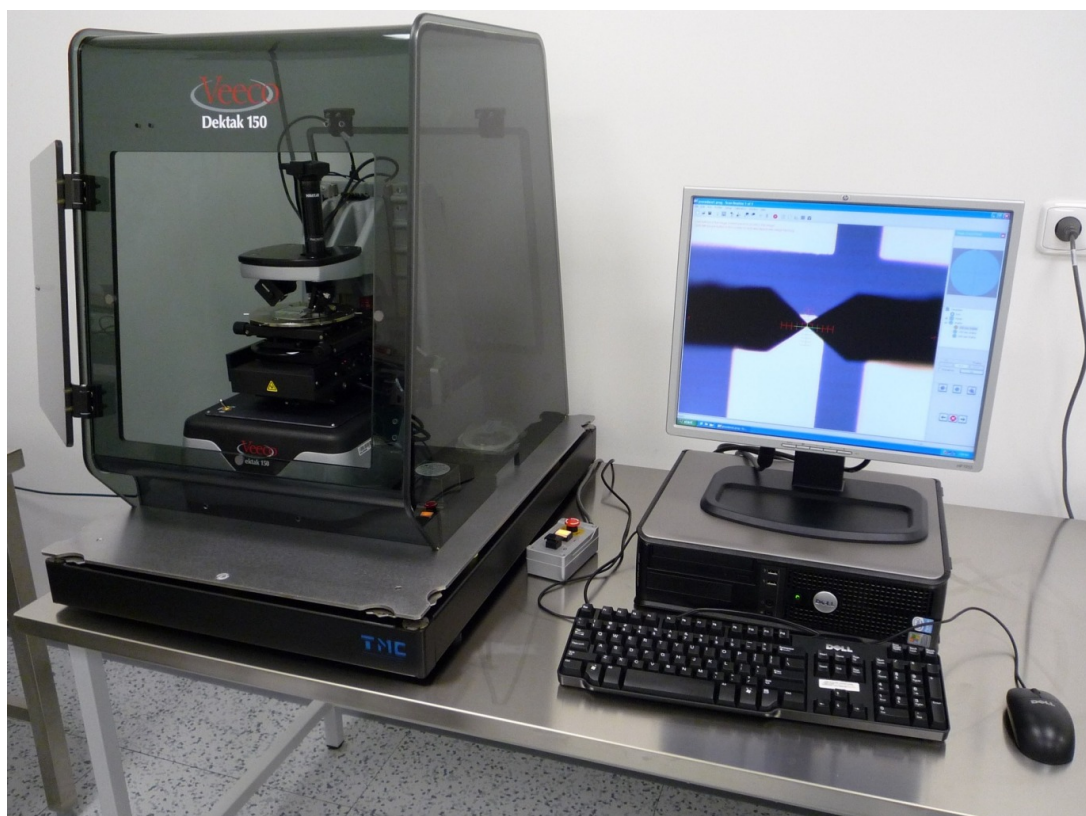
Obrázek 3.4. Ovládací a základní část optického litografu Perkin-Elmer 340HT.

3.3. Měření tloušťek a morfologie povrchu pomocí profilometru

Pro měření tloušťek průhledných i neprůhledných povrchových vrstev a morfologie povrchu (drsnost) lze použít mechanický profilometr.

Příkladem neprůhledné vrstvy na povrchu je vrstva hliníkové metalizace na čipu. Původní jednolitá vrstva hliníku je litograficky a leptáním vytvarována do vodivých struktur, které slouží jako kontakty či kontaktovací plochy k vodivému propojení jednotlivých součástek v rámci čipu. Kontaktovací plochy pak slouží pro připojení nožiček v zapouzdřeném čipu.

Vrstva metalizace je neprůhledná a tudíž není možné změřit její tloušťku optickou interferometrií ve viditelném světle. Proto používáme mechanický profilometr, který diamantovým hrotem projede po povrchu vzorku a přitom nasnímá jeho profil. Pokud je hliníková vrstva vyleptaná až na oxid, potom v naměřeném profilu uvidíme schodovitý profil (spodní část – oxid, horní část – hliník), odkud odečteme výšku schodů, tedy tloušťku hliníkové vrstvy. K měření používáme profilometr Dektak 150 firmy Veeco s hrotem ve tvaru diamantové polokoule o průměru 12,5 μm a přítlačnou silou 10 mg, viz obr. 3.5.

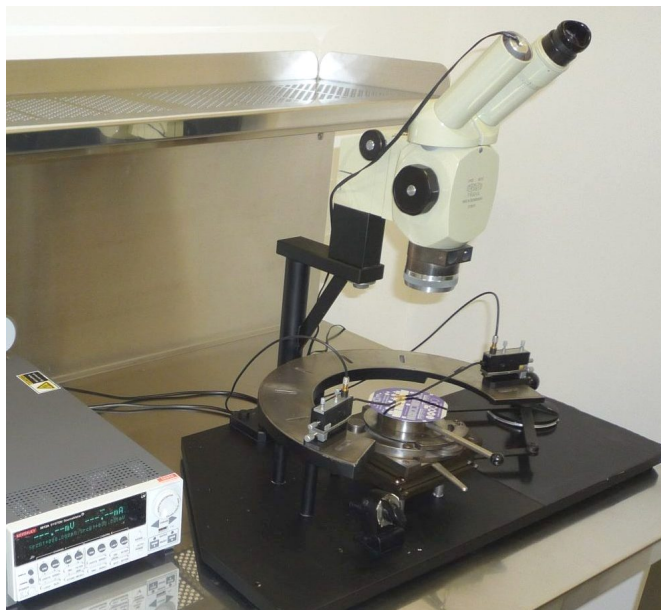


Obrázek 3.5. Profilometr Dektak 150 při měření profilu hliník–oxid–hliník mezi dvěma páry kondenzátorů.

3.4. Hrotové měření a další využití stereomikroskopů

Hrotové měření součástek

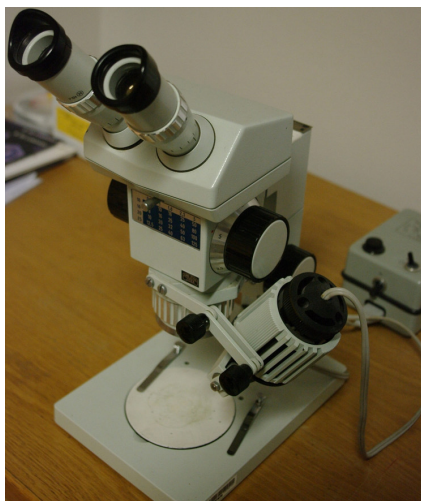
Poté, co jsou součástky na křemíkové desce vyrobeny, je potřeba proměřit jejich elektrické parametry, k čemuž využíváme stanici hrotového měření, obr. 3.6. Jako kontakty používáme tenké wolframové hroty (průměr hrotu 7 μm) umístěné na konci ramének, u nichž pomocí stavěcích šroubů můžeme řídit umístění hrotu ve směrech x a y a sílu přitlaku. Raménka jsou připojena koaxiálním kabelem k měřicímu přístroji (LCRmetr pro měření odporu, kapacity a indukčnosti nebo AVmetr pro měření voltampérových charakteristik). Pro přesné umístění hrotů na součástky pozorujeme situaci ve stereomikroskopu.



Obrázek 3.6. Sestava pro hrotové měření s AVmetrem.

Další použití optických stereomikroskopů

Na závěr ještě uvedeme fotografie dvou stereomikroskopů, se kterými se můžete na ÚFKL setkat. Používají se při studiu tvaru objektů, které nevyžadují velké zvětšení (např. elektronické součástky nebo biologické objekty), případně při manipulaci s nimi (např. osazení wolframového vlákna do objímky elektronového zdroje u SEMu).



Obrázek 3.7. Stereoskopické mikroskopy Zeiss Technival (vlevo) a polské výroby (vpravo).

3.5. Organizace praktika v čistých prostorách

Organizační poznámky k praktiku:

- Na místo srazu přijďte přesně na určenou hodinu.
- Do laboratoří není možné vstupovat v silně či viditelně znečištěném (zaprášeném, zakouřeném) oblečení.
- Při práci je obličej nezakrytý, proto není dobré použít nevhodný make-up, vysušující kosmetiku, pudr či jiné zdroje prachových částic a těžkých kovů.
- Dlouhé vlasy sepněte gumičkou, aby nevytlýzaly z kapuce kombinézy.
- Nemocným (chřipka, kašel, nachlazení) není vstup do čistých prostor povolen (uvnitř nelze kašlat a smrkat).
- Práce studentů v praktiku je povolena pouze pod dohledem vyučujícího. Student se při práci řídí pokyny vedoucího. V případě nejasnosti je třeba problém konzultovat s vedoucím praktika.
- V místnosti fotolitografie nefotíte s bleskem.

Vstup do čistých prostor:

- Vstup do čistých prostor je přes dvě šatny, tedy troje dveře. Vzhledem k udržovanému mírnému přetlaku v laboratoři (cca 30 Pa) smí být v jednom okamžiku otevřeny pouze jedny z nich. Neotevíráme tedy dveře, pokud zní a svítí signalizace.
- V černé šatně uložíme venkovní oblečení (též boty) do skříňky. Obujte si přezůvky (doporučujeme vlastní).
- V čisté šatně oblékneme kombinézu, roušku a návleky postupem podle vyobrazení. Nakonec si navlékneme rukavice.
- Poté již vejдемe do čistých prostor.
- Do čistých prostor nevnášíme žádné neautorizované předměty. Na psaní poznámek bude v laboratoři k dispozici bezprašný papír a speciální propisky.

Další poznámky pro udržení čistoty a zabránění kontaminace:

- Deskami manipulujeme pouze pomocí pinzet. Nemácháme nad nimi rukama.
- Křemenného skla se nedotýkejte, hrozí kontaminace při vysokých teplotách v peci.
- Před každou prací na pracovišti otřeme pracovní místo a používaný přístroj isopropylalkoholem a bezprašnou utěrkou.

Bezpečnost práce v čistých prostorách:

- V laboratoři se chováme rozvážně, neběháme.
- V čistých prostorách si pracovníci nepodávají ruce (máte nasazené rukavice!).
- S chemikáliemi se pracuje opatrně a to pod dohledem a pouze v chemických boxech. Při práci použijte vhodné osobní ochranné prostředky. Při poleptání je nutné okamžitě použít bezpečnostní sprchu, oční nebo tělovou.
- V šatnách ani v čistých prostorách se nesmí jíst a pít, nesmí se žvýkat žvýkačky.
- Demineralizovaná voda, stejně jako destilovaná voda, se nesmí pít.

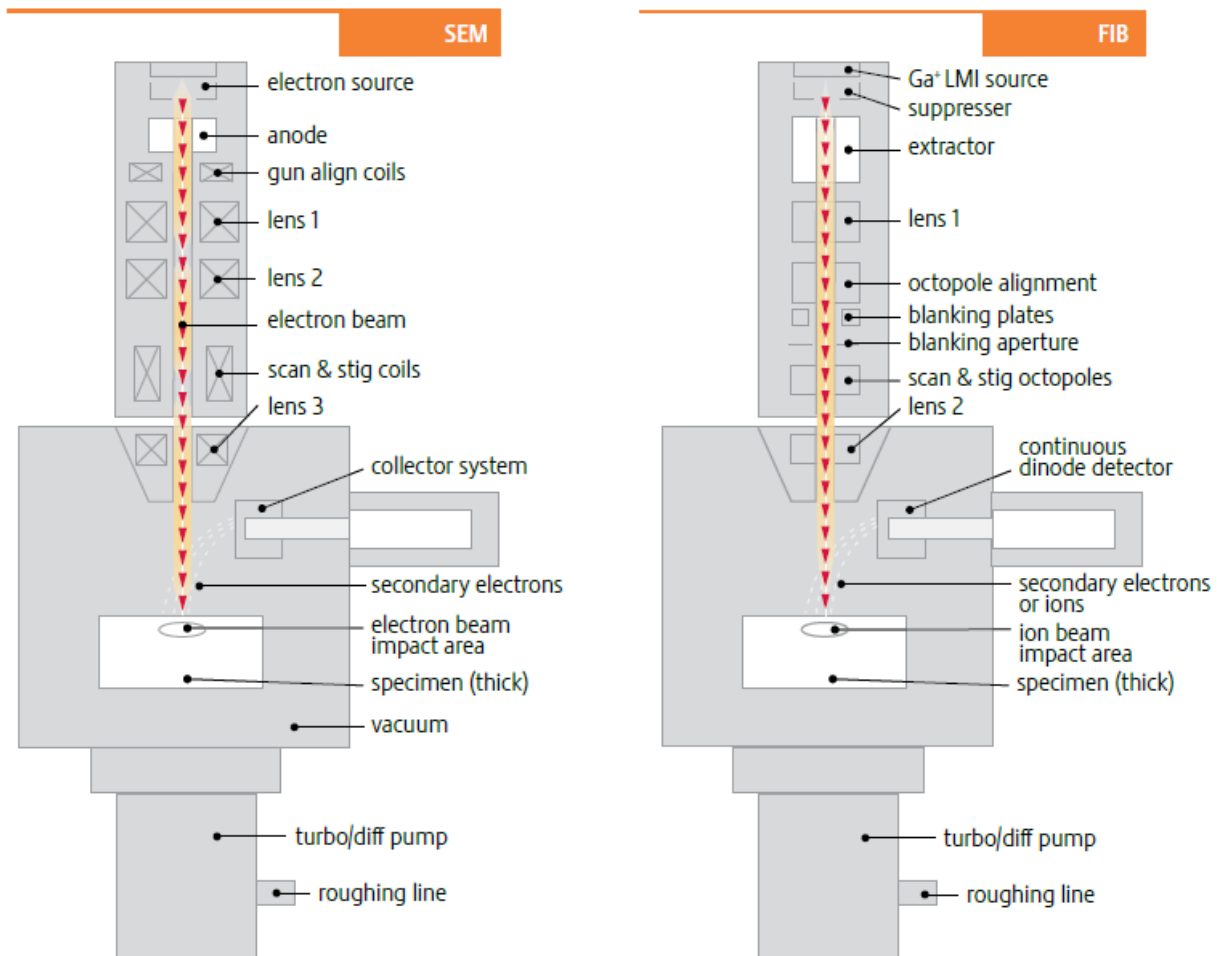
4. Pokročilé aplikace mikroskopů: SEM a AFM – Aplikační blok D

4.1. Skenovací elektronová mikroskopie (SEM)

Skenovací (rastrovací) elektronový mikroskop, resp. skenovací elektronová mikroskopie (SEM), umožňuje zkoumání povrchu vzorků tak, že urychlený zaostřený svazek elektronů dopadá na vzorek a současně detektory umístěné nad vzorkem detekují vycházející elektrony nebo rentgenové záření, viz obr. 4.1. Počítač zobrazuje získaný signál jako dvourozměrný obraz povrchu vzorku. Pixel výstupního obrazu je dán velikostí stopy dopadajících elektronů, velikost zvětšení je dána velikostí obrazu na monitoru a velikostí plochy rastrované na vzorku (zorné pole). Vzniklý obraz pro určitý vzorek (materiál) tedy závisí na použitém detektoru (můžeme detekovat zpětně odražené elektrony, sekundární elektrony nebo vybuzené rtg záření) a na energii dopadajících elektronů (typicky stovky eV až desítky keV). Kvalitní obrázek získáme pečlivým laděním urychlovacího napětí, velikosti stopy, proudu a času snímání.

Elektrony jsou nabití částice, proto je třeba zobrazení provádět ve vysokém vakuu. Přitom dochází k nabíjení vzorku, nabitý povrch odpuzuje dopadající elektrony a zhoršuje obraz. Proto *zobrazování ve vysokém vakuu* funguje dobře pouze pro vodivé vzorky (vzorek musí být spojen s uzemněným stolem). Nevodivé vzorky můžeme pokovit tenkou kovovou vrstvou, čímž můžeme studovat topologii povrchu ve vysokém vakuu. V režimu *nízkého vakuu* můžeme studovat i nevodivé vzorky, náboj je odváděn při ionizaci molekul vzduchu, rozlišení však bude horší. Některé mikroskopy je možné provozovat i v režimu *environmental SEM* (ESEM), kdy při tlaku cca desítky až několik tisíc pascalů dochází k odpařování vody záměrně umístěné do komory mikroskopu, což zmenšuje degradaci zkoumaných biologických vzorků.

Při dlouhodobém pozorování vzorku může někdy docházet ke vzniku a pozorování různých artefaktů – přesvětlené oblasti vzniklé nabíjením neodvedeného náboje, degradace materiálu vzorku, apod.



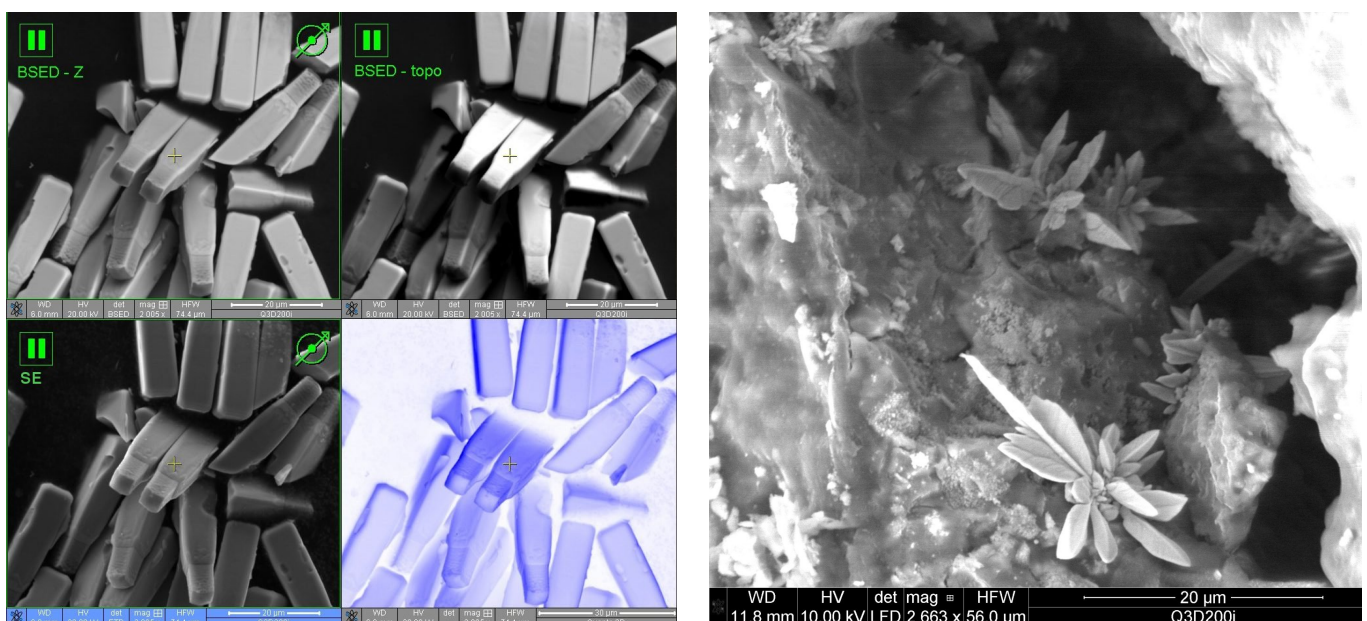
Obrázek 4.1. Schéma elektronového a iontového tubusu (materiály firmy FEI).



Obrázek 4.2. Skenovací elektronový mikroskop na ÚFKL, FEI Quanta 3D 200i, umožňuje práci v režimech SEM, ESEM, FIB a GIS.

Elektronový mikroskop může být osazen (kromě elektronového zdroje) i zdrojem *fokusovaného iontového svazku* – focused ion beam (FIB). Obvykle se jedná o zdroj kapalného galia (teplota tání galia je 29,8 °C) a urychlovací optikou nezávislou na elektronové. Detektorem sekundárních elektronů pak můžeme sledovat signál způsobený dopadem těchto iontů, které ovšem značně poškozují povrch vzorku. Toho je ovšem možné použít i k užitečné činnosti, a to k řízenému odběru materiálu – hloubení malých děr definovaného tvaru.

Elektronový mikroskop může být též osazen i *plynným depozičním systémem* – gas injection system (GIS). Dutou jehlou, která se vysune do blízkosti vzorku, proudí nad vzorek plyn (například metalorganika s platinou), při jeho rozkladu nad vzorkem dochází k depozici např. platiny. Kombinací FIBu a GISu tak můžeme například opravovat kontakty na čípech. Dále se FIB používá při přípravě tenkých lamel pro prozařování v transmisním elektronovém mikroskopu (TEM), pokud je mikroskop navíc osazen i speciálním manipulátorem (podavačem), ke kterému je lamela přivařena GISem.

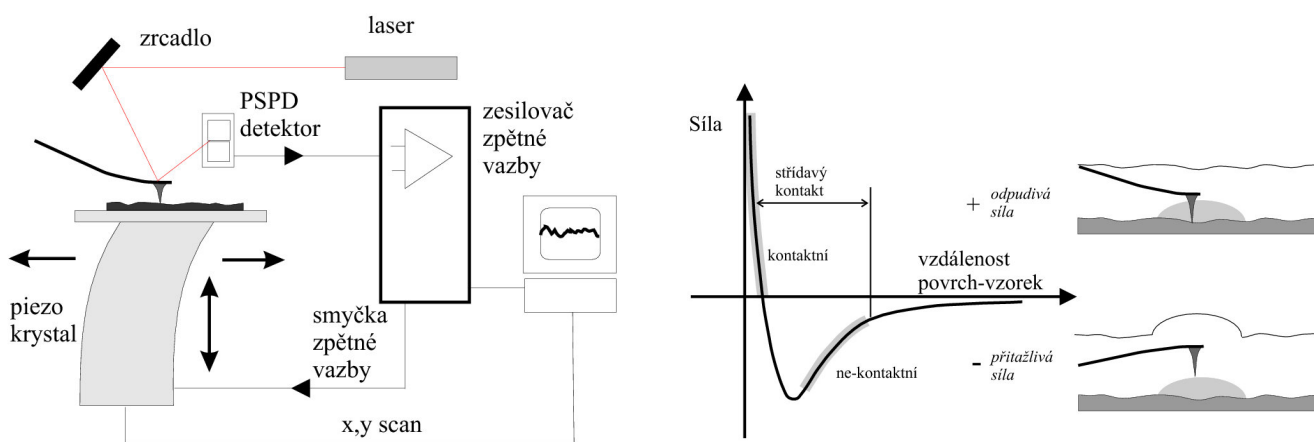


Obrázek 4.3. Ge/Si mikrokrystaly pozorované různými detektory (vlevo) v režimu vysokého vakua. Mikrokrystaly vyrostlé v prasklině amalgámové zubní plomby pozorované v režimu nízkého vakua (vpravo).

4.2. Mikroskopie atomových sil (AFM)

Mikroskopie atomových sil (AFM) je jedna z metod rastrovací mikroskopie (SPM – Scanning Probe Microscopy). AFM slouží k 3D mapování (zobrazování) povrchů, a to typicky s horizontálním rozlišením desetin až jednotky nanometrů a vertikálním dokonce i jednotky desetin nanometrů na ploše o velikosti jednotek až desítek mikrometrů. Vedle AFM patří do této skupiny technik také například skenovací tunelovací mikroskopie (STM – Scanning Tunneling Microscopy), mikroskopie magnetických sil (MFM – Magnetic Force Microscopy) a mikroskopie laterálních sil (LFM – Lateral Force Microscopy).

AFM je založena na rastrování povrchu ostrým hrotem, dlouhým několik mikrometrů a širokým často méně než 10 nm v průměru, a na měření silové interakce mezi hrotem a povrchem, viz schéma na obrázku 4.4. Topografický obrázek povrchu je generován z rozložení fluktuací síly mezi hrotem a povrchem podél povrchu vzorku. Jedná se o van der Waalsovou sílu. Polohování vzorku se provádí piezoelektrickým skenerem umístěným v hlavním korpusu mikroskopu a odečítání vertikálního profilu povrchu hrotem a laserovým snímačem je realizováno ve snímací hlavě, viz fotografie 4.5.



Obrázek 4.4. Schématické zobrazení zařízení AFM (vlevo). Režim kontaktního a nekontaktního módu v závislosti na hodnotě van der Waalsovy síly. Nekontaktní režim lze využít při měření povrchu měkkých materiálů, např. gelů a kapalin (vpravo).

Snímací hrot je umístěn na konci ramene (100 až 200 μm dlouhého) a van der Waalsovy síly způsobují ohyb tohoto ramene AFM. Velikost ohybu ramene je čtena laserovým paprskem ozařujícím konec ramene a jeho intenzita je detekována polohově citlivým fotodetektorem (PSPD). Pohyb vzorku během snímání reliéfu povrchu je generován piezoelektrickým krystalem, který periodicky pohybuje zkoumaným vzorkem v horizontálním směru a umožňuje tak mapovat rozložení síly podél vzorku. Následně se tak vytvoří topografický obrázek povrchu vzorku. Horizontální polohu a vzdálenost mezi hrotem a povrchem vzorku lze řídit pomocí zpětné vazby, která umožňuje automatické přizpůsobení vzdálenosti povrchu a hrotu vzhledem k zadané síle. Experimentální zařízení je ovládáno pomocí počítače.

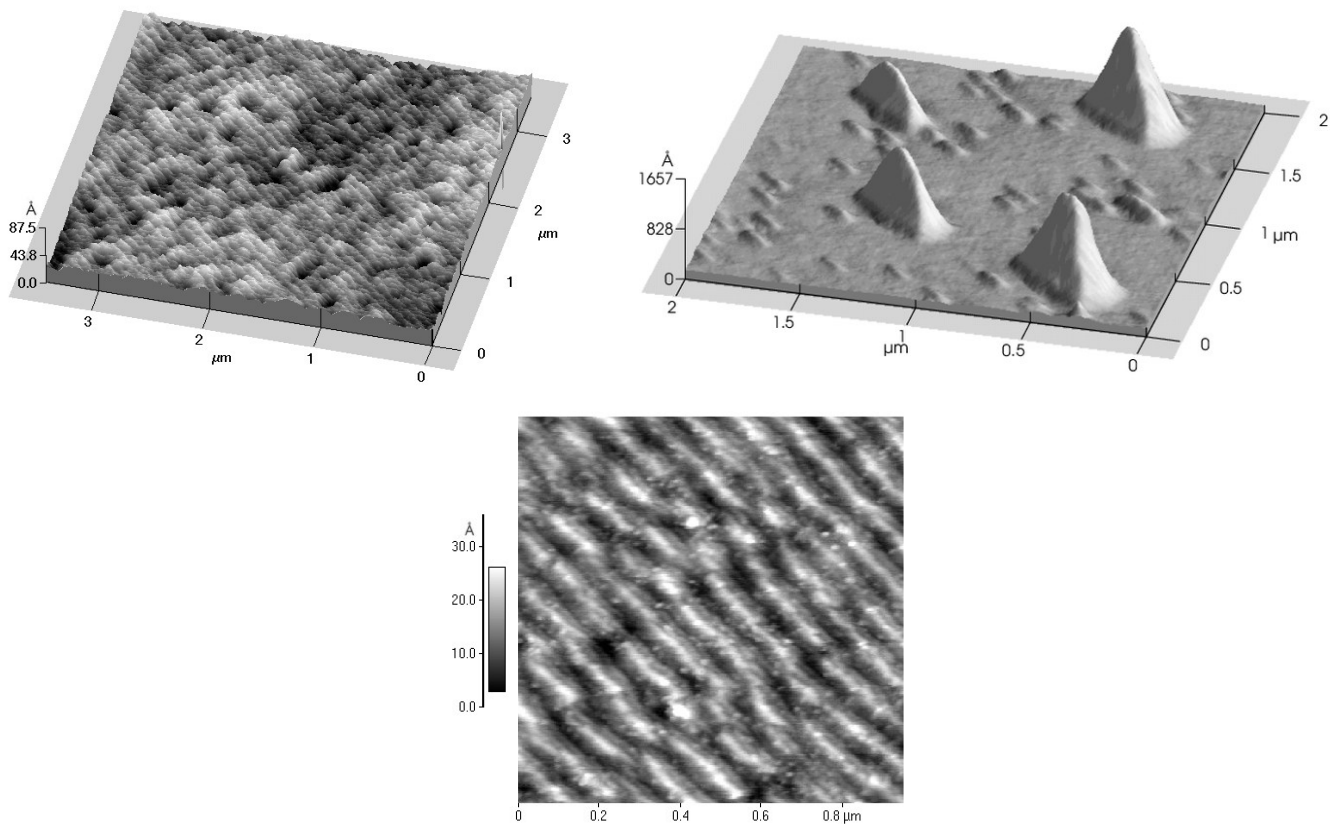
Lze rozlišit dva základní rastrovací módy, jak zaznamenat topografický obrázek. Nejčastěji používaný je mód *konstantní síly*. Pomocí zpětné vazby je udržována konstantní vzdálenost mezi hrotem a vzorkem včetně ohybu ramene hrotu tak, že vertikální poloha ve směru podél krystalu se mění. Obrázek je pak vytvořen na základě pohybu krystalu zaznamenáváním vertikálního profilu povrchu vzorku.

Druhý rastrovací mód je mód tzv. *konstantní výšky*. V tomto případě se pro tvorbu topografických zobrazení povrchu používá prostorová změna výchylky ramene, která pak generuje obraz povrchu. Během snímání je výška piezokrystalu pevná a ohyb ramene s hrotem je detekován laserem. Tento mód se často používá pro snímání obrázků atomových rozměrů ve vertikálním směru na velmi plochých površích. Ohyb ramene musí být v tomto případě velmi malý. Výhoda tohoto režimu je v jeho velké rychlosti snímání povrchu. Přesto je mód konstantní síly používán častěji vzhledem k vyššímu dynamickému rozsahu a přesnějšímu ovládní celkové síly působící mezi vzorkem a hrotem.

Příklad topografického snímku pořízeného AFM v režimu konstantní síly je uveden na obrázku 4.6.



Obrázek 4.5. Skenovací mikroskop atomových sil na antivibračním stole (vlevo) a detail snímací hlavy (vpravo).



Obrázek 4.6. Příklad topografických zobrazení povrchu různých polovodičů s kvantovými tečkami a dráty. Měřeno v kontaktním módu v režimu konstantní síly s maximálním snímacím rozsahem piezokrystalu $100\ \mu\text{m}$ pro rozdílné velikosti snímaného pole.

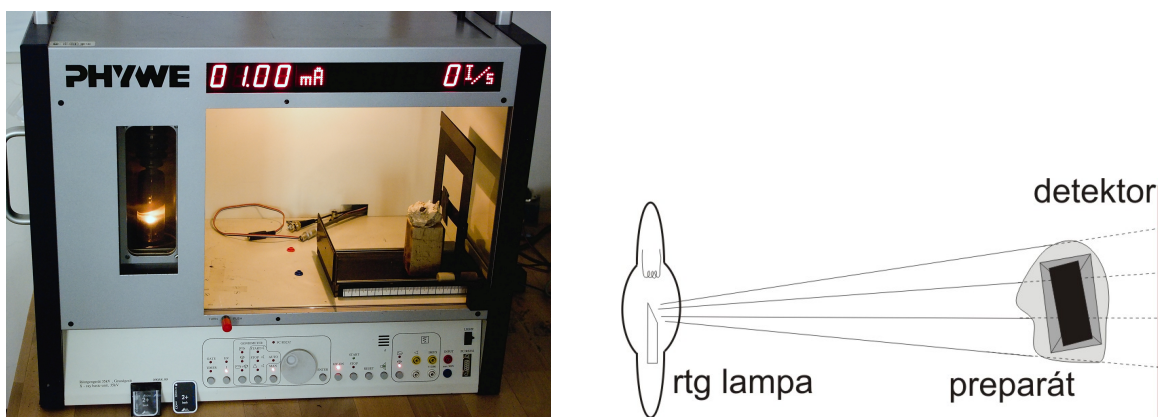
5. Rentgenové zobrazovací metody – Aplikační blok E

5.1. Rentgenová radiografie

Rentgenová radiografie patří mezi nejstarší techniky při zobrazování pomocí rentgenových paprsků od dob jejich objevu v roce 1895. Jako nejznámější první radiogram na světě je rtg snímek ruky s prstenem manželky W. C. Röntgena. Až do 80. let 20. století byly radiografické snímky výhradně zaznamenávány na fotografický film a teprve s příchodem moderní elektroniky a hlavně během posledních 10 let nové digitální technologie vytlačují původní rtg filmy.

Zřejmě největší uplatnění rtg radiografie je v medicíně, kdy je možné pomocí rtg paprsků získávat obraz rozložení kostí a vnitřních orgánů. Dále se v praxi tato metoda využívá při nedestruktivním testování materiálů, součástek a objektů, a to zejména ve strojírenství, ve stavitelství, při studiu uměleckých předmětů atd. Největší pokrok v zobrazovacích metodách pomocí rentgenového záření tkví v posledních letech zejména v pokročilých možnostech detekce rentgenových paprsků 2D plošnými detektory s přímou digitalizací do počítače.

V podmínkách laboratorního praktika je možné provádět radiografii například pomocí přenosného školního rentgenového zařízení Phywe, viz obr. 5.1 (vlevo). Toto zařízení obsahuje vyměnitelnou rentgenku (anodou může být Cu, Mo, W) o příkonu 35 W chlazenou vzduchem. Box s rentgenkou se zasouvá z levé strany a skrze malé přední okno nalevo je možné vidět rentgenku v provozu. Do velkého prostoru napravo za zasouvacím sklem, nepropustným pro rtg záření, je možné vkládat součásti experimentu, včetně detektorů, zkoumaného vzorku, různých filtrů, nebo goniometru pro natáčení vzorku. Na předním panelu je pak možné ovládat samotný zdroj, případně používaný goniometr. Přístroj je možné řídit přes počítač.



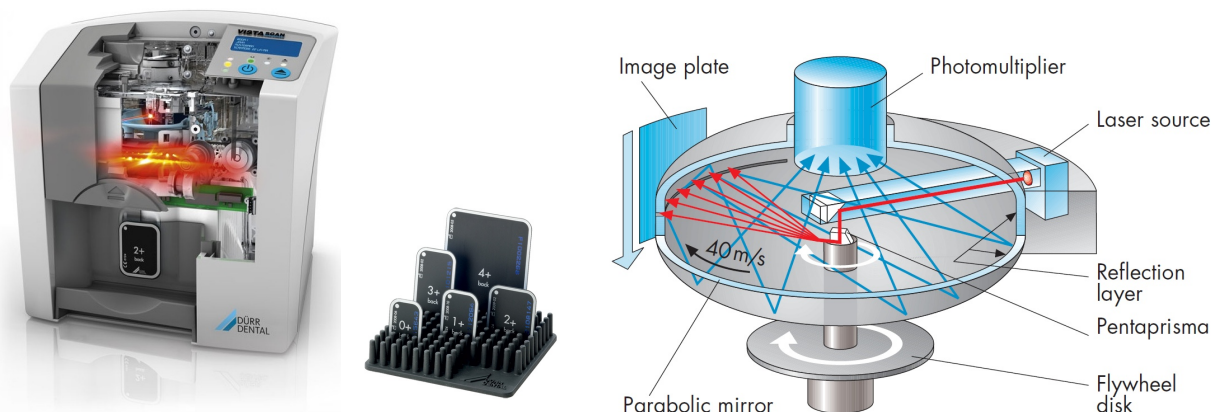
Obrázek 5.1. Školní přenosný rentgenový zdroj pro demonstraci jednoduchých fyzikálních experimentů s rtg zářením (vlevo). Schéma typického uspořádání pro radiografii (vpravo).

Principem samotné radiografie je obrazový záznam intenzity rtg záření absorbovaného v různém množství po průchodu zkoumaným preparátem v závislosti na tloušťce a prvkovém složení v místě absorbovaného paprsku, obr. 5.1 (vpravo). Koeficient absorpce je přibližně úměrný $\lambda^3 Z^4$, kde λ je vlnová délka a Z je atomové číslo. Kontrast snímku je tedy dán rozdílností chemických prvků, z nichž se skládají jednotlivé části preparátu. Rozložení intenzity po průchodu absorbujícím předmětem je pak zaznamenáno detektorem. Ten v minulosti tvořily výhradně fotografické filmy, ovšem v dnešní době jsou používány buď velmi nákladné polovodičové detektory ve formě CCD snímačů, nebo méně nákladné speciální paměťové fólie, kdy latentní obraz je dočasně uchován v materiálu pomocí excitace elektronů do vyššího stavu a následně snímán vybuzením fluorescence pomocí laseru.

V praktiku můžeme využívat buď záznamu na fotografický film, jehož následné zpracování ve fotokomoře je časově náročné, anebo provést záznam na speciální paměťovou fólii, tzv. fotostimulované fosforující (PSP) systémy, a dále obraz sejmut pomocí speciálního skeneru *VistaScan* od firmy Dürr Dental, obr. 5.2 (vlevo), vyráběného původně pro použití se zubařskými rentgeny, viz <http://www.duerrdental.com>.

Princip tvorby latentního obrazu u filmu je jiný než u paměťové fólie. Rentgenové filmy obsahují fluorescenční zesilovací vrstvu, která převádí část rtg paprsků na světlo a to společně se zbylými rtg fotony interaguje se zrnitou vrstvou AgBr ve fotografické emulzi. Obraz je pak potřeba vyvolat fotografickou vývoj-

kou tak, že neosvětlená místa dostanou černou barvu od vyloučeného kovového stříbra. Aby emulze přestala být citlivá na světlo, je nezbytné film nechat projít ustalovačem. Tento proces trvá obvykle i několik desítek minut.



Obrázek 5.2. Digitální „zubařský“ skener VistaScan (vlevo) s umělým pohledem dovnitř pro snímání paměťových fólií (uprostřed). Princip snímání latentního rtg obrazu pomocí laseru ze záznamové fólie do fotonásobiče a digitální formy (vpravo).

V případě moderních PSP systémů se používá snímací paměťová fólie, obr. 5.2 (uprostřed), která je tvořena ve většině případů sloučeninami BaF-halogenidů (BaFCl, BaFBr, BaFI) s přídavkem europia jako aktivátoru. Ionty Eu^{2+} nebo Eu^{3+} pak slouží jako luminescenční centra. Při osvětlení fólie rentgenovými paprsky se část fotonů ihned přetransformuje na viditelné světlo formou spontánní emise podobně jako u zesilující vrstvy na rtg filmu, ale podstatná část energie je uložena pomocí elektronů excitovaných na vyšší hladiny od příměsí Eu, které tvoří pro elektrony pasti. Na těchto metastabilních hladinách mohou vydržet až několik hodin. V případě používaných fólií v praxi je to spíše řádově několik desítek minut. Proto je nezbytné do doby, než se vytvořený obraz samovolně ztratí, vytvořený latentní obraz přečíst.



Obrázek 5.3. Příklady radiogramů pořízených na paměťové fólie VistaScan v pořadí: akvarijní ryba, šiška borovice, mořská škeble, integrovaný obvod, žába, čmelák, 9V baterie, micro M2 paměťová karta.

Čtení latentního obrazu z paměťové fólie se provádí fokusovaným bodovým laserovým paprskem, který skenuje fólii bod po bodu. Laser dané vlnové délky vybudí v zrnech aktivní vrstvy halogenidů na fólii stimulovanou emisi a tyto vybuzené sekundární fotony jsou pomocí parabolického zrcadla přeměřovány do fotonásobiče. Následně je signál přímo digitalizován do počítače. Schéma mechanismu vyčítání paměťové fólie je uvedeno na obr. 5.2 (vpravo). Proces skenování trvá obvykle do 1 minuty a rozlišení snímku je $\sim 23 \mu\text{m}$ (teoretické rozlišení je $\sim 13 \mu\text{m}$).

Díky této pokročilé moderní technologii se zpracování radiografických snímků urychlí mnohonásobně oproti mokrému vyvolávání klasických filmů. Výhodou je též digitální obraz, který je okamžitě k dispozici pro další zpracování na počítači. V rámci praktika je možné provádět radiogramy na dvoupalcové fólie, na které si student může „zrentgenovat“ svůj vlastní přinesený vzorek. Na obr. 5.3 jsou uvedeny příklady radiografických snímků biologických a technických preparátů získaných v praktiku s přístrojem Phywe na paměťových fóliích *VistaScan*.