VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV FYZIKÁLNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF PHYSICAL ENGINEERING

DETEKCE A STUDIUM KRYSTALOVÝCH DEFEKTŮ V Si DESKÁCH PRO ELEKTRONIKU

DETECTION AND ANALYSIS OF CRYSTAL DEFECTS IN Si WAFER FOR ELECTRONICS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE — Bc. MICHAL PÁLENÍČEK
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — Ing. MICHAL URBÁNEK, Ph.D.
SUPERVISOR

ŠKOLITEL SPECIALISTA — Ing. LUKÁŠ VÁLEK
EXTERNAL SUPERVISOR

BRNO 2012

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav fyzikálního inženýrství
Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Michal Páleníček

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Fyzikální inženýrství a nanotechnologie (3901T043)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Detekce a studium krystalových defektů v Si deskách pro elektroniku

v anglickém jazyce:

Detection and analysis of crystal defects in Si wafer for electronics

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Základním materiálem pro elektronický průmysl je monokrystalický křemík. ON Semiconductor Czech Republic produkuje Czochralského metodou monokrystaly křemíku, které se dále zpracovávají do formy jednostranně leštěné desky. Během růstu krystalů v něm dochází ke vzniku poruch krystalické struktury, tzv. krystalových defektů. Tyto defekty mohou negativně ovlivňovat proces výroby elektronických součástek i jejich funkci. Přítomnost a rozložení krystalových defektů v křemíkových deskách jsou proto sledovány s ohledem na zákaznické specifikace. Jednou z metod kontroly kvality křemíkové desky je oxidační test, kterým se hodnotí přítomnost oxidací indukovaných vrstevných chyb (OISF) na povrchu leštěné křemíkové desky. Vyhodnocení OISF se provádí manuálním rastrováním povrchu desky pomocí optického mikroskopu. Cílem diplomové práce je automatizace této kontroly včetně konstrukce motorizovaného stolku a vytvoření příslušného řídícího SW. Dalším úkolem je charakterizace produkce ON Semiconductor Czech Republic s ohledem na výskyt defektů, především OISF (využitím nového automatizovaného postupu).

Cíle diplomové práce:

1. Vypracujte rešeršní studii k vyhodnocování krystalových defektů v Si deskách, zaměřte se zejména na defekty OISF.

2. Navrhněte a realizujte motorizovaný stolek (ke stávajícímu optickému mikroskopu) pro automatické vyhodnocování OISF na povrchu leštěných Si desek.

3. Proveďte studii rozložení OISF na Si deskách produkovaných v ON Semiconductor Czech Republic.

Seznam odborné literatury:

[1] W. C. O`Mara, R. B. Herring, L. P. Hunt (Eds.), Handbook of semiconductor silicon technology, Noyes Pub., Park Ridge, New Jersey, 1990.

[2] L. Válek, J. Šik, Defect Engineering during Czochralski Crystal Growth and Silicon Wafer Manufacturing, in Crystal Growth / Book 1, N. Kolesnikov (Ed.), In-Tech, ISBN 979-953-307-046-8, Vukovar, Croatia, 2011.

[3] A. Borghesi, B. Pivac, A. Sassella, A. Stella, Oxygen Precipitation in Silicon, Journal of Applied Physics, Vol. 77, No. 9, (May 1995), pp. 4169-4244. ISSN 0021-8979.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Michal Urbánek, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/2012.

V Brně, dne 24.11.2011

L.S.

prof. RNDr. Tomáš Šikola, CSc. Ředitel ústavu	prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c. Děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá studiem a vyhodnocováním krystalografických defektů na povrchu křemíkových desek vyrobených Czochralského metodou. Zaměřuje se především na růstové defekty a kyslíkové precipitáty, které hrají významnou roli při vzniku vhodných nukleačních center pro růst vrstevných chyb. Růst vrstevných chyb v blízkosti povrchu křemíkových desek je podpořen jejich oxidací a selektivním leptáním. Takto výrazněné vrstevné chyby se označují jako OISF z anglického *Oxidation Induced Stacking Fault*. Prostorové rozložení OISF na desce dává zpětnou vazbu k procesu tažení monokrystalu křemíku a kvalitě povrchu desek. Dále je v této práci popis zařízení pro automatickou detekci a analýzu OISF, které bylo vyvinuto pro firmu ON Semiconductor v Rožnově pod Radhoštěm.

KLÍČOVÁ SLOVA

krystalografické defekty, křemík, defekty v křemíku, monokrystalický křemík, polovodičový křemík, Czochralského metoda, vrstevné chyby, precipitace kyslíku, oxidové precipitáty, OISF

ABSTRACT

The thesis deals with the study and analysis of crystallographic defects on the surface of silicon wafers produced by Czochralski method. It focuses primarily on growth defects and oxygen precipitates, which play an important role in the development of appropriate nucleation centers for growth of stacking faults. The growth of stacking faults near the surface of silicon wafers is supported by their oxidation and selective etching. Such a highlighted stacking faults are known as the OISF (Oxidation Induced Stacking Fault). Spatial distribution of OISF on the wafer gives feedback to the process of pulling silicon single crystal and wafers surface quality. Moreover the work describes the device for automatic detection and analysis of OISF, which was developed for ON Semiconductor company in Rožnov Radhoštěm.

KEYWORDS

crystallographic defects, silicon, silicon defects, monocrystalline silicon, semiconductor silicon, Czochralski method, stacking faults, oxygen precipitation, oxide precipitates, OISF

BIBLIOGRAFICKA CITACE

PÁLENÍČEK, M. *Detekce a studium krystalových defektů v Si deskách pro elektroniku.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 79 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Michal Urbánek, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že svoji diplomovou práci na téma „Detekce a studium krystalových defektů v Si deskách pro elektroniku“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce, školitele specialisty a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně 27. května 2011 ……

Podpis autora

Poděkování

Toto poděkování bych rád věnoval všem, kteří se jakýmkoli způsobem podíleli na této práci, především Ing. Michalu Urbánkovi, Ph.D. a Ing. Lukáši Válkovi za vedení práce, odborné rady a jejich čas strávený konzultacemi. Velké díky patří kolegům Ing. Daliboru Šulcovi a Ing. Pavlu Wertheimerovi za spolupráci na programové části a elektronice. Dále všem, kteří mě podporovali a umožnili mi věnovat se této práci: tímto vyslovuji díky své rodině za velkou podporu a trpělivost, jež se mi dostávalo po celou dobu studia.

Obsah

1 Úvod 15
2 Křemík pro polovodičový průmysl 17
2.1 Historie 17
2.2 Výroba křemíku 17
2.3 Krystalografické vlastnosti křemíku 18
2.4 Růst krystalu křemíku 20
2.4.1 Czochralského metoda 20
2.4.2 Metoda zonální tavby - Float zone 24
2.5 Výroba desek z ingotu monokrystalického křemíku 25
2.5.1 Zpracování ingotu křemíku 25
2.5.2 Řezání křemíkových desek 25
2.5.3 Lapování 26
2.5.4 Leptání 26
2.5.5 Depozice oxidu na zadní stranu desek 26
2.5.6 Leštění 26
2.5.7 Chemické čištění 26
2.5.8 Finální mechanické čištění 27
3 Defekty v křemíku 29
3.1 Přehled defektů v křemíku 29
3.1.1 Intrinsické bodové defekty 30
3.1.2 Extrinsické bodové defekty 30
3.1.3 Dislokace 31
3.1.4 Vrstevné chyby 31
3.1.5 Objemové defekty 32
3.2 Vliv defektů na elektronické součástky 32
3.3 Precipitace kyslíku 33
3.4 Vznik růstových defektů v krystalu 35
3.4.1 Bodové defekty – mechanismus zabudovávání do krystalu 35
3.4.2 Radiální rozložení defektů 36
3.5 OISF prstenec 39
3.5.1 Pásy růstových defektů 39

3.5.2 OISF prstenec ... 40
4 Studium vrstevných chyb v Si deskách ... 41
4.1 Selektivní leptání ... 41
4.2 OISF Test ... 41
5 Automatizace měření a vyhodnocování OISF ... 43
5.1 Konstrukce skenovacího stolku ... 43
5.1.1 Konzole stolku ... 44
5.1.2 Skenovací stolek ... 46
5.2 Elektronika a software skenovacího stolku ... 49
5.2.1 Koncept zařízení ... 49
5.2.2 Ovládací elektronika ... 51
5.2.3 Software Defect Detect ... 54
6 Experimentální měření ... 61
6.1 Příprava vzorků ... 61
6.2 Pozorování rozložení vrstevných chyb - OISF test ... 61
6.3 Shrnutí experimentu ... 65
7 Závěr ... 67
8 Reference ... 69
9 Přílohy ... 73
10 Seznam použitých zkratek ... 77

1 Úvod

Monokrystalický křemík je nejrozšířenějším materiálem používaným v polovodičovém průmyslu. K získání monokrystalu křemíku vede sofistikovaný proces od chemického zpracování křemenného písku k tepelnému zpracování polykrystalu křemíku a postupnému přetavení v monokrystal.

Výchozím materiálem pro výrobu elektronických součástek jsou křemíkové (Si) desky. Substrát - Si deska - má vliv na výslednou elektronickou součástku. Konkrétně defekty v Si deskách mají jak příznivé, tak i nepříznivé účinky. Původ defektů je již ve výrobě monokrystalu křemíku, kdy se defekty zabudovávají do krystalu a vyvíjejí se během tepelného zpracování. Další zpracování krystalu a samotná výroba má také vliv na kvalitu Si desek.

Detekce a analýza defektů na povrchu Si desek poskytuje zpětnou vazbu k procesu růstu monokrystalu křemíku a vypovídá o kvalitě povrchu desek. Tato práce se zabývá vyhodnocováním vrstevných chyb (tzv. OISF test) na povrchu desek vyrobených Czochralského metodou ve firmě ON Semiconductor (ONČR) v Rožnově pod Radhoštěm.

Důležitou součástí této práce je naplnění projektu Laboratoř Diagnostiky Defektů a Analýzy povrchu Si desek (LDDA) mezi Fakultou Strojního Inženýrství (FSI) a ONČR. Zadáním projektu je návrh a konstrukce automatizovaného xy stolku pro skenování křemíkových desek o průměru 150 a 200 mm. Stolek musí být kompatibilní se stávajícím optickým mikroskopem provozovaným v ONČR v Rožnově pod Radhoštěm. Dále je součástí projektu vývoj softwaru pro obsluhu skenování a snímání obrázků. Software musí být schopen detekovat defekty na křemíkových deskách a na závěr provést jednoduché vyhodnocení (např. hustota defektů, mapa defektů, atd...).

Doposud byly defekty detekovány a počítány operátorem obsluhujícím ruční posuv mikroskopu s nedostatečným rozsahem v obou osách (*xy*). Automatizací stávajícího procesu kontroly defektů na křemíkových deskách (OISF test) se tento krok zpřesní a výrazně urychlí.

2 Křemík pro polovodičový průmysl

2.1 Historie

Historie křemíku a jeho použití v polovodičovém průmyslu sahá do 50. let 20. století. Do té doby bylo nejrozšířenějším materiálem v polovodičovém průmyslu germanium. Pro výrobu monokrystalu germania se původně používala metoda tažení krystalu z taveniny [1], kterou vyvinuli v Bellových laboratořích Teal, Little a Bühler [2], [3]. Teprve později byla pojmenována po Janu Czochralském a dnes se označuje jako Czochralského metoda a je nejrozšířenější pro výrobu monokrystalu křemíku. Tato metoda vznikla, když Czochralski v roce 1916 omylem namočil pero do kelímku s taveninou cínu místo kalamáře a zjistil tak, že na konci pera se vytvořil monokrystal cínu. Křemík byl tehdy v pozadí, protože oproti germaniu má nižší pohyblivost nosičů náboje.

Jednou ze společností, která se křemíku přesto věnovala, byla firma Siemens, které se podařilo vytvořit vysoce čistý křemík tvořeným jediným krystalem, což vedlo ke vzniku metody Siemens Process [4]. Současně byla v Bellových laboratořích [5] vyvinuta metoda zonálního zušlechťování, která vedla k vytvoření metody zonální tavby (tzv. Float Zone) a k jejímu zavedení do masové produkce křemíku. Díky dalším inovacím společnosti Fairchild Semiconductor - pasivaci povrchu křemíku jeho oxidem a konceptu integrovaných obvodů - se křemík stal pro polovodičový průmysl zajímavějším než germanium, u kterého nebyla pasivace povrchu možná.

Co se týče růstu krystalu, v roce 1959 Dash objevil, že při vytvoření zúženého krčku před růstem krystalu dochází k vymizení dislokací, které se pak nešíří dále do těla krystalu [6]. Díky tomuto se podstatně zlepšily vlastnosti a čistota monokrystalu křemíku.

2.2 Výroba křemíku

Křemík, latinsky *silicium*, je hojně se vyskytující prvek v zemské kůře. Zaujímá v ní přibližně 28%. Nevyskytuje se však v čisté podobě, ale jen ve sloučeninách (křemičitany a křemen). Křemenný písek je hlavním zdrojem čistého křemíku pro polovodičový průmysl.

První fází přeměny křemenného písku na čistý křemík je chemická reakce křemene s uhlíkem. Tímto se získává takzvaný hutní křemík,

$$\mathrm{SiO_2} + 2\mathrm{C} \rightarrow \mathrm{Si^H} + 2\mathrm{CO}\,, \qquad 2.1$$

kde $\mathrm{Si^H}$ je hutní křemík. V dalším kroku probíhá čištění hutního křemíku. Přeměnou hutního křemíku na trichlorsilan ($\mathrm{SiHCl_3}$), destilací a následnou reakcí s vodíkem ($\mathrm{H_2}$) vzniká čistý křemík (Si) vhodný pro elektroniku. Chemické reakce jsou popsány rovnicemi 2.1 až 2.4.

$$\mathrm{Si^H} + 3\mathrm{HCl} \rightarrow \mathrm{SiHCl_3} + \mathrm{H_2} \qquad 2.2$$

$$\text{čištění } \mathrm{SiHCl_3} - \text{destilace} \qquad 2.3$$

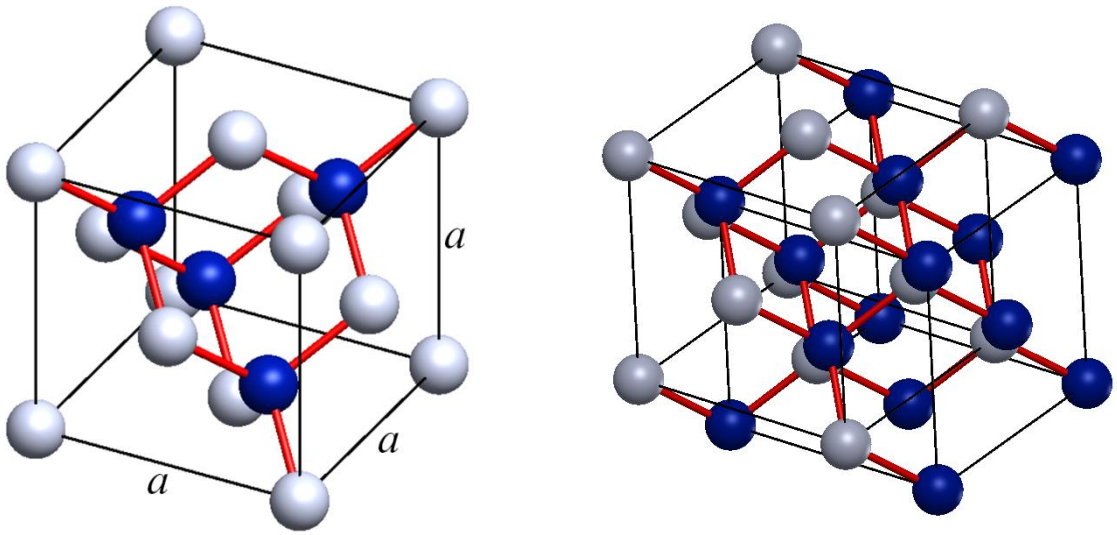
$$\mathrm{SiHCl_3} + \mathrm{H_2} \rightarrow \mathrm{Si} + 3\mathrm{HCl} \qquad 2.4$$

Takto získaný křemík (Si) je vysoce čistý, ale není monokrystalický. Dalším zpracováním tohoto polykrystalického křemíku lze vyrobit vysoce kvalitní monokrystal křemíku (viz kap. 2.4).

2.3 Krystalografické vlastnosti křemíku

V krystalických materiálech jsou atomy uspořádány v pravidelně opakujícím se vzoru, který je charakteristický pro daný materiál. Struktura krystalických materiálů je tedy určena základním prvkem vzoru - primitivní buňkou. Délka hrany primitivní buňky je známá jako mřížkový parametr. Takovéto uspořádání se zachovává na velké vzdálenosti, vzhledem k rozměrům primitivní buňky. V krystalové mřížce může existovat sedm typů symetrie - sedm krystalografických soustav. Některé z nich mohou obsahovat atomy navíc mezi rohovými atomy, máme tedy 14 různých krystalových mříží - Bravaisovy mřížky. Krystalová struktura a symetrie hrají významnou roli a určují řadu fyzikálních i chemických vlastností materiálu.

Křemík (Si) je prvkem IV. skupiny periodické tabulky. Jako jiné izolanty a polovodiče (diamant, germánium, šedý cín) krystalizuje v diamantové kubické mřížce. Diamantová kubická mřížka je zkonstruována ze dvou plošně centrovaných kubických mřížek (FCC), které se překrývají a jsou vzájemně posunuty o čtvrtinu tělesové úhlopříčky v jejím směru (obr. 2.1).



Obr. 2.1 Primitivní buňka kubické diamantové mřížky (vlevo), která je tvořena dvěma FFC mřížkami vzájemně posunutými ve směru tělesové úhlopříčky o čtvrtinu její délky (vpravo).

Mřížkový parametr *a* je 0,5430710 nm v čistém Float Zone křemíku (viz kapitola 2.4.2). V závislosti na přítomnosti příměsí se může mřížkový parametr lišit. Například pro 10^{18} atomů/cm^3 intersticiálního kyslíku je a = 0,5430747 nm [7].

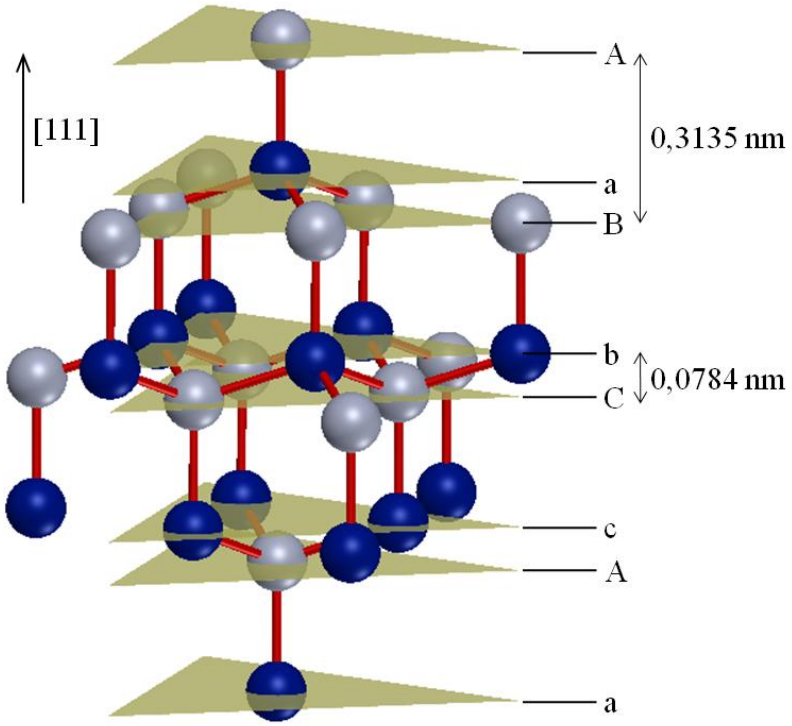
Pro popis rovin v krystalu, které protínají pozice jednotlivých atomů se používají Millerovy indexy. Tyto indexy *h,k,l* označují směry krystalografických os *x,y,z* v reciprokém prostoru. Millerovy indexy tedy určují rovinu atomů v krystalu podle jejich průsečíků s krystalografickými osami. Rovina v Millerových indexech se zapisuje jako (hkl), záporný směr se zapíše čarou nad indexem $(\mathrm{h\bar{k}l})$. Indexy se vyjadřují nejmenšími čísly - podělené svým největším společným dělitelem. Složenou závorkou se označuje skupina krystalograficky ekvivalentních rovin, například $\{100\}$ označuje roviny (100), (010), (001), $(00\bar{1})$, $(0\bar{1}0)$ a $(\bar{1}00)$. Millerovy indexy lze použít i pro zapsání směru, používá se zápis pomocí hranatých závorek [hkl]. <hkl> použijeme pro zápis skupiny krystalograficky ekvivalentních směrů. Tělesové úhlopříčky primitivní buňky křemíkové mřížky mají směr <111> ([8], str. 351).

V jednoduché kubické mřížce je vzdálenost mezi rovinami, d_{hkl} dána vztahem:

$$d_{\mathrm{hkl}} = \frac{a}{[(\mathrm{h}^2 + \mathrm{k}^2 + \mathrm{l}^2)]^{\frac{1}{2}}}\,, \qquad 2.5$$

kde a je mřížkový parametr, tedy vzdálenost mezi rovinami $\{100\}$.

Diamantová kubická mřížka (obr. 2.1) je periodická krystalová struktura, jejíž primitivní buňka je složena z osmi celých atomů. Diamantová mřížka má čtyři atomy navíc mezi svými rohovými atomy, každý leží na jedné ze čtyř tělesových úhlopříček. Proto roviny $\{100\}$, které obsahují všechny atomy jsou totožné s rovinami $\{400\}$. Skutečná vzdálenost mezi atomovými rovinami ve směru krystalografických os je $a/4$ nebo-li 0,1358 nm. Mezi rovinami $\{110\}$ je jedna atomová rovina navíc, tyto roviny jsou popsány indexy $\{220\}$ a vzdálenost mezi nimi je $a/\sqrt{8}$ nebo-li 0,1920 nm. Čtyři nejbližší sousedící atomy diamantové kubické mřížky jsou umístěny ve vrcholech čtyřstěnu s jedním atomem v jeho středu a jsou vzájemně vázány kovalentní vazbou. Přímky spojující dva nejbližší sousedící atomy jsou ve směrech <111>. Ve směru [111] jsou roviny (111) rozmístěny nerovnoměrně. Páry přilehlých rovin (aB, bC, cA, ...) jsou od sebe mnohem více vzdáleny, než roviny přilehlé. Roviny popsány písmeny *A, B, C* a *a, b, c* na obr. 2.2 patří dvěma různým FCC mřížkám, navzájem posunutým ve směru [111] o čtvrtinu tělesové úhlopříčky. Vzdálenost rovin (111) jedné FCC mřížky (A, B, C) je třetina tělesové úhlopříčky primitivní buňky nebo-li $a/\sqrt{3} = 0{,}3135$ nm. Vzdálenost přilehlých rovin (aB, bC, cA) je čtvrtina vzdálenosti rovin (111) jedné FCC mřížky, tedy $a/4 \cdot \sqrt{3} = 0{,}0784$ nm ([8], str. 352).



Obr. 2.2 Schematický náhled uspořádání párů rovin (111) v diamantové kubické mřížce. Atomy v rovině označené stejným písmenem (velkým i malým) leží přímo pod sebou ve směru [111].

2.4 Růst krystalu křemíku

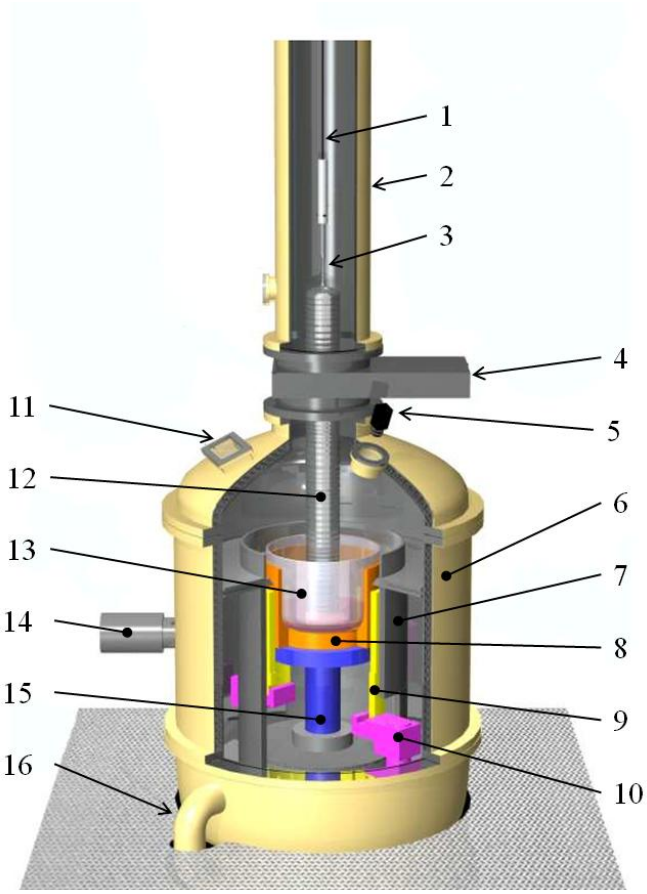
Tato kapitola se zabývá způsobem přípravy monokrystalického krystalu křemíku. Popsána je zejména Czochralského (CZ) metoda tažení krystalu, protože tato práce je vypracována ve spolupráci s ON Semiconductor Česká republika (ONČR), která produkuje křemíkové krystaly připravované právě touto metodou. Metoda zonální tavby (Float Zone) je zde popsána jen stručně. Podrobný přehled přípravy monokrystalického křemíku je v [9] a [10].

2.4.1 Czochralského metoda

Základem Czochralského metody je růst krystalu z taveniny obsažené v kelímku. Jak již bylo uvedeno, metoda růstu polovodičových krystalů z kelímku byla vyvinuta v padesátých letech 20. století a až později jí bylo přiřčeno pojmenování podle J. Czochralskiho, který se zabýval související tématikou. Dnes tato metoda dominuje křemíkovému průmyslu. ONČR produkuje ingoty o průměru pět až osm palců (desky o průměru 125 až 200 mm). Světovým standardem jsou dnes průměry 200 a 300 mm, v roce 2002 byl prezentován teoreticky možný průměr ingotu až 450 mm [11].

2.4.1.1 Czochralského tažička

Jedná se o zařízení pro "přeměnu" polykrystalického křemíku na monokrystalický. CZ tažička se skládá z horní a dolní komory, které jsou navzájem odděleny deskovým ventilem. Horní komoru lze otevřít, zatímco dolní komora je pod vakuem. Komory jsou čerpány na provozní tlak v řádu 10^3 Pa. Czochralského tažička a její jednotlivé části jsou zobrazeny na obr. 2.3.



Obr. 2.3 Řez Czochralského tažičkou. 1) ocelové lanko, 2) horní komora, 3) monokrystalický zárodek, 4) deskový ventil, 5) pyrometr - měření průměru, 6) dolní komora, 7) tepelný deflektor, 8) podpůrná grafitová nádoba, 9) topné těleso, 10) přívod proudu topného tělesa, 11) průzor, 12) ingot monokrystalu křemíku, 13) křemenný kelímek s taveninou, 14) pyrometr - měření teploty, 15) podstavec kelímku, 16) odvod argonu a ostatních plynů. Převzato z [12].

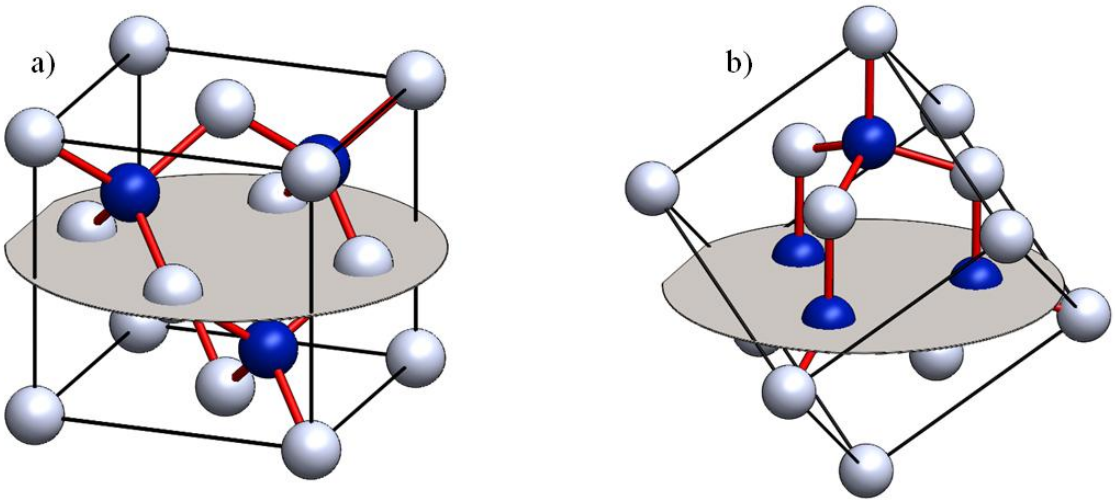
Dolní komora je tvořena ocelovým pláštěm chlazeným vodou. Na vnitřní straně pláště jsou tepelné deflektory odrážející teplo od pláště směrem do středu dolní komory tažičky. Ohřev je zajištěn topným tělesem meandrovitého tvaru, které je zahříváno průchodem elektrického proudu na výkon přibližně 100 kW [13]. Plášť komory je od topidla izolován grafitovými prvky. Ve středu dolní komory, uvnitř topného tělesa je křemenný kelímek, který nese polykrystalickou křemíkovou vsádku (obr. 2.4). Kelímek je umístěný v podpůrné grafitové nádobě na podstavci. Podstavec pod křemenným kelímkem je upevněn na hřídeli, která zajišťuje svislý a rotační pohyb kelímku.

Obr. 2.4 Fotografie přípravy vsádky polykrystalického křemíku.v kelímku ze křemenného skla. Převzato z [12].

Horní komora jímá tažený krystal a nese lanko či hřídel, který zajišťuje svislý a rotační pohyb taženého ingotu.

2.4.1.2 Proces tažení krystalu

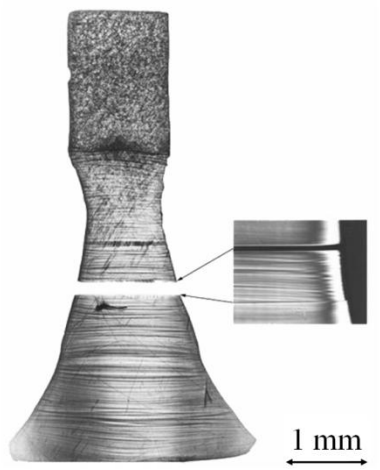
Před procesem růstu krystalu je křemenný kelímek naplněn polykrystalickou vsádkou (20 - 100 kg) (obr. 2.4). Vsádka může obsahovat dopanty, které ovlivní elektrické vlastnosti výsledné křemíkové desky. Kelímek s vsádkou je umístěn na podstavec v dolní komoře. V horní komoře je uchycen na ocelovém lanku monokrystalický křemíkový zárodek. Ten určuje krystalografickou orientaci výsledného krystalu, běžné jsou orientace (100) a (111) (obr. 2.5). Obě komory jsou uzavřeny a čerpány na pracovní tlak, při kterém tažičkou proudí argon.



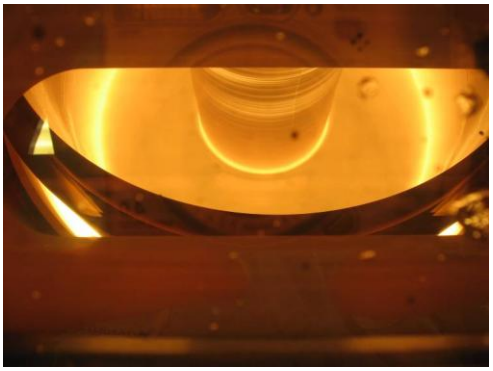
Obr. 2.5 Schematické zobrazení krystalografické orientace křemíkových desek. a) křemíkové desky (100), b) křemíkové desky (111)

Poté, co je křemíková vsádka roztavena a proudění taveniny je stabilní, je monokrystalický zárodek přibližován k tavenině, až dojde k dotyku. V okamžiku, kdy se zárodek dotkne taveniny (obr. 2.8a), dochází k teplotnímu šoku, který je doprovázen vznikem dislokací. Ty se šíří dále do krystalu v průběhu jeho růstu. Po zahřátí zárodku a ustavení fázového rozhraní krystal-tavenina je zárodek tažen směrem vzhůru. Na fázovém rozhraní dochází ke krystalizaci. Průměr krystalu lze řídit rychlostí tažení krystalu, rychlost tažení je kontrolována posunem lanka/hřídele a regulací teploty taveniny. Takto řízený růst krystalu je označován jako tažení krystalu [13].

Typická rychlost tažení krystalu je pod 1 mm/min. V první fázi tažení krystalu (obr. 2.8b) je rychlost zvýšena na 2 – 6 mm/min [14], tím se zmenší průměr krystalu. Tato fáze se nazývá Dashovo zúžení. Takto dochází k postupnému vymizení dislokací "vyběhnutím" na povrch. Po několika centimetrech úzkého krčku je krystal bez dislokací. Vymizení dislokací je zobrazeno na obr. 2.6.



Obr. 2.6 Obrázek na rozhraní zárodku a úzkého krčku v rovině (110) pořízený metodou rentgenové topografie. V místě zúžení dochází k vymizení dislokací vzniklých termálním šokem. [10]

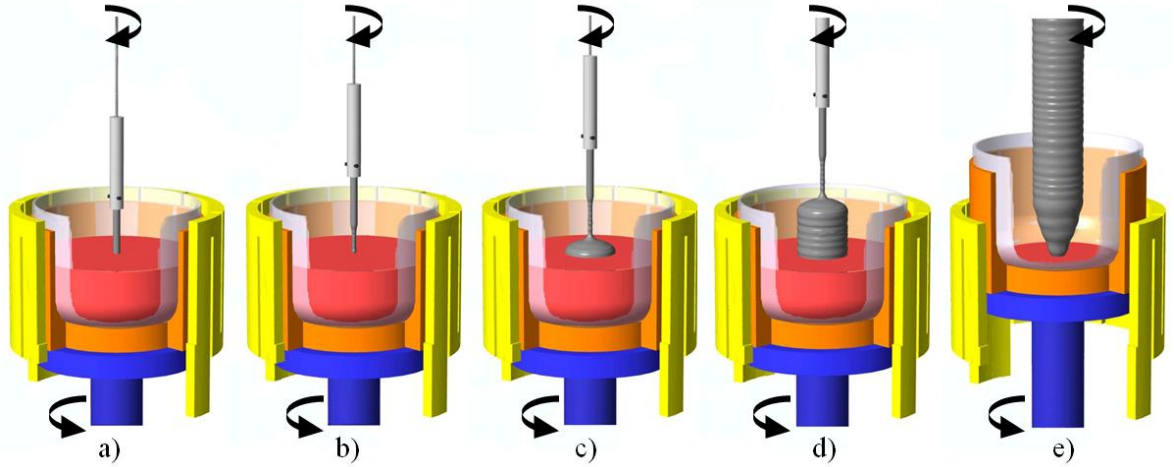


Obr. 2.7 Fotografie prstence na menisku rozhraní krystalu a taveniny.
Převzato z [12].

Druhá fáze je růst hlavy krystalu (obr. 2.8c). Rychlost tažení je výrazně snížena na desetiny mm/min [14]. Průměr krystalu pomalu roste. Při přibližování k požadovanému průměru krystalu se rychlost tažení krystalu postupně zvyšuje, dokud neroste krystal s požadovaným průměrem.

Ve třetí fázi roste válcovité tělo krystalu (obr. 2.8d). Požadovaný průměr těla krystalu je kontrolován pyrometrem nebo kamerou, která snímá jasný prstenec okolo krystalu (obr. 2.7). Prstenec vzniká odrazem světla vyzařovaného horkým křemenným kelímkem na menisku, který vzniká na rozhraní smáčením krystalu taveninou. Proto je hladina (rozhraní) udržována ve stálé výšce. To je zajištěno svislým pohybem podstavce kelímku, což je patrné na obr. 2.8. Typická rychlost růstu těla krystalu je 0,5 - 1 mm/min [14].

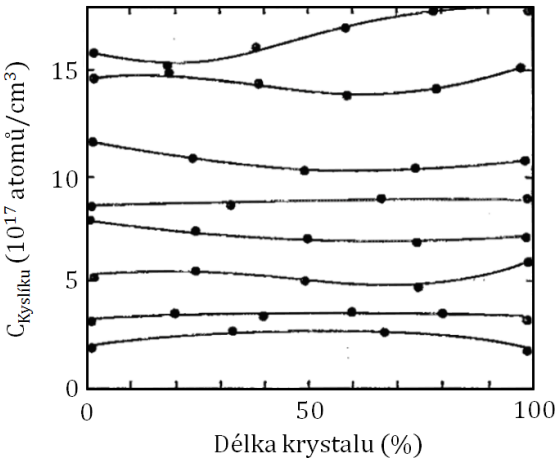
Čtvrtá, konečná fáze tažení krystalu (obr. 2.8e) spočívá ve zvýšení rychlosti tažení a následném zúžení válcovitého těla krystalu do kónického konce krystalu. Tato fáze je analogií k Dashovu zúžení. Při odtržení krystalu od zbytku taveniny opět dochází k termálnímu šoku, což vede ke



Obr. 2.8 Schematické zobrazení procesu tažení ingotu monokrystalu křemíku.
a) okamžik dotyku monokrystalického zárodku s taveninou, b) první fáze - Dashovo zúžení, c) druhá fáze - růst hlavy krystalu, d) třetí fáze - růst těla krystalu, e) čtvrtá fáze - růst konce krystalu
Podklady převzaty z [12].

vzniku dislokací. Tyto dislokace se mohou šířit zpátky do těla krystalu. Zmenšením průměru, na kterém dochází ke krystalizaci, minimalizujeme termální šok při odtržení a taky vzdálenost, do které se rozšíří vzniklé dislokace směrem do těla krystalu.

V průběhu růstu krystalu rotuje krystal i kelímek (tavenina) v opačných směrech. Rotování krystalu (10 - 20 min^{-1}) napomáhá homogennímu rozložení příměsí. Rotace kelímku (2 - 10 min^{-1}) zajišťuje stabilní proudění taveniny a ovlivňuje koncentraci kyslíku v krystalu (obr. 2.9). Kyslík se rozpouští do taveniny ze stěn křemenného kelímku. Při běžných podmínkách tažení se do krystalu dostane cca 1 % rozpuštěného kyslíku, přibližně 99 % se vypaří z hladiny taveniny ve formě SiO ([15] str. 4171). Proudící argon pomáhá odstranění SiO z prostoru, kde dochází k růstu krystalu.

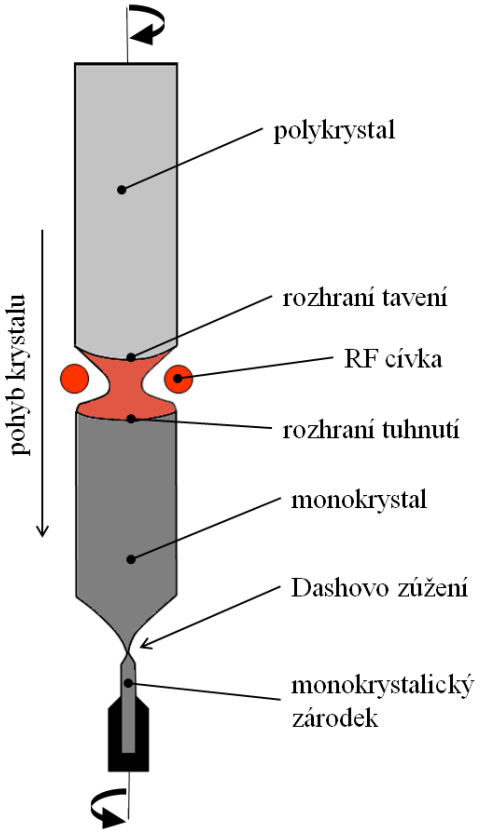


Obr. 2.9 Axiální rozložení koncentrace kyslíku pro osm různých krystalů rostlých za stejných podmínek s rozdílnými rotacemi krystalu a kelímku. Norma měření koncentrace kyslíku nebyla uvedena. [16]

2.4.2 Metoda zonální tavby - Float zone

Metoda Float Zone je založena na přetavení a rekrystalizaci polykrystalického ingotu křemíku. K roztavení se používá radiofrekvenční cívka (RF cívka). Tavení se začíná na spodním konci svisle orientovaného ingotu, kde je polykrystal Si v kontaktu s monokrystalickým zárodkem. Roztavený polykrystal při tuhnutí krystalizuje podle vzoru zárodku – rekrystalizuje v monokrystal. Postupným pohybem ingotu krystalu směrem svisle dolů dochází k rekrystalizaci v celém jeho objemu. Postup lze opakovat několikrát a získat tak monokrystal křemíku vysoké čistoty.

Dopanty se do krystalu zavádějí ve formě plynů, které se připouštějí do oblasti přetavování krystalu RF cívkou.



Obr. 2.10 Schematické zobrazení růstu krystalu metodou zonální tavby.

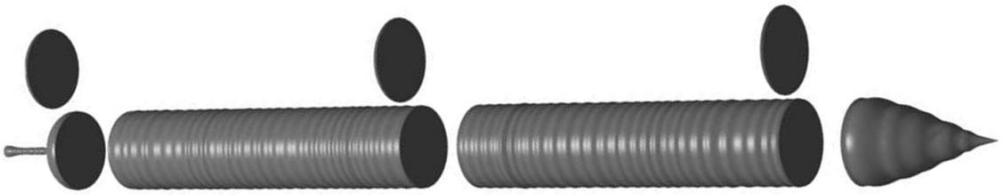
2.5 Výroba desek z ingotu monokrystalického křemíku

Postup výroby křemíkových desek je velice sofistikovaný a skládá se z několika kroků. V této kapitole jsou jednoduše popsány jednotlivé kroky typického postupu.

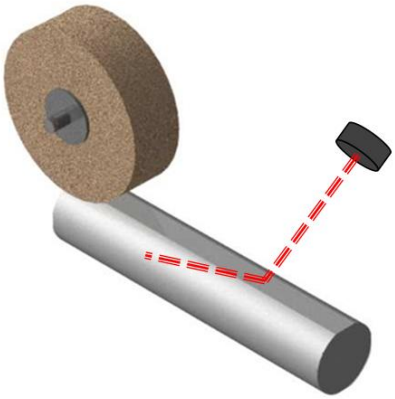
2.5.1 Zpracování ingotu křemíku

Po vytažení krystalu z tažičky se krystal rozřeže na několik částí. Odřeže se hlava a kónický konec krystalu, tělo krystalu se rozdělí na několik dílů. Z míst řezů se odřeže několik tenkých desek, na kterých se provádí kontrolní měření koncentrace kyslíku, uhlíku a odporu. Rozřezaný ingot je zobrazen na obr. 2.11.

Válcové části krystalu (tělo krystalu) podstoupí proces broušení. Krystal se obrousí do požadovaného průměru válce. Dále se pomocí rentgenové difrakce zkontroluje krystalografická orientace a obrousí se faseta. Podle fasety lze jednoduše určit orientaci krystalografických rovin ve výsledné desce. Obroušený ingot s fasetou je na obr. 2.12.



Obr. 2.11 Rozřezaný ingot křemíku. Převzato z [12].



Obr. 2.12 Obroušený ingot s určenou krystalografickou orientací pomocí rentgenové difrakce a vybroušenou fasetou. Převzato z [12].

2.5.2 Řezání křemíkových desek

Touto operací začíná samotná výroba křemíkových desek. Válce krystalu jsou uchyceny tmelem na grafitovou podložku, což zajistí stabilitu desek i po odřezání. Na řezání se běžně používají kotoučové pily s vnitřním bortem nebo drátové pily. Oba typy pil využívají k řezání diamantové částice a místo řezu je chlazeno a omýváno vodou s detergentem. To zvýší výtěžnost a minimalizuje narušení povrchu desek.

Nařezaným deskám se zaoblí hrany brusným kotoučem s drážkou, což zabrání štípání hran a zvýší mechanickou pevnost desek.

Odstranění narušeného povrchu desek po řezání je zajištěno následujícími operacemi:

2.5.3 Lapování

Pro získání hladkosti, rovinnosti a vzájemné rovnoběžnosti obou povrchů se používá oboustranné lapování desek. Jedná se o velice jemnou formu broušení.

Desky jsou umístěny v unašečích mezi lapovací kotouče. Kotouče jsou statické a desky v unašečích vykonávají planetový pohyb. Během procesu je na desky nanášena brusná směs. Jedná se o suspenzi roztoku Al_2O_3, vody a detergentu.

Po lapování jsou desky více rovinné a jsou zbaveny části narušeného povrchu.

2.5.4 Leptání

K odstranění zbylé části narušeného povrchu se používá chemické leptání desek. Jedná se buď o louhové nebo kyselinové leptání.

V případě louhového leptání se jedná o roztok hydroxidu draselného (KOH) s vodou. Probíhající reakce je zastavena oplachem desky deionizovanou vodou.

V případě kyselinového leptání se používá roztok HNO_3 a HF. Tento proces je hodně prudký a vyžaduje regulaci zvenčí.

2.5.5 Depozice oxidu na zadní stranu desek

Tento proces je typický pro silně dopované křemíkové desky, u nichž hrozí riziko, že během následujících vysokoteplotních operací dojde k vydifundování dopantu do prostředí a kontaminaci přední strany desky. Nanesením vrstvy oxidu křemičitého na zadní stranu desky, která nepropustí dopant, se rozptylu zabrání. Chemickou reakci popisuje rov. 2.6:

$$SiH_4 + O_2 \xrightarrow{420\,°C} SiO_2 + 2H_2\,. \qquad 2.6$$

K nanášení vrstev oxidu se používá depozice z plné fáze (LPCVD, z angl. *low pressure chemical vapor deposition*).

2.5.6 Leštění

V dalším kroku desky podstupují operaci leštění. Leštěním je dosaženo hladšího povrchu bez jakýchkoli poruch. Jedná se o chemicko-mechanický proces. Leští se obě strany nebo jen přední strana desek. Leštící suspenze se skládá z částic SiO_2 ve vodě s organickou zásadou a detergentem.

2.5.7 Chemické čištění

Po leštění ulpí na povrchu řada nečistot. Jedná se o částice, organické zbytky a kovové ionty.

Chemické čištění sestává z několika kroků máčení desek v chemických roztocích:

a) Horká směs kyseliny sírové a peroxidu vodíku (piraňa) rozloží veškeré organické nečistoty.
b) Zředěná kyselina fluorovodíková odleptá tenkou oxidovou vrstvu s nečistotami a odstraní zbytky suspenze po leštění.
c) Roztok SC1 (zahřátá směs NH_4OH, H_2O_2 a vody) odstraní částice na povrchu a vytvoří na povrchu tenkou, čistou hydrofilní vrstvu oxidu, což zamezuje znovu usazení částic na povrchu.

d) Kovové ionty se odstraní roztokem SC2 (směs HCl, H_2O_2 a vody).

V průběhu celého procesu chemického čištění se na desky může působit akustickými vlnami (megazvukem), které napomáhají odstraňování nečistot z povrchu.

2.5.8 Finální mechanické čištění

Posledním krokem výroby křemíkových desek je mechanické čištění. Jedná se o čištění kartáči s PVA vlákny ve zředěné atmosféře hydroxidu amonného. Následuje oplach deionizovanou vodou a po vysušení jsou desky připraveny k expedici.

3 Defekty v křemíku

Brzy po začátku masové produkce čistých křemíkových krystalů v 60. letech dvacátého století se zjistilo, že ve vysoce čistém křemíku je zvýšený výskyt skluzových čar, což má nepříznivý vliv na výsledné elektronické součástky. Později bylo zjištěno, že skluzy nejsou jediným zdrojem nežádoucích efektů. Za nežádoucí efekty jsou zodpovědné defekty, které se mohou vyskytovat v křemíkových krystalech a deskách. Mohou vznikat během růstu krystalů nebo při pozdějším tepelném či mechanickém zpracování desek.

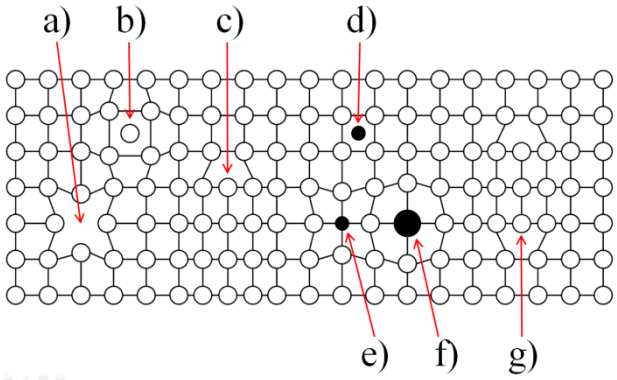
3.1 Přehled defektů v křemíku

Monokrystalický křemík vyrobený Czochralského metodou je přesně definovaný materiál vysoké kvality. Atomy v krystalu křemíku jsou rozloženy v pravidelném uspořádání v kubické diamantové mřížce (viz kap. 2.3). Ve směru [111] jsou vzájemně horizontálně rozmístěny sousední páry atomových rovin. Jedná se o tři možná umístění atomů, která se po třech cyklech opakují (obr. 2.2). Jakékoli narušení tohoto uspořádáni je označováno jako defekt v krystalu [17].

Tyto defekty mohou vznikat při tažení CZ krystalu, při následném zpracovávání (krystalu, desek) nebo při výrobě elektronických součástek. Defekty v krystalech jsou děleny podle jejich tvaru a velikosti. Křemíkové krystaly a desky mohou obsahovat ([8], str. 347):

a) Bodové defekty – křemíkové vlastní intersticiály, vakance, intersticiální nečistoty (kyslík), substituční nečistoty (dopanty, uhlík)
b) Čarové defekty – hranové a šroubové dislokace, dislokační smyčky
c) Plošné defekty – vrstevné chyby
d) Objemové defekty – shluky bodových defektů

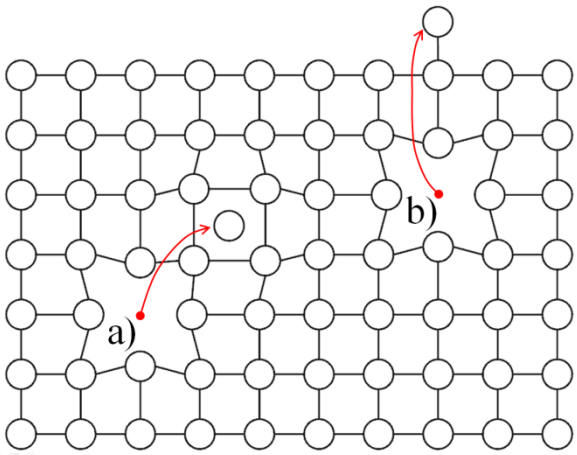
Výše zmíněné defekty jsou schematicky zobrazeny na obr. 3.1.



Obr. 3.1 Schematické zobrazení defektů v krystalu křemíku. (a) Vakance, (b) vlastní intersticiální atom, (c) hranová dislokace, (d) intersticiální příměsový atom, (e) substituční atom s menším poloměrem, (f) substituční atom s větším poloměrem, (g) extrinsická vrstevná chyba.

3.1.1 Intrinsické bodové defekty

Vakance a vlastní intersticiály jsou intrinsické defekty v krystalové mřížce [18]. Intrinsické bodové defekty se do krystalu zabudovávají na rozhraní krystalu a taveniny. Předpokládá se, že se v blízkosti teploty tání vyskytují v rovnovážných koncentracích. Dále se mohou bodové defekty tvořit nebo zanikat Frenkelovým (vznik intersticiálu a vakance vysunutím atomem do intersticiální polohy, obr. 3.2a) a Schottkyho (vznik vakance přemístěním atomu na povrch krystalu, obr. 3.2b) mechanismem, rekombinací, interakcí s objemovými defekty a interakcí s povrchem během tepelného zpracování desek. Křemíkový vlastní intersticiál je považován za víceméně volný atom obsazující tetrahedrální nebo hexahedrální intersticiální pozice v mřížce. Vakance je neobsazený uzlový bod mřížky. Malé shluky vakancí a intersticiálů mohou být také považovány za bodové defekty [19].



Obr. 3.2 Shematické zobrazení a) Frenkelovy a b) Schottkyho poruchy.

3.1.2 Extrinsické bodové defekty

3.1.2.1 Dopanty

Jsou to primární extrinsické bodové defekty v CZ křemíku. Dopanty jsou prvky 3. a 5. sloupce periodické tabulky, obsazují substituční polohy v mřížce. Mají vliv na elektrické vlastnosti křemíku. Typická koncentrace je 10^{15} - 10^{19} cm^{-3} ([8], str. 364). Do CZ křemíku se dostávají během jeho růstu z taveniny.

3.1.2.2 Kyslík

Kyslík je jedním z nejdůležitějších extrinsických bodových defektů v křemíku [17]. Do křemíku se dostává během růstu krystalu podobně jako dopanty. Zdrojem kyslíku je křemenný kelímek, který se rozpouští do taveniny. Většina kyslíku se z taveniny vypaří (99%) ve formě SiO_2, malá část (1%) se zabuduje do krystalu [15]. Typické koncentrace kyslíku v křemíku jsou v řádu 10^{17} cm^{-3}. Kyslíkové atomy obsazují intersticiální polohy v krystalové mřížce. Kyslíkové intersticiály se mohou shlukovat a vytvářet elektricky aktivní řetězce – termální donory (shluky kyslíkových atomů vznikajících okolo 450 °C). Dále má kyslík vliv na precipitaci, getraci (viz [20]) a mechanické vlastnosti křemíku ([8], str. 365).

3.1.2.3 Atomy kovů

Jsou to nežádoucí příměsi. V největší míře se vyskytují tzv. přechodné kovy (Cu, Ni, Fe). Za vysokých teplot zaujímají atomy kovů intersticiální i substituční polohy, s klesající teplotou

mohou vytvářet komplexy s atomy dopantů, nebo precipitovat do objemových defektů. Stav kovu v krystalické mřížce závisí na jejich rozpustnosti v křemíku. Typické koncentrace kovů v křemíku jsou pod 10^{12} cm^{-3}. Prudký pokles rozpustnosti kovů v křemíku s klesající teplotou v kombinaci s vysokou difuzivitou při nízkých teplotách umožňuje využití getrace relaxačního typu (viz [20]) pro odstraňování kovů z aktivních oblastí zařízení [21].

3.1.3 Dislokace

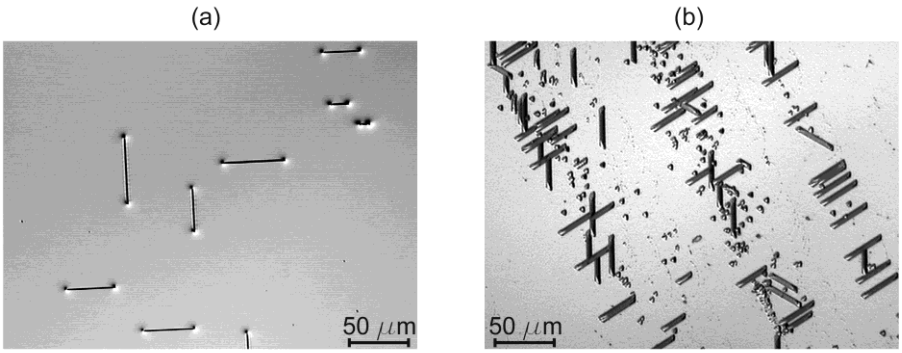
Křemíkové krystaly připravované Czochralského metodou jsou charakteristické absencí dislokací. Dislokace v křemíkových deskách vznikají díky napětí vzniklému při vysokoteplotním zpracování při výrobě desek a elektronických součástek. V křemíku lze pozorovat hranové, šroubové dislokace a dislokační smyčky v souvislosti s precipitáty kyslíku, shluky vlastních intersticiálů a skluzy [21], [17].

3.1.4 Vrstevné chyby

Vrstevné chyby (SF, z angl. *stacking faults*) lze rozdělit na extrinsické a intrinsické. Extrinsická vrstevná chyba je nadbytečná atomová rovina (nebo několik rovin) v regulérní krystalické mřížce a intrisická je naopak chybějící atomová rovina v mřížce. V případě křemíku jsou vrstevné chyby vždy extrinsického charakteru (obr. 3.1) [17] a jsou tvořeny disky atomových dvojrovin (111), vložených mezi ostatní roviny (111) v uspořádání AaBbCc v diamantové mřížce [21].

Vrstevné chyby v křemíku vznikají heterogenně shlukováním vlastních intersticiálů na vhodných nukleačních centrech, např. na oxidových precipitátech, precipitátech kovů nebo na mechanicky způsobených defektech [15]. Objemové a povrchové vrstevné chyby jsou rozlišovány podle polohy nukleačního centra.

Pomocí selektivního leptání lze zobrazit vrstevné chyby a následně je pozorovat pomocí optického mikroskopu nebo jiných metod (obr. 3.3).



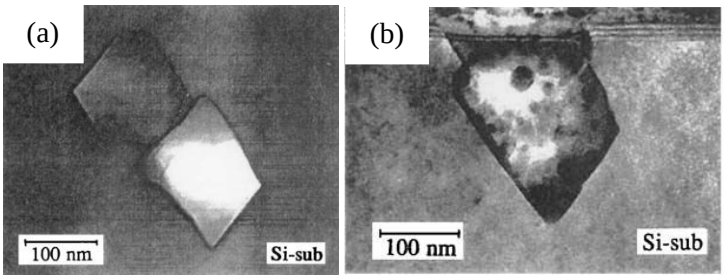
Obr. 3.3 (a) Objemové vrstevné chyby na křemíku (100). Vrstevné chyby vznikají ve dvou možných směrech svírajících úhel 90°. Různá délka defektů je způsobena různou hloubkou nukleačních center vrstevných chyb (SF) pod leptaným povrchem. (b) Povrchové vrstevné chyby na křemíku (111). Vrstevné chyby vznikají ve třech možných směrech svírajících úhel 120°. Stejná délka vrstevných chyb potvrzuje nukleaci na povrchu. Převzato z [21].

Objemové vrstevné chyby v křemíkových deskách mohou růst v oblastech se silnou precipitací kyslíku [17], kterou doprovází silná emise vlastních intersticiálů. Růst povrchových vrstevných chyb může být také podpořen zvýšením koncentrace vlastních intersticiálů, čehož lze dosáhnout záměrnou oxidací povrchu. Vrstevné chyby pozorované na povrchu desky po oxidaci povrchu (a po selektivním leptání) se nazývají OISF (z angl. *Oxidation Induced Stacking Faults*) [21].

3.1.5 Objemové defekty

3.1.5.1 Defekty vakantního typu

Volné vakance se mohou v krystalu při vysokých teplotách shlukovat [22] a vytvářet defekty zvané void (obr. 3.4a). Void defekty zaujímají tvar osmistěnu se stěnami v rovinách {111}. Osmistěn může být narušen povrchem desky. Takto vznikají na povrchu desek defekty označené jako COP (z angl. *Crystal Originated Particle*) (obr. 3.4b). Typické rozměry void a COP defektů jsou v řádu 10 až 100 nm, a typická hustota v krystalu je 10^6 cm^{-3} [21].



Obr. 3.4 Obrázky z transmisního elektronového mikroskopu: (a) void defekt v křemíku a (b) COP defekt na povrchu Si desky. Převzato z [22].

3.1.5.2 Defekty intersticiálního typu

Křemíkové intersticiály se mohou shlukovat a vytvářet intersticiální dislokační smyčky [23]. Defekty intersticiálního typu jsou označovány angl. termínem *Swirl defects* pocházejícím z jejich typického spirálovitého rozložení na desce (swirl = vír). Jejich typické velikosti jsou 1 až 10 μm [21].

3.1.5.3 Oxidové precipitáty

Precipitací atomů intersticiálního kyslíku vznikají částice SiO_x (x = 1-2), tyto částice se označují jako oxidové precipitáty nebo precipitáty kyslíku [17]. Morfologie oxidových precipitátů závisí na teplotě a přesycení při jejich vzniku a primárně je určena poměrem mezi energií napětí mříže a povrchovou energií precipitátu. Za nízkých teplot (400 - 650 °C) se vytvářejí precipitáty jehlového tvaru. Precipitáty diskového tvaru vznikají při 650 - 950 °C, dále pak při vysokých teplotách (nad 950 °C) vznikají tvary s minimální povrchovou energií. Díky anizotropii povrchové energie jsou upřednostňovány roviny {111} kvůli minimalizaci energie, proto vznikají precipitáty ve tvaru osmistěnu [15]. Při vysokém přesycení a extrémních teplotách mohou vznikat i precipitáty kulovité [21].

3.2 Vliv defektů na elektronické součástky

Kvůli požadavkům na výrobu vysoce funkčních a výkonných elektronických součástek je důležité omezit mikrodefekty v krystalu a eliminovat přítomnost nečistot (zejména těžkých kovů) v aktivních oblastech zařízení.

Zatímco objemové defekty vakantního a intersticiálního typu mají na elektronické součástky takřka vždy nepříznivý vliv, precipitáty kyslíku mohou působit příznivě i nepříznivě [24]. Příměsi těžkých kovů mají vždy nepříznivý účinek [25].

Za sníženou dielektrickou pevnost hradlového oxidu jsou zodpovědné defekty vakantního typu. Oxidací povrchu křemíkových desek dojde k překrytí COP defektů. Na hranách COP defektů v místě styku s oxidem dochází k zesílení elektrického pole a následným průrazům oxidu [13].

Dislokační smyčky tvořené intersticiálními defekty v aktivních oblastech desky fungují jako vodivé cesty. Pokud jsou dekorovány kovy, mohou způsobovat zkraty a silné proudy v závěrném směru [21].

Termální donory, které vznikají shlukováním kyslíkových atomů okolo teploty 450 °C, jsou elektricky aktivní a mohou ovlivňovat parametry zařízení spojené s měrným odporem substrátu. Termální donory se vyznačují slabými vazbami, proto se při zvýšení teploty (nad 600 °C) rozpadají. Kyslíkové precipitáty jsou naopak defekty poměrně stabilní, jejich existence je v průběhu měnící se teploty podmíněna kritickou velikostí zárodku (viz kap. 3.3). Jak již bylo zmíněno, precipitáty kyslíku mají nepříznivé i příznivé účinky. Mezi nepříznivé patří degradace integrity hradlového oxidu, snížení střední doby života minoritních nosičů náboje a zvýšení svodových proudů v závěrném směru. Mezi příznivé účinky se řadí zvýšení mechanické pevnosti desek a funkce getračních center k odstranění kovových nečistot [14], [24].

Působení defektů hraje významnou roli ve funkci elektronických součástek, proto je kontrola defektů v krystalu nedílnou součástí výroby křemíku pro elektroniku.

3.3 Precipitace kyslíku

Jak již bylo zmíněno v kapitole 2.4.1, kyslík se dostává do krystalu křemíku v průběhu jeho růstu. Typické koncentrace jsou $5 - 10 \cdot 10^{17}$ atomů/cm^3 (norma měření koncentrace kyslíku nebyla uvedena) (viz [17], str. 463). V průběhu celého procesu výroby křemíkových desek se může stav kyslíku v křemíku měnit, kyslík může tvořit různé komplexy (kyslíkové precipitáty, termální donory, vazby s vakancemi atd.). Forma komplexu, kterou kyslík vytvoří, závisí na mnoha faktorech, jako jsou počáteční koncentrace kyslíku, teplota a doba žíhání, teplotní historie krystalu a další. Precipitace kyslíku, jeden z nejdůležitějších dějů v procesu vzniku mikrodefektů, je řízena zejména přesycením. Přesycení je poměr koncentrace kyslíku přítomného v krystalu C_{ox} a rovnovážné koncentrace nasycení C_{ox}^{*}.

Nejjednodušší model popisující precipitaci kyslíku v křemíku bere v úvahu model homogenní nukleace. Tato aproximace je vhodná pro lehce dopované desky bez dalších příměsí.

Na precipitaci kyslíku lze nahlížet jako na dvoufázový proces. První fáze je nukleační a druhá fáze je růst precipitátů. O precipitaci kyslíku více v [15], [26].

V nukleační fázi dochází ke vzniku shluků několika atomů kyslíku uvnitř křemíkové mřížky. Tyto shluky kyslíku nazveme zárodky. Pro desky z CZ křemíku ($C_{ox} = 5 - 10 \cdot 10^{17}$ atomů/cm^3) je optimální teplota pro vznik zárodku mezi 650-850 °C (obr. 3.5). Zárodky mohou vznikat kdekoliv v neporušených oblastech mřížky (homogenní nukleace) [26]-[30] nebo v místech poruchy mřížky (heterogenní nukleace) [31]. Oba typy nukleace mají různé rozložení zárodků a zárodky různých velikostí. V této fázi je změna v koncentraci intersticiálního kyslíku zanedbatelná. [14]

Druhou fází precipitace je růst precipitátů. Při vyšších teplotách (nad 900°C) [14] dochází k difuzi intersticiálních atomů kyslíku směrem k zárodkům vzniklých během nukleační fáze. V této fázi je vznik nových zárodků zanedbatelný. Existující zárodky mohou zanikat nebo dále růst. Růstem vznikají oxidové částice SiO_x až mikronových rozměrů ([21], str. 55). Změna v koncentraci intersticiálního kyslíku je v této fázi velká.

V případě homogenní teorie nukleace, kdy je zanedbáno napětí vzniklé vytvořením oxidových zárodků v křemíkové mřížce, vycházíme ze změny volné energie ΔG popsané rovnicí 3.1

([15], str. 4184). Ke změně volné energie ΔG dochází při vzniku kulovitých zárodků o poloměru r. Tato změna je dána součtem dvou příspěvků.

$$\Delta G = 4\pi r^2 \gamma - \frac{4}{3}\pi r^3 \Delta G_V \,, \qquad 3.1$$

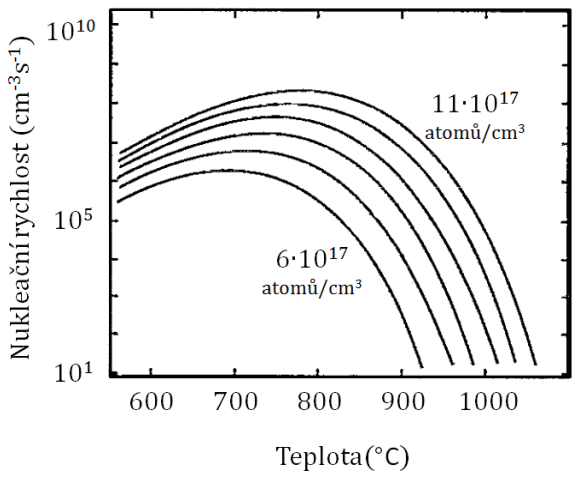
kde γ je povrchová energie na rozhraní na jednotku plochy a ΔG_V je objemová Gibbsova energie popsána výrazem ([15], str. 4184):

$$\Delta G_V = \frac{k_B T}{V_p} \ln \frac{C_{ox}}{C_{ox}^*} \,, \qquad 3.2$$

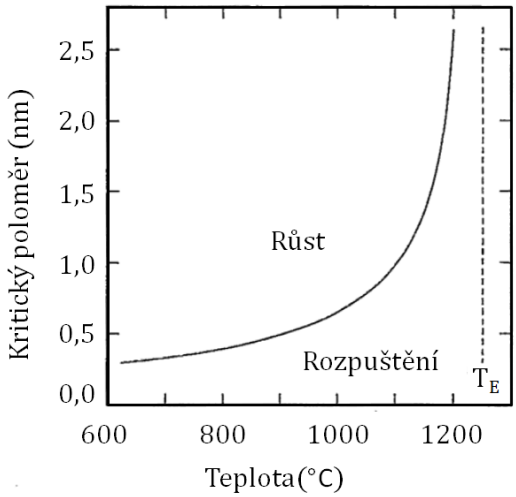
kde k_B je Boltzmannova konstanta, T je teplota a V_p je objem kyslíku v oxidové částici SiO_x tvořící zárodek. První výraz rovnice 3.1 popisuje zisk energie systému díky vzniku nového povrchu. Druhý člen popisuje úbytek energie systému kvůli přesunu kyslíkového atomu z nasyceného roztoku do precipitátu.

Důležitým parametrem teorie nukleace je kritický poloměr r_c, který určuje, jestli se zárodek rozpustí (zanikne), nebo naopak dále poroste, přičemž nezávisí, zda se jedná o homogenní nebo heterogenní nukleaci. V případě, že uvažujeme homogenní nukleaci bez vnitřního napětí, získáme výraz pro kritický poloměr r_c derivováním rovnice 3.1 a položením derivace rovno nule:

$$r_c = \frac{2\gamma V_p}{k_B T \, \ln(C_{ox}/C_{ox}^*)} \,. \qquad 3.3$$



Obr. 3.5 Závislost nukleační rychlosti na teplotě pro krystaly s různým obsahem intersticiálního kyslíku, od $6 - 11 \cdot 10^{17}$ atomů/cm3. ([15] str. 4185)



Obr. 3.6 Kritický poloměr funkcí teploty, určený podle rovnice 3.3. T_E je rovnovážná teplota, kdy $C_{ox} = C_{ox}^*$. [27]

V případě, kdy poloměr zárodku je menší než kritický poloměr ($r < r_c$), je objemová energie menší než povrchová energie, změna Gibbsovy energie systému je kladná, což má za následek zánik (rozpuštění) zárodku. Když je poloměr zárodku větší než kritický ($r > r_c$), povrchová energie je menší než objemová, Gibbsova energie systému se snižuje a precipitát proto může dále růst ([15], str. 4184). Na obr. 3.6 je znázorněn kritický poloměr jako funkce teploty. Lze vidět, že kritický poloměr prudce roste nad teplotou 1000 °C. Za nižších teplot mohou růst i malé precipitáty, zatímco u vyšších teplot se precipitáty o menším poloměru rozpouštějí.

Homogenní nukleace s vnitřním napětím pocházejícím od většího objemu oxidové částice vyžaduje složitější model. Objem křemíkového atomu se liší v precipitátu (oxidové částici) V_p a v krystalické mřížce V_{Si}. Pokud vezmeme v úvahu energii způsobenou napětím v mřížce a zahrneme ji do vztahu pro změnu volné energie ΔG (více v [15], str. 4187), lze odvodit sofistikovanější vztah pro kritický poloměr r_c [30]:

$$r_c = \frac{2\gamma V_p}{(1+\delta-\varepsilon)^3 x k_B T \ \ln \frac{C_{ox}}{C_{ox}^*}\left(\frac{C_I}{C_I^*}\right)^{-\gamma}\left(\frac{C_V}{C_V^*}\right)^{\beta} - 6\mu\delta\varepsilon}, \qquad 3.4$$

kde δ popisuje změnu v objemu, ε je napětí, μ je modul pružnosti křemíku. C_I a C_V jsou koncentrace intersticiálů a vakancí, C_I^* a C_V^* pak jejich rovnovážné koncentrace. Koeficienty γ a β popisují emisi intersticiálů a absorpci vakancí spojenou s růstem precipitátu.

Kvůli nedostatku analytických metod popisujících nukleační fázi precipitace, jejich přesnosti a složitosti, je tento problém často charakterizován experimentálně. K cílené precipitaci je použito tepelné zpracování křemíkových desek, obvykle ve dvou krocích. První, nukleační krok (700 °C), který je doprovázený druhým krokem, precipitačním (1000 °C). Kyslík, který je využit při precipitaci je vyjádřen ve změně koncentrace intersticiálního kyslíku, což se dá určit pomocí infračervené (IR) spektroskopie. Hustotu vzniklých kyslíkových precipitátů lze studovat např. selektivním leptáním výbrusů desek nebo rentgenovou topografií.

3.4 Vznik růstových defektů v krystalu

K lepšímu porozumění vzniku a existenci krystalových defektů v křemíku je důležité pochopit jejich původ. V této kapitole jsou popsány prvotní zdroje a mechanismy vzniku růstových defektů v krystalu křemíku od začátku jeho růstu. Popis vychází z Voronkovovy teorie [32].

3.4.1 Bodové defekty – mechanismus zabudovávání do krystalu

Voronkovova teorie popisuje vznik růstových defektů v krystalu v několika krocích. Na rozhraní krystal-tavenina jsou do krystalu zabudovávány vlastní intersticiály a vakance. V tavenině je vysoká difuzivita bodových defektů, což umožňuje jejich pohyb směrem do rostoucího krystalu a tak vyrovnání koncentrací – intrinsické bodové defekty se v blízkosti fázového rozhraní vyskytují v rovnovážné koncentraci.

Rovnovážná koncentrace vakancí i intersticiálů klesá s teplotou. Bodové defekty jsou schopné vzájemně rychle rekombinovat, proto skutečné koncentrace intrinsických bodových defektů sledují s klesající teplotou své rovnovážné hodnoty. Při teplotě kolem 1300 °C (cca 2-3 cm nad fázovým rozhraním) jsou již všechny dostupné vakance a intersticiály zrekombinované a v krystalu zůstává jen ten typ defektu, který měl před ukončením rekombinace větší koncentraci.

V krystalu mohou vakance a intersticiály difundovat mechanismem tepelné difuze a Fickovou difuzí (difuze proti koncentračnímu gradientu), přitom jsou unášeny driftovým tokem, pohybem rostoucího krystalu. Tok bodových defektů v ose rostoucího krystalu je popsán rovnicí [33]:

$$j_z = vC - D\frac{dC}{dz} + \alpha G C\ , \qquad 3.5$$

kde v je rychlost tažení krystalu, C je koncentrace bodových defektů, D je koeficient difuze, z je vzdálenost od rozhraní krystal-tavenina, α je koeficient tepelné difuze a G je teplotní gradient.

První člen Cv rovnice je driftová složka (růst krystalu), druhý člen $D\mathrm{grad}C$ popisuje Fickovu difuzi. Třetí člen rovnice popisuje tepelnou difuzi.

Při teplotě tání T_m křemíku je rovnovážná koncentrace vakancí $C_V^*(T_m)$ vyšší než rovnovážná koncentrace intersticiálů $C_I^*(T_m)$. Driftový tok vakancí je tedy vyšší než intersticiálů. Vakance se do krystalu dostávají díky driftovému toku, přičemž tok vakancí je úměrný rychlosti tažení krystalu v. Difuzní tok je závislý na koncentračním gradientu. Koncentrační gradient je v krystalu ustaven díky rekombinaci, která na vzdálenosti 2-3 cm od fázového rozhraní výrazně snižuje koncentrace obou typů defektů. Koncentrační gradient je dán vzdáleností oblasti, v níž proběhla rekombinace. Tato vzdálenost je dána rychlostí poklesu teploty nad rozhraním. Koncentrační gradient je proto úměrný teplotnímu gradientu G. Difuzní koeficient vlastních intersticiálů je vyšší než difuzní koeficient vakancí, difuzní tok intersticiálů tedy převažuje. A proto je difuze hnacím mechanismem pro pohyb intersticiálů do krystalu a jejich tok je úměrný teplotnímu gradientu G. ([21], str. 53)

Driftový tok je tedy úměrný rychlosti tažení krystalu v, difuzní tok je řízen teplotním gradientem G. Poměrem v/G rychlosti tažení v a teplotního gradientu G lze určit, který z bodových defektů převládne a zůstane v krystalu po rekombinaci. Při teplotě okolo 1300 °C je rekombinace u konce, v krystalu zůstal jen jeden typ bodových defektů a sice ten, který měl na počátku vyšší koncentraci, tedy ten typ s vyšší hodnotou toku od fázového rozhraní.

V případě, kdy je driftový tok stejný jako difuzní (tok vakancí = tok intersticiálů), bodové defekty zrekombinují a navzájem se vyruší – dostaneme krystal bez defektů. Této situaci odpovídá kritická hodnota v/G, která je označována jako ξ.

$$\left(\frac{v}{G}\right)_{crit} = \xi \qquad 3.6$$

ξ je obecně funkcí typu příměsí v krystalu a jejich koncentrací [34],[35]. Kritická hodnota poměru ξ definuje tři případy, které mohou nastat pro poměr v/G:

a) Poměr $v/G < \xi$ - po rekombinaci převažují intersticiály, difuzní tok byl vyšší než driftový. Získáváme intersticiální typ krystalu.
b) Poměr $v/G = \xi$ - rekombinací se defekty vyrušily, difuzní tok byl roven driftovému. Získáváme krystal bez defektů.
c) Poměr $v/G > \xi$ - po rekombinaci převažují vakance, driftový tok byl vyšší než difuzní. Získáváme vakantní typ krystalu.

Rovnovážná koncentrace bodových defektů, které přežily vzájemnou rekombinaci, nadále klesá s klesající teplotou. To vede ke vzniku přesycení, které je hnací silou vzniku objemových defektů. Ve vakantním krystalu vznikají objemové defekty vakantního typu, v intersticiálním krystalu defekty intersticiálního typu. Také precipitace kyslíku má odlišný průběh v intersticiálním a vakantním krystalu. Vakantní krystal je schopen jednoduše pojmout křemíkový atom emitovaný rostoucím precipitátem, kdežto emise vlastního atomu v intersticiálním krystalu není tak jednoduchá. Precipitace kyslíku je proto obecně snazší ve vakantním krystalu.

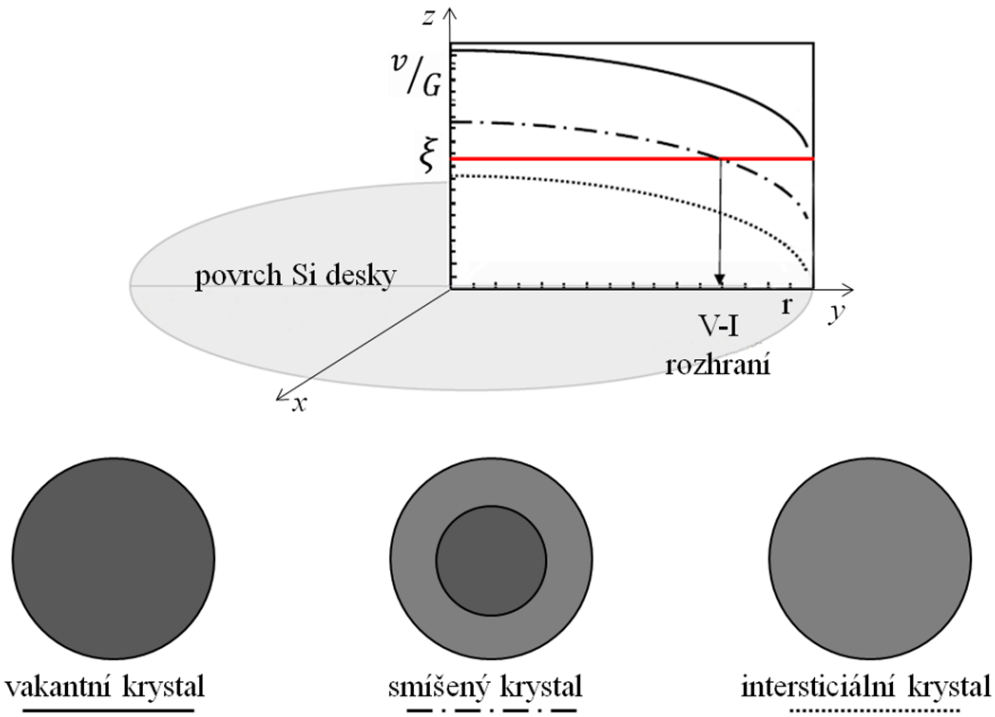
3.4.2 Radiální rozložení defektů

Jak bylo popsáno v předchozí kapitole, základní rozložení defektů v krystalu je dáno poměrem ξ. Avšak tento poměr ξ se nemění pouze ve směru osy taženého krystalu, ale mění se taky přes jeho

průměr. Povrch krystalu se ochlazuje radiací tepla do okolí. Proto se gradient tepla v axiálním směru mění se vzdáleností od středu krystalu a to tak, že G směrem k okraji roste. Rychlost tažení lze uvažovat jako konstantu pro aktuální fázi růstu krystalu, parametr v/G proto klesá s rostoucí vzdáleností od středu směrem k okraji krystalu.

V případě, kdy uvažujeme změnu v radiálním směru - kolmo na osu ingotu, kritická hodnota poměru ξ definuje následující tři případy, které mohou nastat pro poměr $\frac{v}{G}(\mathrm{r})$:

a) Křivka popisující poměr $\frac{v}{G}(\mathrm{r})$ leží pod hodnotou ξ - potom je krystal intersticiálního typu v celém jeho průměru.
b) Křivka popisující poměr $\frac{v}{G}(\mathrm{r})$ obsahuje hodnotu ξ - potom je střed ingotu tvořen krystalem vakantního typu a okraj ingotu je krystal intersticiálního typu. V ingotu vzniká hranice, tzv. V-I rozhraní. Krystal je označován jako smíšený typ.
c) Křivka popisující poměr $\frac{v}{G}(\mathrm{r})$ leží nad hodnotou ξ - potom je krystal vakantního typu v celém jeho průměru.



Obr. 3.7 Typická radiální závislost $\frac{\mathbf{v}}{\mathbf{G}}$, v grafu jsou zobrazeny všechny tři případy a k nim schematické zobrazení rozložení typů defektů na křemíkových deskách. Podklady převzaty z [14].

Rychlost tažení krystalu i teplotní gradient se v průběhu růstu krystalu mění, to znamená, že křivka $\frac{v}{G}(\mathrm{r})$ se posouvá vůči hodnotě ξ. V-I hranice v průběhu růstu krystalu proto může měnit svůj poloměr. Rozložení defektů v krystalu má vliv na tvorbu objemových defektů v křemíkových deskách. [14] Závislost $\frac{v}{G}(\mathrm{r})$ je zobrazena v obr. 3.7 pro všechny tři případy, které mohou nastat.

3.5 OISF prstenec

Tepelným zpracováním křemíkových desek mohou vznikat na deskách smíšeného typu pásy růstových defektů, díky nimž se dá vysvětlit existence takzvaných OISF prstenců (angl. *OISF ring - Oxidation induced stacking fault ring*). Tyto prstence vznikají v blízkosti V-I rozhraní a jsou tvořeny vrstevnými chybami v blízkosti povrchu desky.

3.5.1 Pásy růstových defektů

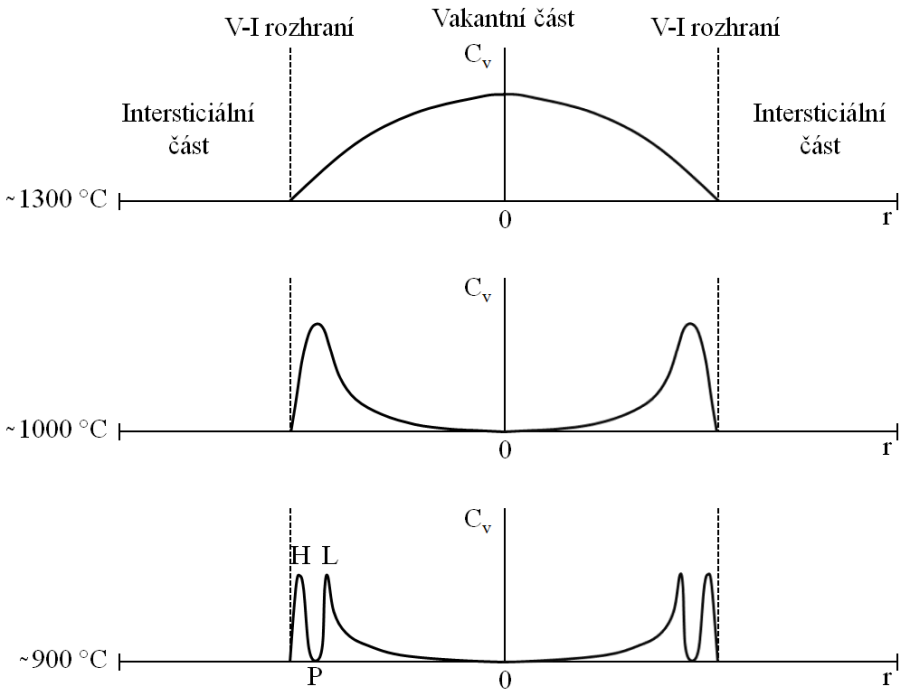
Se snižující se teplotou spojenou s růstem krystalu dochází ke shlukování vakancí a vzniku defektů voids (viz kapitola 3.1.5.1). Voids se utvářejí při teplotách těsně pod 1100 °C v místech s nejvyšší koncentrací vakancí. Vakance jsou spotřebovávány na úkor voids. Ke shlukování vakancí ve voids dochází převážně ve středu desek, kde je jejich koncentrace nejvyšší. V blízkosti V-I rozhraní je vznik voids zanedbatelný, koncentrace vakancí se zde nemění. (Obr. 3.8 první krok)

Vakance, které zůstanou v krystalu po fázi utváření voids, mají tendenci tvořit vazby s atomy kyslíku. Pod teplotou 1020 - 1050 °C se vakance vyskytují ve formě komplexů s kyslíkovými atomy (O_2V, OV). Oxidové částice vznikají v momentě, kdy je dosaženo dostatečně vysokého přesycení k precipitaci. Kyslík v oxidové formě SiO_2 zaujímá větší objem. Tato změna objemu by se dala vyjádřit vztahem 3.7:

$$2V_{\mathrm{Si,2O}} \cong V_{\mathrm{SiO_2}} \,. \qquad 3.7$$

Aby byla mřížka schopna pojmout napětí vzniklé utvářením SiO_2, využije se prostor, který zabírají vakance. Největší tvorba oxidových částicí SiO_2 je opět v místech s nejvyšší koncentrací vakancí. Tímto dojde k dalšímu spotřebování vakancí. (Obr. 3.8 druhý krok)

Pás, kde byly vakance spotřebovány na růst oxidových částicí, je označován písmenem P. Sousedící pásy, kde jsou koncentrace vakancí vyšší, písmeny H a L. Oxidové precipitáty (částice) v P- pásu mají větší velikost než v H- a L- pásech. Rozdíly ve velikostech závisí na teplotě v okamžiku jejich vzniku. (Obr. 3.8 třetí krok)



Obr. 3.8 Schéma vývoje vakancí v krystalech smíšeného typu s postupným klesáním teploty krystalu se vzdalováním se od fázového rozhraní.

3.5.2 OISF prstenec

OISF prstenec je spojen s existencí P- pásu. OISF prstenec lze popsat jako mezikruží s výskytem vrstevných chyb, které vznikají během rychlé oxidace povrchu Si desek. Při oxidaci okolo 1000- 1100 °C přežijí oxidové precipitáty pouze v P- pásu díky své nadkritické velikosti ($r > r_c$). V H- a L- pásech se oxidové precipitáty rozpouštějí. Přeživší precipitáty plní v blízkosti povrchu funkci vhodných nukleacích center vrstevných chyb.

4 Studium vrstevných chyb v Si deskách

Existuje celá řada metod pro studium defektů v krystalech křemíku. Předmětem této práce je detekce a studium vrstevných chyb. Proto jsou zde popsány metody používané pro zobrazení vrstevných chyb a OISF test. Více a obecně o metodách používaných pro studium defektů v křemíku v [21].

4.1 Selektivní leptání

Selektivní leptání se používá pro zobrazování defektů nacházejících se v blízkosti povrchu křemíkových desek. Je založeno na závislosti rychlosti leptání v různých krystalografických rovinách. Dá se říci, že nejpomaleji se leptá rovina s největší hustotou atomů, tedy rovina (111), [36]. Existuje mnoho leptadel, každé je vhodné pro zobrazování jiných typů defektů, pro leptání jiných krystalografických rovin. Přehled vybraných leptadel je uveden v tab. 4.1:

Leptadlo	Vzorec	Použití
Wright [37]	HF(49%):HNO 3 (70%):CrO 3 (5M): HAc(100%):H 2 O:Cu(NO 3) 2 •3H 2 O 2: 1: 1: 2: 2: 2g/240 ml	Vhodné pro všechny krystalografické roviny
Sirtl [38]	HF(49%):CrO 3 (5 M), 1 : 1	Optimalizováno pro (111)
Schimmel [39]	HF(49%):CrO 3 (5 M), 2 : 1	Optimalizováno pro (100)
Yang [40]	HF(49%):CrO 3 (1.5 M), 1 : 1	Vhodné pro všechny krystalografické roviny, vhodné pro zobrazení růstových defektů
Secco [41]	HF(49%):K 2 Cr 2 O 7 (0.15 M), 1:1	Optimalizováno pro (100), nevhodné pro silně dopovaný křemík typu P
MEMC [42]	HF(49%):HNO 3 (70%):HAc(100%): H 2 O:Cu(NO 3) 2 •3H 2 O 36 : 25 : 18 : 21 :1g/ 100	Bez chromu, nevhodné pro silně dopované
Dash [43]	HF(49%):HNO 3 (70%):CH3COOH(100%) 1:3:10	Bez chromu, nevhodné pro silně dopovaný křemík typu N

Tab. 4.1 Přehled vybraných leptadel. Převzato z [14].

Selektivním leptáním lze zobrazit (zvýraznit) celou řadu defektů, například vrstevné chyby, dislokace a oxidové precipitáty. Zvýrazněné defekty na povrchu desky lze pozorovat pomocí světelného mikroskopu. Rozložení defektů je v některých případech možno pozorovat i pouhým okem pod kolimovaným světlem (viz kap. 6.2).

4.2 OISF Test

Testované křemíkové desky jsou cíleně oxidovány přibližně při teplotě 1100 °C po dobu cca 1-3 hodin ve vlhkém prostředí. Tím dramaticky naroste koncentrace vlastních intersticiálů, které po přesycení heterogenně kondenzují - vznikají vrstevné chyby (SF). Vhodná místa pro kondenzaci jsou místa mechanického poškození, nečistoty a defekty, jako jsou dislokace a oxidové precipitáty. Z předchozích kapitol je tedy zřejmé, že nejvhodnější místo pro vznik vrstevných chyb je oblast P- pásu (kvůli největší koncentraci nadkritických oxidových precipitátů, nukleačních center pro vrstevné chyby).

Po oxidaci je povrch desky oleptán kyselinou flourovodíkovou, aby se odstranila oxidová vrstva. Povrch křemíku je pak vystaven selektivnímu leptání. Selektivním leptáním dojde ke zobrazení vrstevných chyb na povrchu desky, které lze pozorovat optickým mikroskopem.[21]

Díky místům, na kterých vrstevné chyby primárně vznikají, je OISF test využíván jako metoda pro určení kvality křemíkových desek.

5 Automatizace měření a vyhodnocování OISF

Automatizací stávajícího procesu kontroly vrstevných chyb OISF testu křemíkových desek se tento krok výrazně zpřesní a urychlí. Doposud se test prováděl na ručním posuvu s nedostatečným rozsahem ve dvou osách (*xy*) a defekty vyhledával a počítal operátor provádějící test.

Jak je zřejmé ze zadání projektu popsaného v úvodu, jedná se o automatizaci skenování v horizontální rovině ve dvou osách *x* a *y*. Svislý posuv - ostření mikroskopu - bude i nadále obsluhováno operátorem, který zadal a dohlíží na měření. Průběh měření bude následující: Operátor si připraví křemíkovou desku do nosiče desky. Nosič desky umístí na skenovací stolek, který je v základní pozici (*load*). Na počítači operátor v programu DEFECT DETECT (DD) (viz kapitola 5.2.3) nastaví podmínky pro skenování a spustí proces. Stolek najede na počáteční pozici skenování desky podle předchozího nastavení operátora, zastaví a vyčká na ruční zaostření mikroskopu. Po zaostření do roviny křemíkové desky operátor dá pokyn pro pokračování. Tímto začne samotné skenování a vyhodnocování snímků, operátor má možnost měření kdykoli pozastavit a přeostřit mikroskop. Po dokončení měření se stolek automaticky vrátí do pozice *load*.

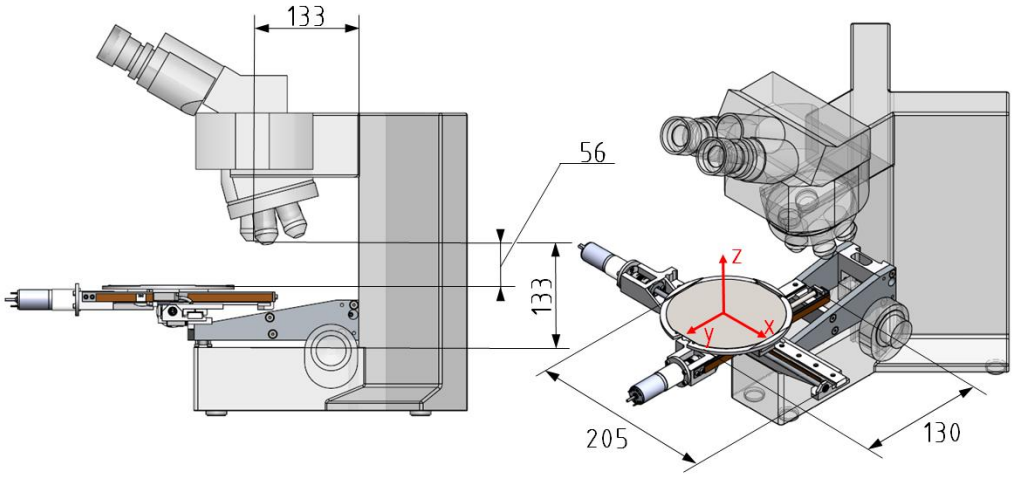
5.1 Konstrukce skenovacího stolku

Návrh stolku vychází primárně ze zadání projektu a geometrie mikroskopu, na který má být namontován.

Hlavním požadavkem je zvětšení rozsahu skenování, možnost skenování osmipalcových desek přes jejich průměr, to znamená minimální rozsah 200 mm. Tohoto lze dosáhnout pouze v jedné ose (osa *x*), a to z důvodu geometrie mikroskopu. Rozměr mezi osou objektivu a zadním sloupkem těla mikroskopu je menší než průměr osmipalcové desky. Avšak z podstaty měření je dostačující skenování přes průměr desky v jedné ose, v tomto případě podél osy *x*.

V ose *x* je rozsah skenování 205 mm a v ose *y* je 130 mm, což umožňuje skenovaní šesti- i osmipalcových desek přes jejich průměr ve směru osy *x*. V případě skenování celého povrchu desek je nutno skenovat po polovinách, to znamená v polovině skenování desku otočit o 180°.

Výše popisované a uvedené rozměry jsou schematicky zobrazeny na obr. 5.1.



Obr. 5.1 Schematické zobrazení stolku uchyceného na mikroskopu s rozměry.
Rozměr limitující skenování v ose *y* je 133 mm, pracovní prostor pod objektivem je 56 mm, rozsah skenování je 205 mm v ose *x* a 130 mm v ose *y*.

Velikost minimálního kroku posuvu je z hlediska konstrukce důležitým aspektem. V tab. 5.1 jsou uvedeny rozměry snímaných polí při různých objektivech. Standardně je pro OISF test používán objektiv se zvětšením 20x. Proto je celé zařízení optimalizováno pro toto zvětšení. Rozměr kratší strany snímaného pole je tedy 680 µm, minimální krok 600 µm by byl teoreticky dostačující. Překryv snímků by byl 40 µm na každé straně (více v kap. 5.2.3.2). To je ovšem zcela nevyhovující pro zvětšení 100x, kdy je kratší rozměr snímku 140 µm. Proto musí být minimální krok posuvu menší než tento rozměr, 100 µm a menší.

	Strana snímku [mm]	
objektiv	delší	kratší
5x	3,62	2,72
10x	1,81	1,36
20x	0,90	0,68
50x	0,36	0,27
100x	0,18	0,14

Tab. 5.1 Rozměry polí snímaných kamerou mikroskopu.

Dalším důležitým aspektem je omezený výškový rozměr pod objektivem. Výška celého stolku může být cca 40 mm, aby jej bylo možné upevnit na stávající konzole svislého *z* posuvu mikroskopu. Tím, že byla zkonstruována vlastní konzole, se získalo více prostoru pod objektivem.

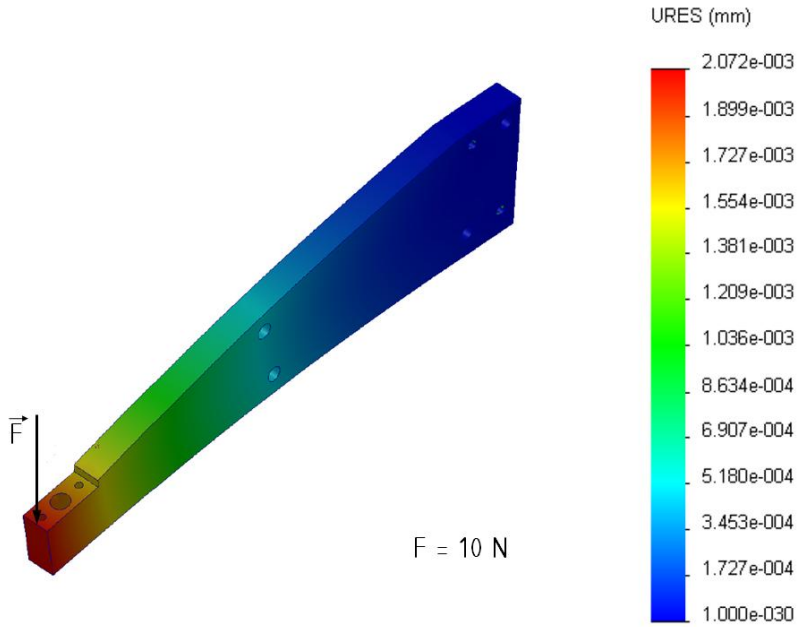
Vzhledem k faktu, že se jedná o automatizaci pouze v horizontální rovině ve dvou osách *xy*, je důležitá rovinnost celého zařízení, aby operátor nemusel každý snímek přeostřovat. Dodržení určité tolerance kolmosti mezi osami *x* a *y* je také důležité pro skenování a snímání povrchu desek.

5.1.1 Konzole stolku

Pro získání více místa pod objektivem mikroskopu byla navržena nová konzole svislého *z* posuvu. Konzole je uchycena na svislý posuv mikroskopu pomocí rybinové drážky a zajištěna brzdou (svěrným spojem).

Konzole se sestává ze dvou ramen, rybinového vedení s brzdou, příčníku, výztuhy a podpěry skenovacího stolku.

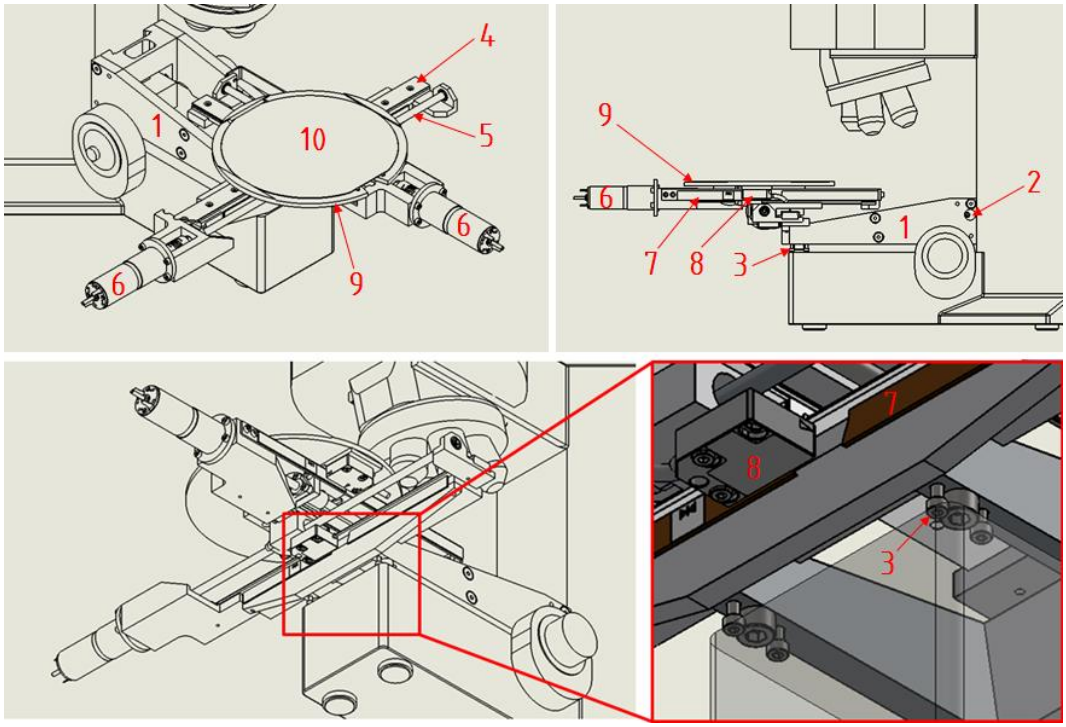
Kvůli co nejmenšímu průhybu konzole jsou ramena vyrobena z oceli 17 241, která má modul pružnosti v ohybu víc než dva a půl násobný oproti slitině hliníku použité pro ostatní díly ($1{,}9 \cdot 10^5$ MPa proti $7{,}2 \cdot 10^4$ MPa). Průhyb ramen byl spočítán v programu SolidWorks Simulations, aby se minimalizovala odchylka od roviny skenování a dále aby nedocházelo k deformacím konzole během měření, když se mění těžiště stolku.



Obr. 5.2 Simulace průhybu jednoho ramene konzole stolku.
Na širším konci je rameno pevně uchyceno pomocí fixní geometrie na otvorech pro šrouby a kolíky.
Na užším konci bylo přiloženo zatížení 1 kg ≈ 10 N.

Ramena jsou vzájemně spojena vedením s rybinovou drážkou, příčníkem a vyztuženou podpěrou skenovacího stolku. Vedení, příčník a podpěra s výztuhou jsou vyrobeny z certalu (AlZn5Mg3Cu). Sestava je sešroubována šrouby se zapuštěnou hlavou v dírách s tolerovanou polohou. Vedení s rybinovou drážkou je pojištěno čtyřmi válcovými kolíky nalisovanými do děr, které byly vystruženy po sešroubování.

Podpěra skenovacího stolku je uchycena k ramenům konzole dvěma šrouby. Součástí podpěry jsou i čtyři stavěcí šrouby pro přesné nastavení roviny, ve které probíhá skenování (roviny *xy*).



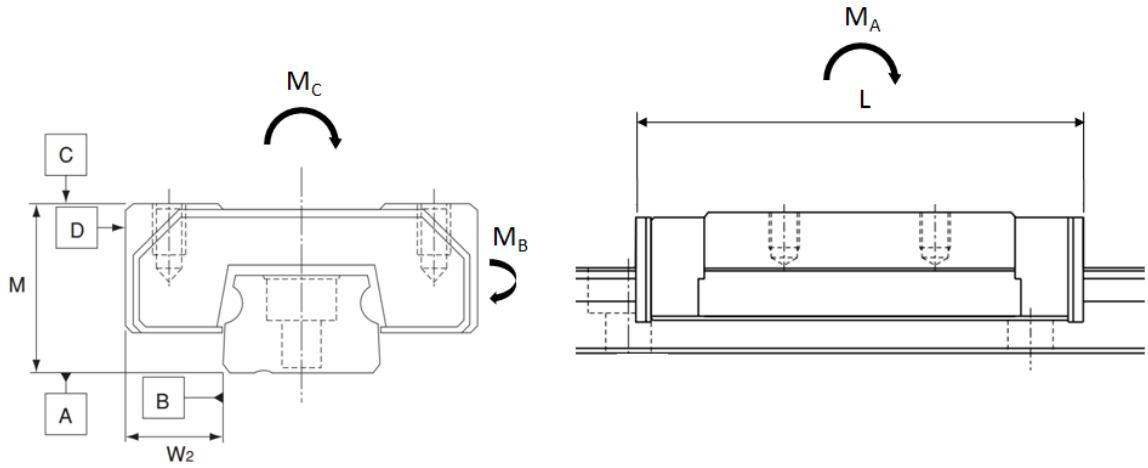
Obr. 5.3 Schematický pohled na skenovací stolek umístěný na mikroskopu. Na obrázku jsou popsány jednotlivé části stolku: 1) Konzole, 2) Uchycení konzole na z posuv mikroskopu, 3) Stavěcí šrouby pro vyrovnání stolku, 4) Lineární vedení, 5) Pohybový šroub, 6) Motor, 7) Magnetický pásek, 8) Magnetický snímač polohy, 9) Nosič desek, 10) Křemíková deska.

5.1.2 Skenovací stolek

Páteří skenovacího stolku jsou dvě lineární vedení o vysoké přesnosti od firmy THK. Jedná se o model SRS9WM s třídou přesnosti P. Rozměry vedení (obr. 5.4), tedy výška od spodní roviny kolejnice po horní rovinu vozíku je 12 mm, což je vhodné v případě omezeného prostoru pod objektivem. Délky jednotlivých vedení jsou v ose *x* 300 mm a v ose *y* 200 mm. Pro požadovaný účel byla zvolena nejvyšší třída přesnosti vedení. Výrobcem udávané hodnoty jsou v tabulce na obr. 5.4. Z grafu na obr. 5.4 lze vidět, že odchylka od roviny skenování (odchylka roviny C od A) by měla být na délce 200 mm méně než 4 µm. Hloubka ostrosti objektivu s největším zvětšením je 10 µm, to znamená, že bez zanesení jiných odchylek a nepřesností ostatními díly by nemělo být potřeba přeostřování.

Kuličky, které zajišťují pohyb vozíku po kolejnici, jsou uloženy v kleci ze samomazného plastu. Nedochází tedy k vzájemnému tření mezi kuličkami, což má pozitivní vliv na životnost lineárního vedení a také na rozběh vozíku (omezení *stick-slip* efektu – nerovnoměrný, škubavý rozjezd vlivem pružnosti soustavy a většího statického tření oproti dynamickému).

V tabulce na obr. 5.4 jsou uvedeny dovolené statické momenty, které mohou na vozík působit v jednotlivých osách. V tomto ohledu je vedení značně předimenzováno. Maximální zátěž je v případě spodního vozíku cca 900 g a v případě horního vozíku se jedná zhruba jen o 270 g. Předimenzování je však nutné pro dostatečnou tuhost kolejnice vedení, která je z důvodu úspory místa na ose *y* samonosná.



Model	Vnější rozměry			Statický dovolený moment N/m		
	Výška M	Šířka W	Délka L	M_A	M_B	M_C
	mm	mm	mm	N/m	N/m	N/m
SRS 9WM	12	30	39	14	16,2	31,5

Třída přesnosti označená výrobcem	P
Tolerance rozměru M	±0,01 mm
Tolerance rozměru W	±0,015 mm
Maximální odchylka roviny C od A na vzdálenosti 200 mm	4 µm
Maximální odchylka roviny D od B na vzdálenosti 200 mm	4 µm

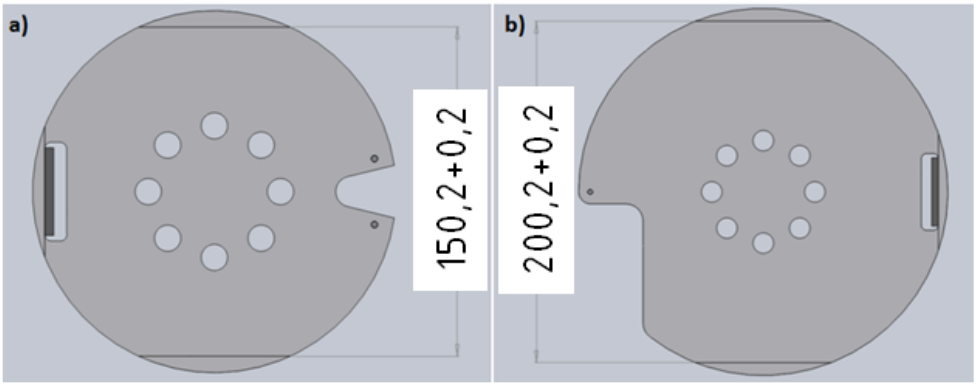
Obr. 5.4 Schematické znázornění lineárního vedení THK SRS9WM se základními rozměry a tolerancemi. Údaje převzaty z [44].

Pohyb vozíků v obou osách je zajištěn pohybovými šrouby Haydon-KERK, které jsou poháněny stejnosměrnými motory Maxon (48V/20W). Hřídele motorů jsou se šrouby spojeny pomocí pružných spojek Huco. Šrouby disponují teflonovou povrchovou úpravou pro minimalizaci tření. Stoupání pohybových šroubů je 1 mm na otáčku. Motory obsahují planetovou převodovku s převodem 1: 3,8. Na jednu otáčku motoru dojde k lineárnímu posuvu o 0,26 mm.

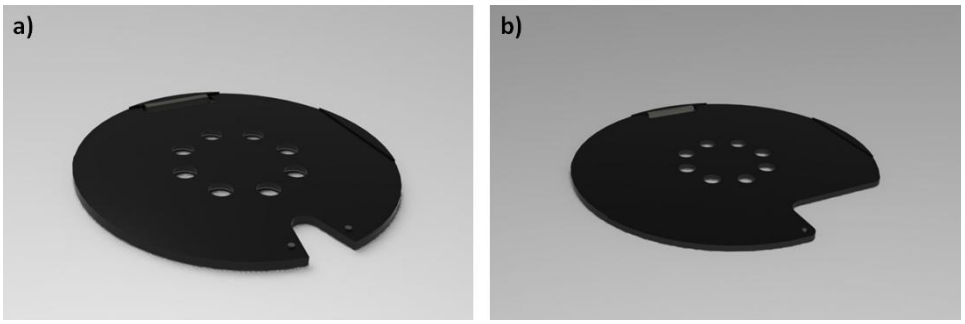
Spodní kolejnice (osa *x*) je našroubována na podpěru konzoly. Kolmost vůči konzole je zaručena dosednutím boční stěny kolejnice na obrobenou plochu podpěry. Na obou koncích spodní kolejnice jsou našroubovány certalové díly, ve kterých je uložení pro pohybový šroub a motor. Certalový díl s přírubou na motor zajišťuje pevné uložení ložiska pohybového šroubu v radiálním i axiálním směru. Na druhém konci je pohybový šroub s ložiskem uložen s vůlí, může se pohybovat ve směru své osy. Popsané uložení zabrání případnému mechanickému namáhání pohybového šroubu. Na vozíku je čtyřmi šrouby se zapuštěnou hlavou našroubován certalový díl, ve kterém je uchycena matka pohybového šroubu, dále tento díl slouží pro našroubování horního vedení (osy *y*). Horní kolejnice opět dosedá svou boční stěnou na obrobenou dosedací plochu středového dílu. Předepsanými tolerancemi pro střední díl je zaručena požadovaná kolmost

kolejnic. Uložení pohybového šroubu je analogické ke spodní kolejnici. Na horním vozíku je opět našroubován certalový díl pomocí čtyř šroubů se zápustnou hlavou, který nese matici šroubu. Navíc jsou v tomto horním díle nalisovány dva čepy, které slouží k přesnému usazení nosiče křemíkových desek.

Pozorované křemíkové desky jsou umístěny na nosič, který má přesně definovanou polohu na stolku. Přesné díry na nosiči, které pasují na čepy horního dílu stolku, umožňují rotovat s deskami o úhel 45°. Deska je na nosiči nepohyblivě uchycena. Polohu desky definujeme doražením fasety nebo „*notche*“ na kolíky na nosiči. Z opačné strany je deska na kolík přitlačena pryží s tvarovou pamětí. Nosiče jsou vyrobeny z duralu a černě eloxovány kvůli minimalizaci difuzních odrazů světla do objektivu mikroskopu. Nosiče pro šest- a osmipalcové křemíkové desky jsou zobrazeny na obr. 5.5 a obr. 5.6.



Obr. 5.5 Schematický obrázek nosičů křemíkových desek. a) Nosič pro šestipalcové desky. b) Nosič pro osmipalcové desky.



Obr. 5.6 Renderované obrázky nosičů křemíkových desek. a) Nosič pro šestipalcové desky. b) Nosič pro osmipalcové desky.

Poloha je v obou osách detekována pomocí inkrementálních magnetických snímačů typ LM10 od fy. Renishaw. Jedná se o magnetický pásek, který obsahuje opačně orientované magnetické póly v rozestupu 2 mm, a čidlo, které zaznamenává změny magnetického pole v blízkosti pásku. Výrobcem udávané rozlišení snímačů je 1 μm, avšak přesnost velmi závisí na vzdálenosti čidel od magnetických pásků. Magnetické pásky jsou pevně uchyceny v obou osách. Čidla jsou našroubovány na certalové díly, které jsou upevněny k vozíkům.

5.2 Elektronika a software skenovacího stolku

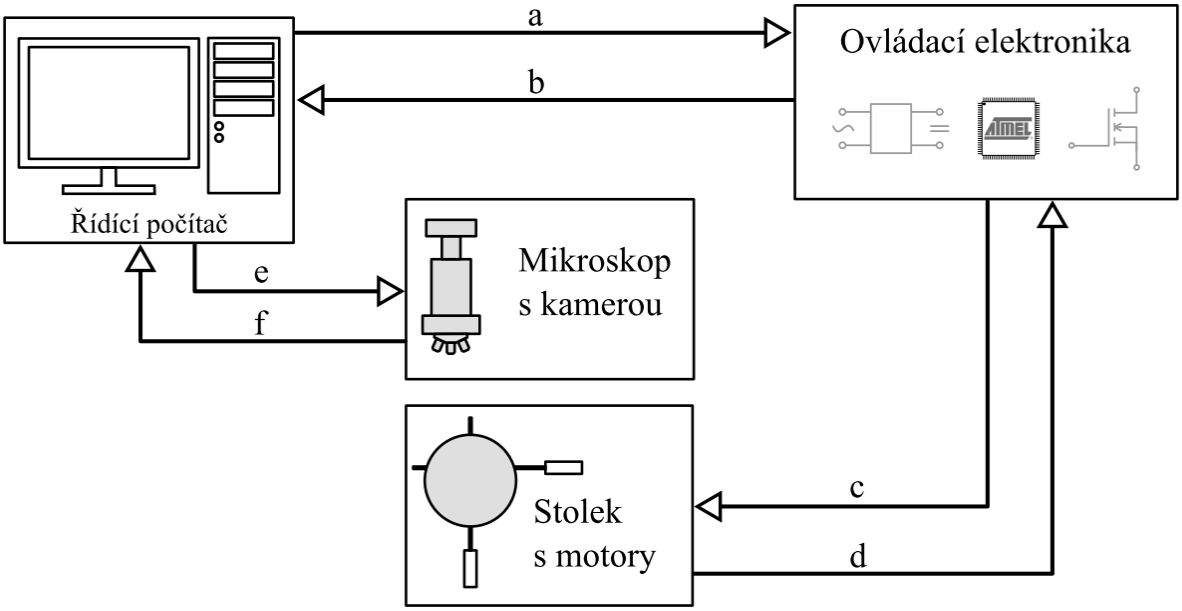
Tato kapitola byla vypracována ve spolupráci s Ing. Daliborem Šulcem a Ing. Pavlem Wertheimerem. Zabývá se vývojem elektroniky a programu pro automatizaci mikroskopového stolku. Program je navržen tak, aby mohl sloužit i samostatně k vyhodnocování defektů na obrázcích pořízených mikroskopem.

5.2.1 Koncept zařízení

Zařízení slouží k automatizovanému snímání a následnému vyhodnocování křemíkových desek. Skládá se ze čtyř hlavních částí (obr. 5.7), přičemž řízení celého procesu snímání má na starost počítač, který předává ovládací elektronice pokyny (a) k polohování stolku a zpět od něj dostává aktuální polohu stolku (b). Komunikace je podrobněji popsána v následující kapitole.

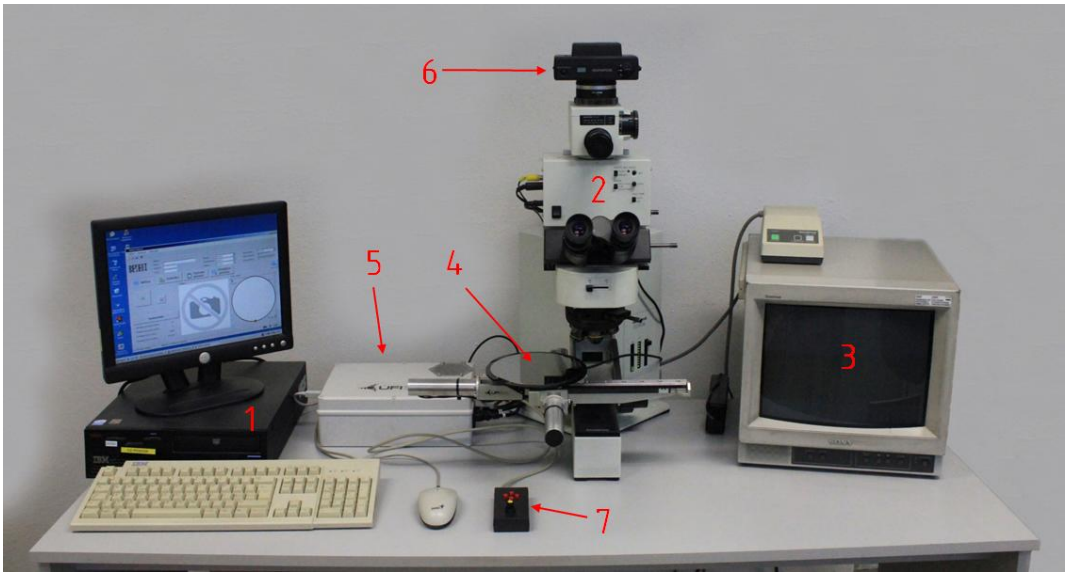
V ovládací elektronice běží zpětnovazební regulační smyčka, která vytváří patřičné napětí (c) a přivádí je na motory. Ze stolku jsou vedeny pulzy (d) z inkrementálních magnetických čidel polohy.

Ke snímání obrazu z kamery umístěné na mikroskopu slouží digitalizační karta DT3120. Řídící počítač pošle příkaz k načtení obrázku (e). Jakmile je snímek připraven, je odeslán (f) do počítače.



Obr. 5.7 Schéma celého zařízení.

V případě potřeby lze polohovat stolek i bez řídícího počítače, což je vhodné při prohlížení desky bez požadavku na analýzu defektů, součástí ovládací elektroniky je proto ruční ovladač, který umožňuje motorizované polohování. Na obr. 5.8 je fotografie funkčního zařízení s popisky jednotlivých částí popsaných výše a na schematickém zobrazení na obr. 5.7.



Obr. 5.8 Fotografie zařízení pro OISF test.
1) počítač, 2) světelný mikroskop, 3) analogová obrazovka, 4) skenovací stolek s Si deskou v pozici *load*, 5) elektronika, 6) kamera mikroskopu, 7) ruční ovladač stolku

5.2.1.1 Komunikace

Komunikace mezi počítačem a kartou je dána výrobcem karty (ActiveX komponenta). Elektronika do motorů „posílá“ přímo napětí a ze snímačů polohy získává přímo pulzy, které počítá. Komunikace mezi počítačem a elektronikou bylo nutné navrhnout.

Přenos informací mezi počítačem a elektronikou probíhá systémem *otázka – odpověď*. Řídící člen (počítač) vyšle dotaz a očekává odpověď. Další dotaz pošle až po obdržení odpovědi. Během komunikace počítač měří dobu odezvy, pokud se elektronika s odpovědí opozdí, pošle dotaz znovu. Tím je ošetřen stav, kdy se některá ze zpráv při přenosu ztratí.

Přenos je realizován sběrnicí USART (universální synchronní a asynchronní přijímač a vysílač), protože se snadno implementuje i používá. Přímo v obslužné elektronice hardwaru je použit čip, který převádí tuto sběrnici na USB (universální sériová sběrnice), což řeší případný problém s nedostatkem sériových portů u notebooků a novějších počítačů.

Hodnoty, které posílá počítač, jsou převedeny do šestnáctkové číselné soustavy a převedeny na řetězec znaků. Zpráva od počítače je ve tvaru:

$$\underbrace{\mathrm{X}}_{\text{start}}\ \underbrace{\mathrm{01AFC}}_{\text{x}}\ \underbrace{\mathrm{A5B6E}}_{\text{y}}\ \underbrace{\mathrm{0}}_{\text{regulace}}\ ,$$

kde první část je startovací znak, který označuje začátek zprávy. Závěrečný znak rozlišuje dvě situace – jestli požadujeme regulaci na danou polohu (0) určenou souřadnicemi [x; y] nebo rychlostní regulaci (1) definovanou rychlostmi v jednotlivých osách x a y.

Odpověď je očekávána ve tvaru:

$$\underbrace{W}_{\text{start}}\ \underbrace{01AFA}_{\text{x-pos}}\ \underbrace{A5B6E}_{\text{y-pos}}\ \underbrace{0}_{\text{manual}}\ ,$$

kde W je opět startovací znak označující začátek zprávy. Za ním následují dvě hodnoty určující aktuální polohu. Zpráva je pak ukončena informací, zda je zapnut (0) nebo vypnut (1) ruční ovladač.

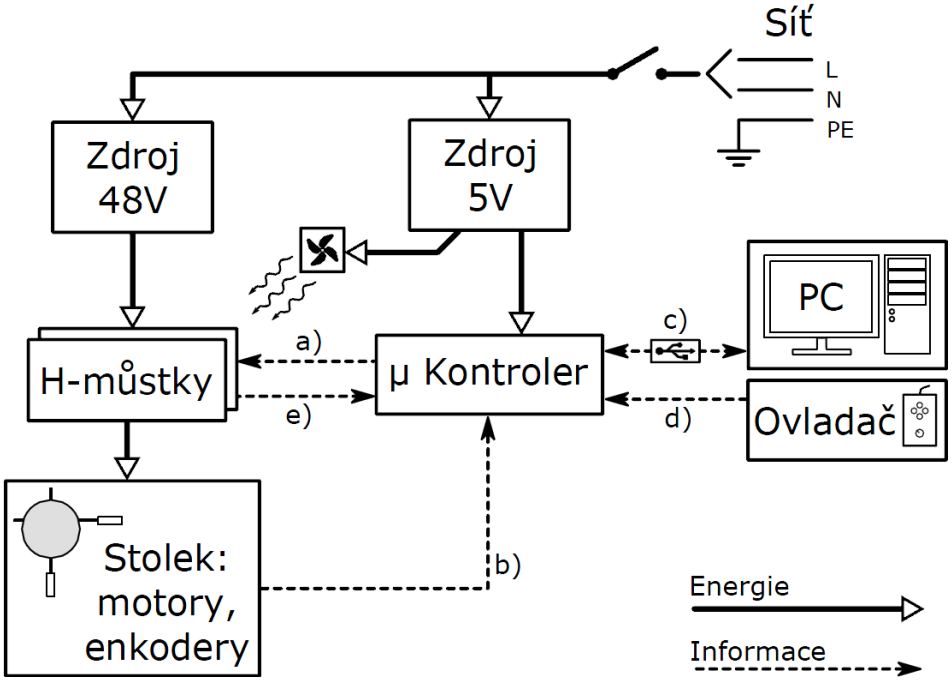
Dále jsou zavedeny dva typy zpráv, které počítači umožní rychle a efektivně prohledat všechny dostupné porty v počítači a určit tak ten správný, kde je elektronika zapojena. Uživatel nemusí tento parametr nastavovat ručně.

Zprávy nenesou žádnou další informační hodnotu a skládají se tak pouze z jednoho znaku. Zjednodušeně řečeno; na každé písmeno H, které počítač odešle, očekává přijetí písmena R.

5.2.2 Ovládací elektronika

5.2.2.1 Hardware

Jak již bylo zmíněno v kap. 5.1.2 zabývající se skenovacím stolkem, pro pohon jsou použity stejnosměrné (DC) motory 48V/20W značky Maxon. Poloha je odměřována inkrementálními magnetickými snímači s rozlišením 1µm a referenčními značkami pro nalezení výchozí (nulové) polohy.



Obr. 5.9 Blokové schéma ovládací elektroniky. a) řídící signály PWM, b) pulsy magnetických snímačů, c) řídící údaje z PC / aktuální hodnoty do PC, d) ovládací prvky, e) elektrické proudy protékající motory a napětí meziobvodu

Základem ovládací elektroniky jsou dva AC/DC průmyslové spínané zdroje. Výkonovou část elektroniky, to znamená napájení motorů zajišťuje 48V zdroj a pro napájení logických obvodů a ventilátoru je použit 5V zdroj. Na síť (230V ~) jsou připojeny přes tavnou pojistku a vypínač.

Potřebné napětí pro DC motory vyrábí dva H-můstky, které jsou řízeny pulsní šířkovou modulací (PWM), abychom předešli jejich nadměrnému zahřívání. H-můstky jsou realizovány jako

integrované obvody L6203. Nejvyšší možné spínané napětí je 52V a proud 4A, což s rezervou splňuje požadované hodnoty.

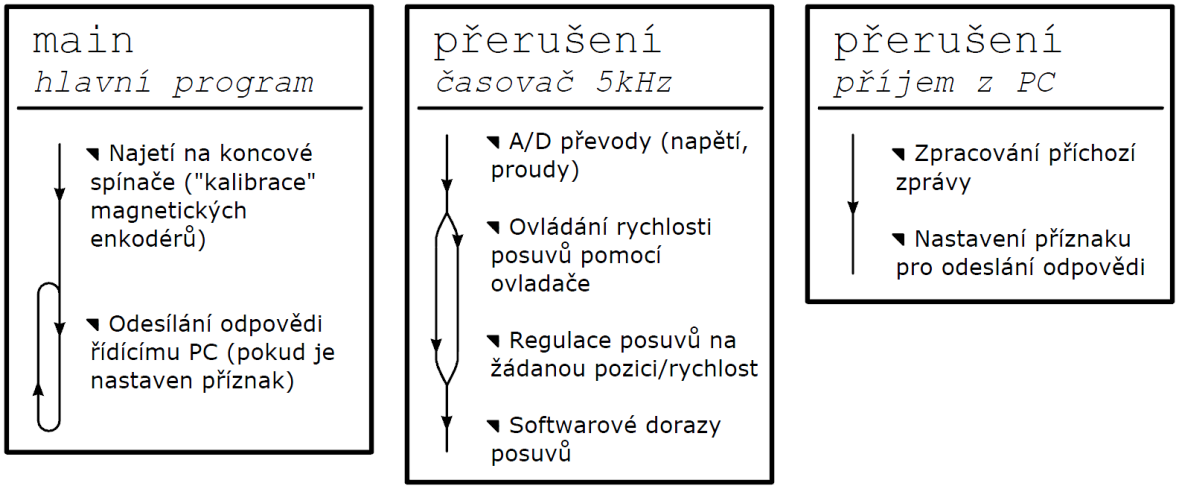
Řízení zajišťuje mikrokontrolér ATxmega 128A1 s dostatečným výpočetním výkonem a velkým počtem periferií. Elektronika je díky využití integrovaných obvodů poměrně jednoduchá, tudíž byla navržena a vyrobena svépomocí (vyjma průmyslových zdrojů). Jako celek byla řešena modulárně – tj. jednotlivé části jsou na samostatných deskách plošných spojů (DPS) propojených kabely, což je vhodné pro jednodušší rozebíratelnost a omezení nežádoucího elektromagnetického rušení.

Řídící deska zajišťuje:

- Napojení na H-můstky – odesílá pulsy unipolární PWM na frekvenci 31,25kHz.
- Měření proudu – pomocí A/D převodníku měří proudy procházející přes H-můstky.
- Čítání pulsů z magnetických snímačů – zpracování digitálního kvadraturního signálu pomocí HW periferie mikrokontroleru [45], napojení referenčních značek magnetického pásku, pro určení výchozí polohy stolku.
- Obousměrné spojení s řídícím PC – pomocí periferie asynchronní sériový přijímač/vysílač (UART), přes USB převodník (integrovaný obvod FT232) zajišťuje propojení s PC pomocí standardního USB portu.
- Napojení dálkového ovladače – napětí z potenciometru pomocí A/D převodníku a přímé napojení tlačítek a přepínače na input/output (IO) piny.

5.2.2.2 Firmware

Firmware je vytvořen v jazyce C, konfiguruje mikrokontrolér a řídí pohony stolku na nízké úrovni (tj. najetí na žádanou polohu, resp. pojezd žádanou rychlostí). ATxmega 128A1 je 8-bitový mikrokontrolér s podporou některých 16-bitových operací. Překlad kódu z jazyka C pro mikroprocesor provádí kompiler IAR Embedded Workbench.



Obr. 5.10 Schéma běhu programu.

Nejprve je provedena konfigurace mikrokontroléru: nastavení taktovacích hodin procesoru (32 MHz) a přiřazení jednotlivých pinů příslušným periferiím mikrokontroléru.

Poté je běh programu předán výkonné části, která je rozdělena do tří hlavních částí (obr. 5.10):

- hlavního programu (main)
- přerušení vyvolané časovačem (s frekvencí 5kHz)
- přerušení vyvolané příjmem bytu (zpráv) z řídícího počítače

Hlavní část programu leží v přerušení od časovače, ostatní dvě části programu procesor příliš nezatěžují, probíhají s nízkou frekvencí a nejsou příliš obsáhlé. Main je první, co po spuštění (restartu) mikrokontroléru běží a k čemu se mikrokontrolér vrací pokud nevykonává jinou činnost (nemusí zpracovávat přerušení). Main začíná s vypnutými přerušeními. Sníženou rychlostí (kvůli bezpečnosti) nejprve najede na koncové referenční značky magnetických snímačů, postupně v ose *x*, pak *y*, a vynuluje jejich hodnoty. Následuje zapnutí všech přerušení a vstup do nekonečné smyčky, která zajišťuje odesílání zprávy řídícímu PC.

Přerušení při příjmu bytu z PC se stará o zpracování zprávy, tak jak je popsáno v kapitole 5.2.1.1 komunikace. Konkrétně čeká na přijetí celého řetězce, přičemž pokud příjme jiný než dovolený znak (jiný než znak číslice v hexadecimálním tvaru), celou zprávu zahazuje a čeká na další. Pokud přijme celou zprávu, zpracuje ji tak, že ji rozdělí a převede textový řetězec hexadecimálních znaků do čtyřbytového celočíselného typu (integer), tak aby je dále mohl používat regulátor. Nakonec nastaví příznak pro odeslání zprávy (odpovědi) řídícímu PC.

Přerušení časovače je spouštěno každých 200 μs (5 kHz) a obsluhuje získávání dat z A/D převodníků a o řízení motorů. Běh přerušení časovače se dělí do dvou větví podle toho, jestli je stolek ovládán pomocí dálkového ovladače, nebo jej řídí PC. Obě větve ukládají výsledná požadovaná napětí na motory do proměnných, které se dále již zpracovávají stejně – softwarové dorazy os stolku, atd. Pokud stolek ovládáme pomocí ručního ovladače, lze nadále posílat do PC zprávy o aktuální pozici, avšak příchozí zprávy nemají žádný vliv (ovládání je nadřazeno počítači). Stiskem tlačítek na ručním ovladači mikrokontroler přiřazuje do požadovaných hodnot napětí na motory, hodnotu úměrnou natočení potenciometru na ručním ovladači.

Pokud stolek řídí PC, program se dále dělí na regulaci rychlosti a polohy. Regulace rychlosti je řešena obdobně jako ovládání pomocí ručního ovladače, avšak požadovaná napětí na motory jsou přikládána podle příchozích zpráv z PC. Regulace polohy je řešena pomocí jednoduchého proporcionálního regulátoru, požadovaná napětí na motory se nastavují podle velikosti odchylky žádané a aktuální polohy. Tímto všechna větvení končí a dále se zpracovávají hodnoty požadovaných napětí přiváděné na motory.

Před dalším pokračováním se nejprve zkontroluje, zda proudy procházející motory nejsou příliš vysoké (např. při mechanickém zaseknutí některé z os). Pokud ano, software odstaví H-můstky a vyčká 1s, poté se opět pokusí na motory přiložit napětí a tím motory rozjet.

Než jsou požadovaná napětí pomocí H-můstků přiložena na motory, projdou přes omezovač rychlosti přeběhu a přes kontrolu SW dorazů. Omezovač přeběhu zamezí velkým skokům napětí na motorech, tedy silnému cukání s motory a jejich rychlejšímu opotřebení. SW dorazy zajišťují zamezení dalšímu pohybu ve směru, ve kterém čidlo detekovalo koncovou značku. Hodnoty SW dorazů jsou nastaveny podle požadovaného rozsahu chodu v jednotlivých osách. SW dorazy neustále porovnávají předem změřené hodnoty koncových poloh s aktuální hodnotou polohy odečtenou magnetickým snímačem.

5.2.3 Software Defect Detect

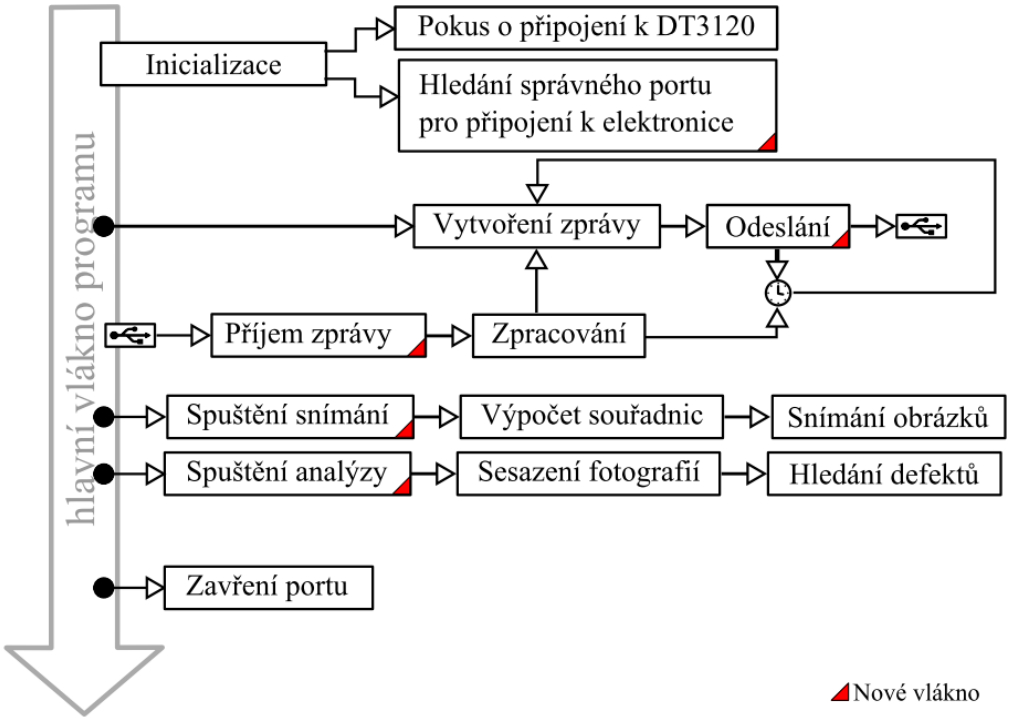
Software Defect Detect umožňuje automatizované snímání definované plochy a analýzu pořízených záběrů. Používání programu není vázáno na připojení mikroskopu nebo ovládací elektroniky. Může fungovat zcela samostatně jako prohlížeč již pořízených záběrů a výsledků analýzy.

Obr. 5.11 Logo programu DEFECT DETECT. Logo navrhl a vytvořil Dalibor Šulc.

5.2.3.1 Architektura programu

Software je vytvořen v jazyce C# a postaven na technologii .NET 3.5 (Windows Forms). Software je navržen tak, aby všechny déle trvající úkony běžely paralelně s ovládacím rozhraním. Tím se předchází „zatuhnutí“ programu a zmatení uživatele.

Zjednodušené schéma programu je na obr. 5.12. Při vytvoření hlavního ovládacího okna se jednorázově software pokouší připojit k digitalizační kartě. Jelikož jde o kartu připojenou do PCI slotu, nemělo by dojít k jejímu odpojení nebo připojení za běhu počítače resp. programu. Oproti tomu připojení ovládací elektroniky se může měnit i za běhu programu. Pokud se tedy nepodaří připojit při startu, je spuštěn časovač, který se každých deset sekund pokouší opakovat spojení.



Obr. 5.12 Zjednodušené schéma architektury programu.

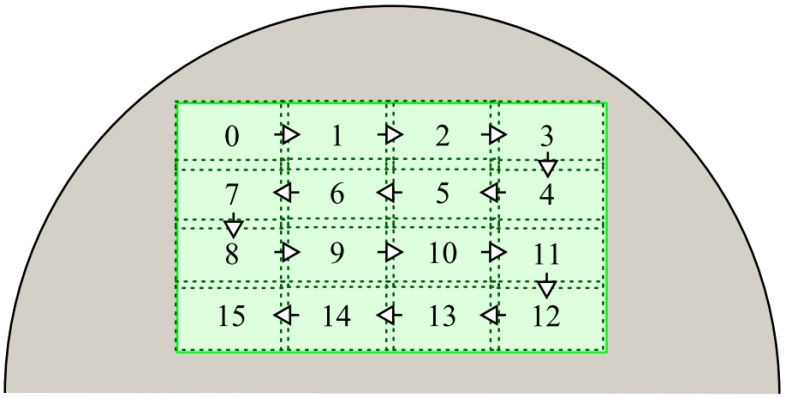
Počítač řídí celou komunikaci s elektronikou, takže musí odeslat zprávu jako první. To se děje v následujícím kroku. Při odesílání je spuštěn časovač, který měří dobu odezvy a pokud do nějakého času neobdrží odpověď, odešle dotaz znovu. Zamezíme tak situaci, kde se některé zprávy poškodí nebo ztratí a nejsou tak přijaty.

Snímání a analýza obrázků povrchu jsou rozděleny do dvou různých podprocesů. Během měření je možno pozastavit snímání, ale analýza může běžet dál. K realizaci těchto úkonů je použita komponenta BackgroundWorker, která má přístup i k prvkům hlavního formuláře, takže lze pohodlně zobrazovat informace o aktuálním stavu těchto procesů uživateli.

Při ukončení programu pak zavřeme používaný port a ukončíme komunikaci.

5.2.3.2 Snímání povrchu

Pořízené fotografie se postupně ukládají na pevný disk počítače (na úložnou jednotku zvolenou před puštěním měření). Vzhledem k velkému množství obrázků, které je nutné pořídit při skenování velkých ploch objektivy s velkým zvětšením, je to jediná možnost. Jinak by nemusela být operační paměť počítače dostačující a program by zhavaroval.



Obr. 5.13 Schéma snímání povrchu.

Schéma snímání povrchu je na obr. 5.13. Aby bylo možné minimalizovat každý nadbytečný pohyb stolku, probíhá snímání střídavě jízdou vlevo a vpravo (viz obr. 5.13). Před zahájením měření se spočte potřebný počet obrázků pro kompletní pokrytí měřené plochy, což závisí na zorném úhlu nastaveného objektivu, požadovaném překryvu fotografií a na velikosti snímané plochy.

5.2.3.3 Sesazení fotografií

I přes vysokou přesnost magnetických inkrementálních snímačů polohy (1µm) nemůžeme zaručit na pixel přesné sesazení. Proto je definováno toleranční pásmo, ve kterém jsou obrázky sesazeny softwarově. Tím jsou jasně definované souřadnice všech fotografií. Předejde se tak situaci, kdy je defekt na hraně fotografie, tzn. na dvou obrázcích a tedy započítán dvakrát.

Pro sesazení obrázků je použita korelační metoda. Existuje jisté toleranční pásmo, ve kterém očekáváme správnou polohu. Pro všechny možnosti sesazení v tomto pásmu je spočtena korelace

$$C_r(M,F) = \frac{\sum_{i=1}^{N}[(m_i - \bar{M})(f_i - \bar{F})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N}(m_i - \bar{M})^2 \cdot \sum_{i=1}^{N}(f_i - \bar{F})^2}}, \qquad 5.1$$

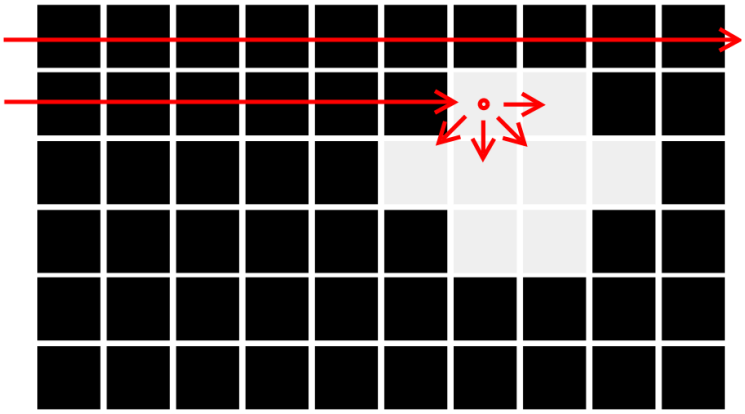
kde M je obraz, kterým pohybujeme (moving), F je referenční (fixed) obraz, $\bar{M}$, $\bar{F}$ jsou průměrné hodnoty pixelů, m_i, f_i jsou hodnoty i– tého pixelu a N je počet pixelů. Vybráním nejvyšší hodnoty korelace je určeno místo s největší shodou.

Mimo hrany, které je nezbytně nutné sesadit, se provádí sesazení i na těch koncích řádků, kde nedochází k posunu na další řádek (na obr. 5.13 jde o hranu mezi obrázky 0–7, 4–11 a 8–15). To slouží jako kontrola správnosti sesazení.

5.2.3.4 Rozpoznání a analýza defektů

Vyhledání defektů probíhá procházením snímek po snímku. Díky tomu je možno provádět analýzu fotografií i během snímání a program nemusí čekat, až bude celá plocha nafocena.

Ze surového obrazu je spočtena průměrná hodnota intenzity pixelu a provedeme prahování (pixely s hodnotou nižší než prahovaná hodnota jsou černé, ostatní jsou přepočítány, aby se využil dynamický rozsah jasu) na definovaný násobek průměru. Získaný a zvětšený obrázek by mohl vypadat podobně jako je na obr. 5.14. Hledání defektů probíhá tak, že se prochází zleva pixel po pixelu a hledá se takový pixel, jehož hodnota jasu je vyšší než hodnota $\varepsilon_{\mathrm{px}}$. Souřadnice tohoto pixelu jsou uloženy a hledají se všechny jeho sousedící pixely opět s hodnotou jasu vyšší než $\varepsilon_{\mathrm{px}}$. Takto se pokračuje dokud není nalezena celá plocha defektu.



Obr. 5.14 Průběh analýzy.

Ze získaného souboru souřadnic $\{[x_1, y_1], [x_2, y_2], \dots, [x_N, y_N]\}$ pixelů defektu se určují souřadnice těžiště

$$X_T = \frac{\sum_{i=1}^{N} x_i}{N}, \tag{5.2}$$

$$Y_T = \frac{\sum_{i=1}^{N} y_i}{N}, \tag{5.3}$$

které jsou nutné pro vykreslení polohy defektu v mapě defektů a hlavně pro další výpočet momentu

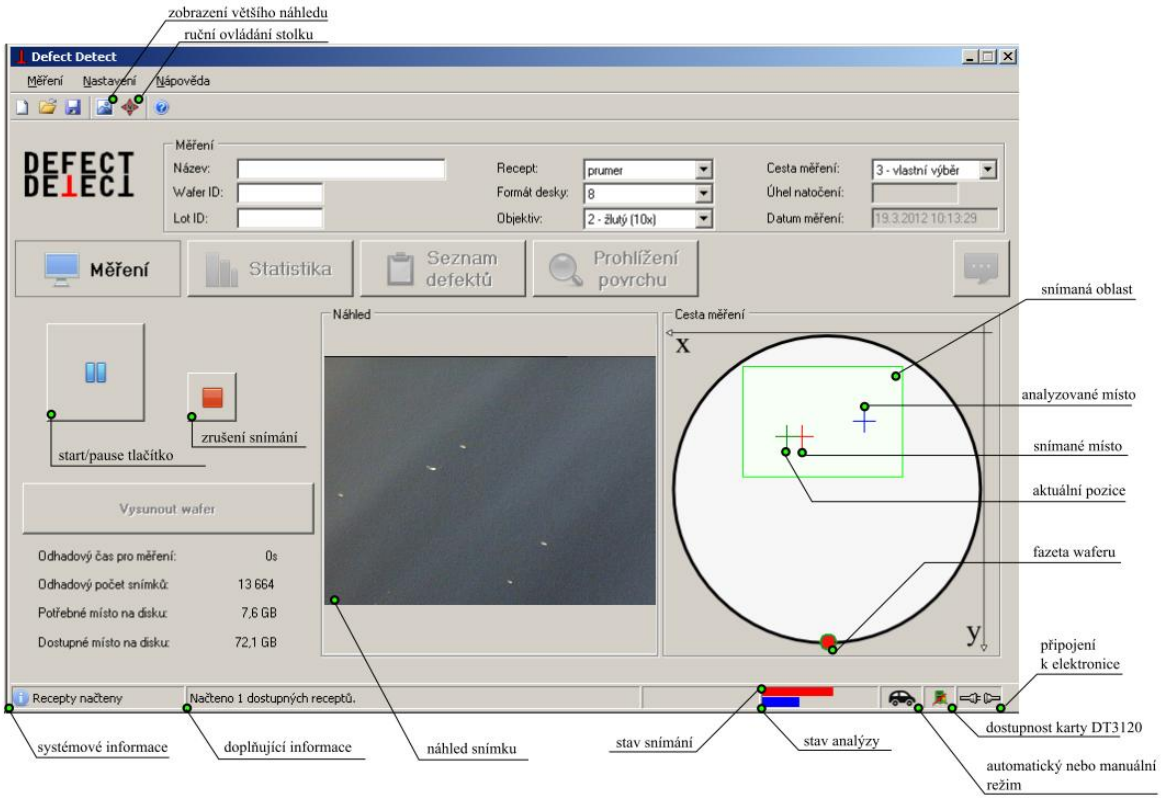
$$M = \sum_{i=1}^{N} [(x_i - X_T)^2 + (y_i - Y_T)^2]\,. \tag{5.4}$$

Získaný parametr nám udává „míru kompaktnosti“ defektu. Zavedením konstanty ϑ je možno určit, o jaký tvarový typ defektu se jedná. Pokud $M < \vartheta$, pak jde o tečku, a pokud $M \geq \vartheta$, pak jde o čárku. Tímto způsobem je tedy určena poloha a typ všech defektů na obrázcích.

5.2.3.5 Uživatelské rozhraní

Uživatelské rozhraní zpřístupňuje mimo základních funkcí, jako je spouštění měření, i možnost ukládání jednotlivých měření a jejich pozdější analýzu a prohlížení. Prostředí programu je zobrazeno na obr. 5.15 v situaci během měření. Uživatel má detailní přehled o tom, co zrovna program vykonává. Na schematickém obrázku měřené křemíkové desky na pravé polovině okna programu uživatel vidí plochu, která je právě skenována, ohraničenou zeleným obdélníkem. V této ohraničené ploše se pohybují tři křížky, které označují aktuální polohu (zelený), místo, odkud byla sejmuta fotka zobrazená v náhledu ve středu okna programu (červený), a pozici fotky, která je právě analyzována (modře).

Barvy křížků korespondují s barvami indikátorů průběhu ve spodní liště – červená pro stav snímání a modrá pro stav analýzy.



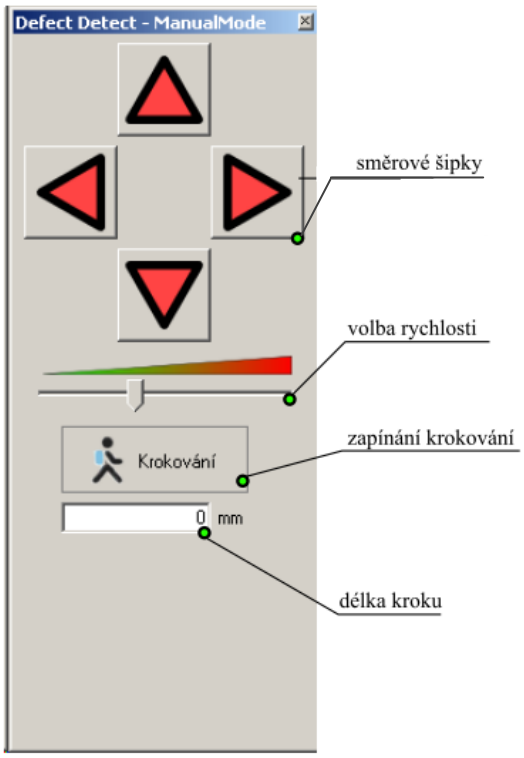
Obr. 5.15 Náhled na okno programu DEFECT DETECT.

Ikona v pravém dolním rohu udává přehled o tom, zda je připojena elektronika. Vlevo od ní je ikonka informující o přítomnosti digitalizační karty DT3120 a dále ikona zobrazující, zda je aktivní ruční ovladač (manuální režim), symbol auta signalizuje, že je zapnuto plně automatické snímání.

Vlevo na spodní liště se pak zobrazují systémové údaje zdůrazněné patřičnou ikonou, aby uživatel i letmým pohledem poznal, že je něco v nepořádku.

Po kliknutí na ikonu obrázku v levém horním rohu se zobrazí živý náhled na obraz z mikroskopu. Dostupný je jenom v případě, že je v počítači karta připojená ke kameře.

Vedle je ikona se symbolem čtyř šipek. Tou se zobrazuje okno s možnostmi ručního ovládání stolku. Kromě obdobného ovládání, jako je na hardwarovém ručním ovladači, můžeme také zapnout volbu krokování. Nastavením délky kroku a zapnutím spínače lze stolek posouvat, při stisku šipek, jen o patřičný krok. Posun lze v tomto okně ovládat i šipkami klávesnice.

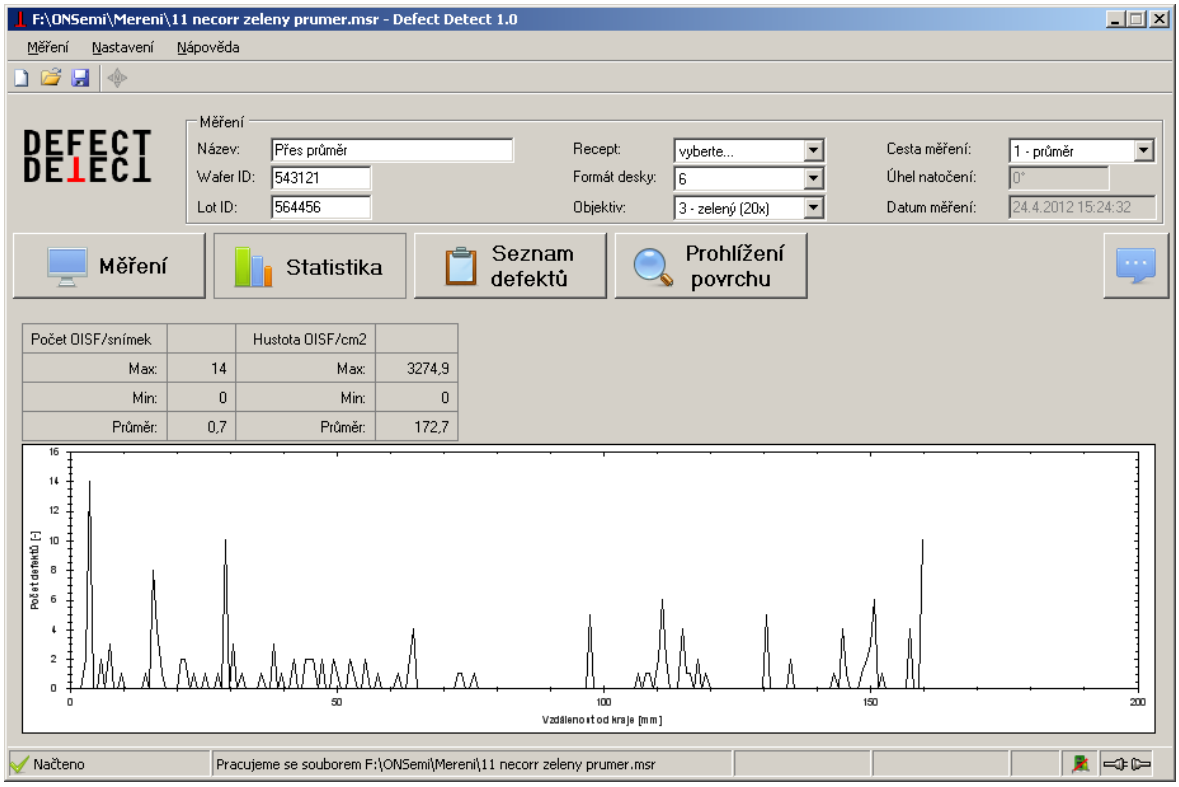


Obr. 5.16 Ruční ovládání stolku.

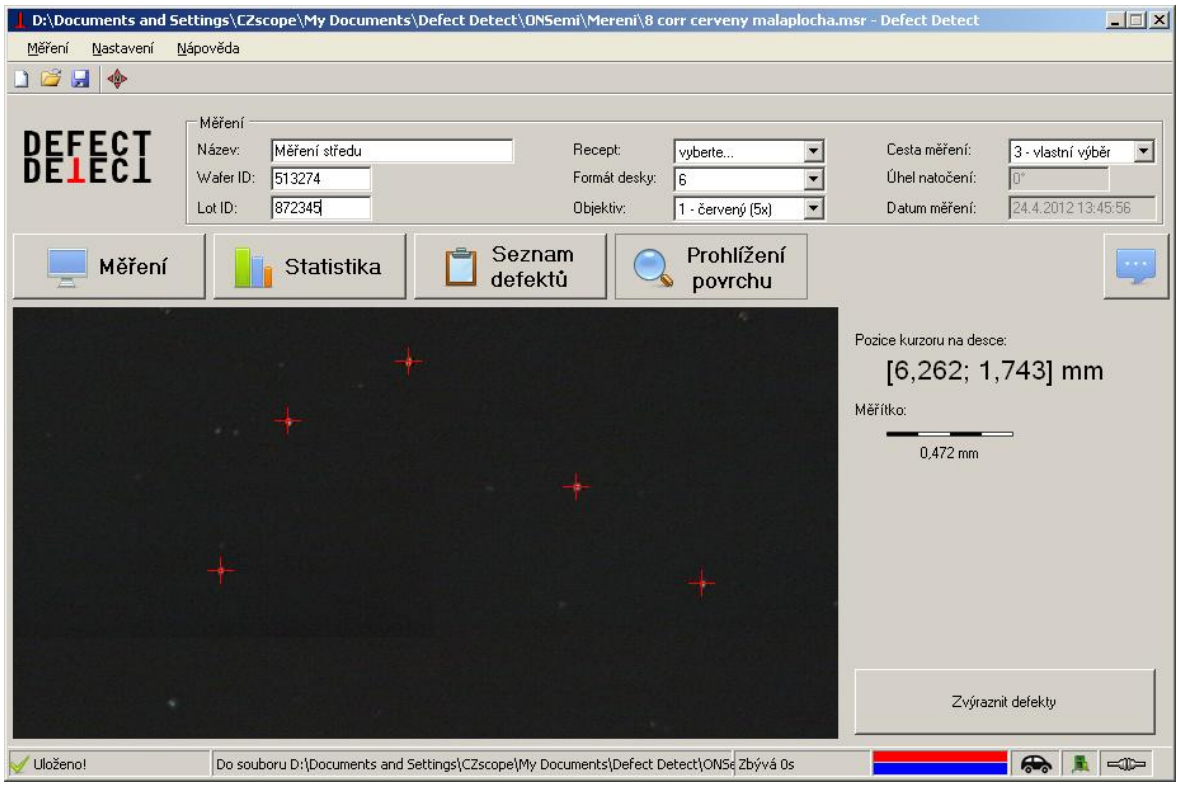
5.2.3.6 Výstupy programu

Software umožňuje provádět i základní analýzu měřených dat. V záložce statistika (obr. 5.17), která je spolu s dalšími záložkami zpřístupněna po dokončení měření, se zobrazuje graf počtu defektů na snímek v závislosti na vzdálenosti od kraje desky. Dále je možno nahlížet na nasnímaný povrch desky i se zvýrazněnými defekty v záložce prohlížení povrchu (obr. 5.18). Seznam detekovaných defektů je přehledně v tabulce na záložce seznam defektů (obr. 5.19).

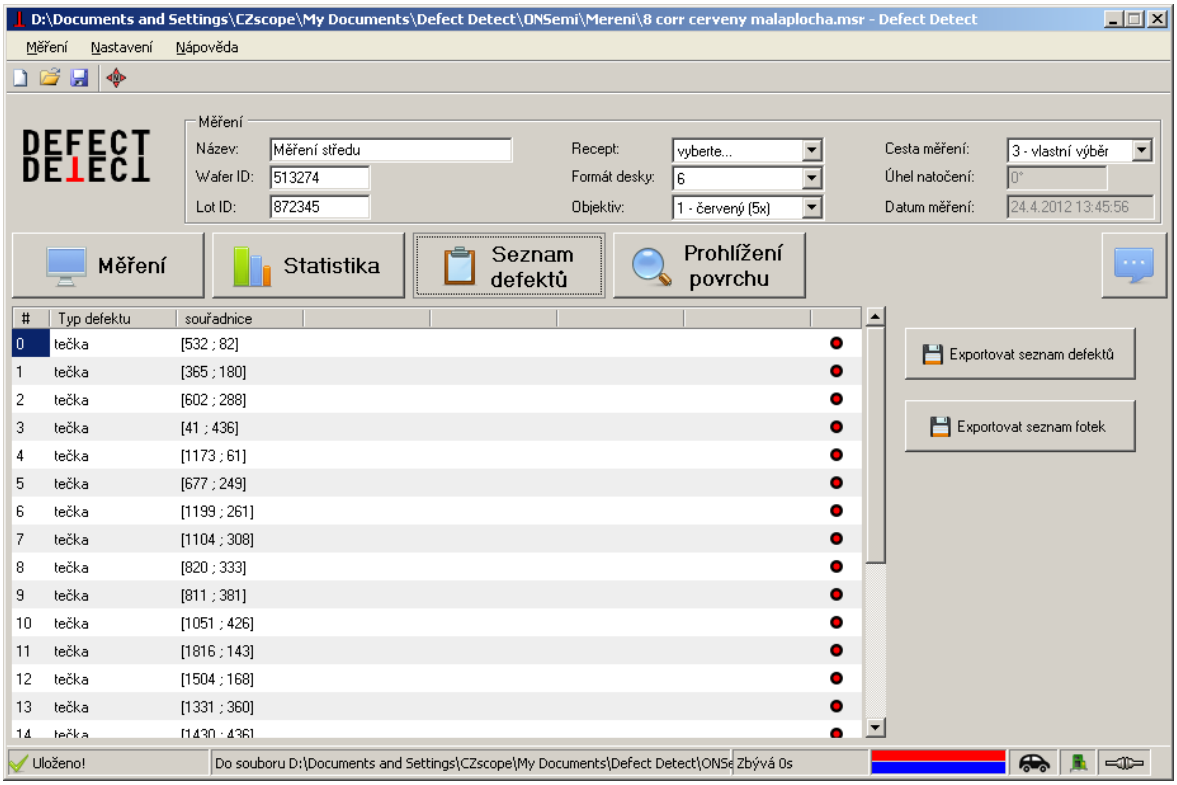
Pro podrobnější analýzu existuje možnost exportu dat do textových csv souborů (data oddělená čárkou, z angl. *comma-separated values*). Lze exportovat prostý seznam defektů, kde u každého jsou uvedeny jeho globální souřadnice (vzhledem ke snímané oblasti) a jeho typ (tečka nebo čárka). Také existuje možnost exportovat seznam pořízených obrázků s počty defektů podle typu.



Obr. 5.17 Náhled na okno se záložkou statistikou měření.



Obr. 5.18 Náhled na okno se záložkou prohlížení povrchu.



Obr. 5.19 Náhled na okno se záložkou seznam defektů.

6 Experimentální měření

6.1 Příprava vzorků

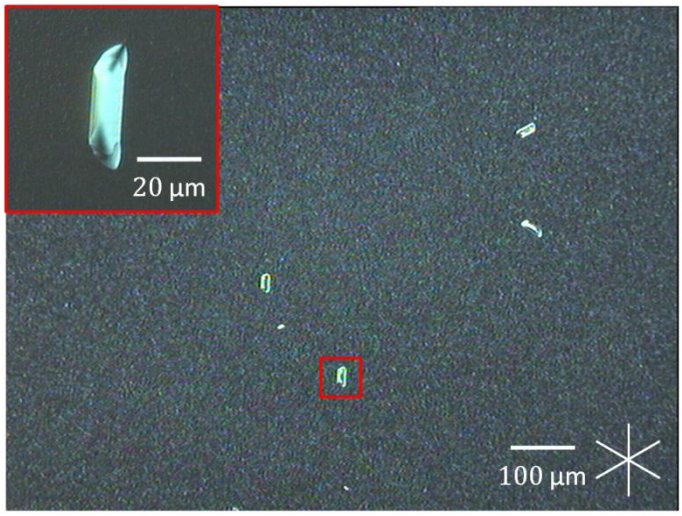
Vzorky, křemíkové desky, byly vyrobeny Czochralského metodou v ON Semiconductor ČR. Jedná se o křemíkové desky (111) o průměru 150 mm, vodivostního typu P, legované bórem. Koncentrace bóru je ve studovaných deskách cca $1{,}98 \cdot 10^{18}\,\mathrm{cm}^{-3}$, měrný odpor cca $16{,}2\,\mathrm{mOhm} \cdot \mathrm{cm}$ a koncentrace kyslíku cca 33 ppma ASTM ´79 ($1{,}65 \cdot 10^{18}\,\mathrm{cm}^{-3}$) [46]. Křemíkové desky jsou jednostranně leštěny s tloušťkou 625 µm.

Růstové defekty v křemíkových deskách jsou analyzovány OISF testem. OISF test byl proveden na deskách, které byly oxidovány ve vlhké atmosféře při teplotě 1150 °C po dobu 3 h, dále proběhlo odleptání oxidu v HF. Nakonec se vrstevné chyby zvýraznily pomocí selektivního leptání Yang Y3 [40].

6.2 Pozorování rozložení vrstevných chyb - OISF test

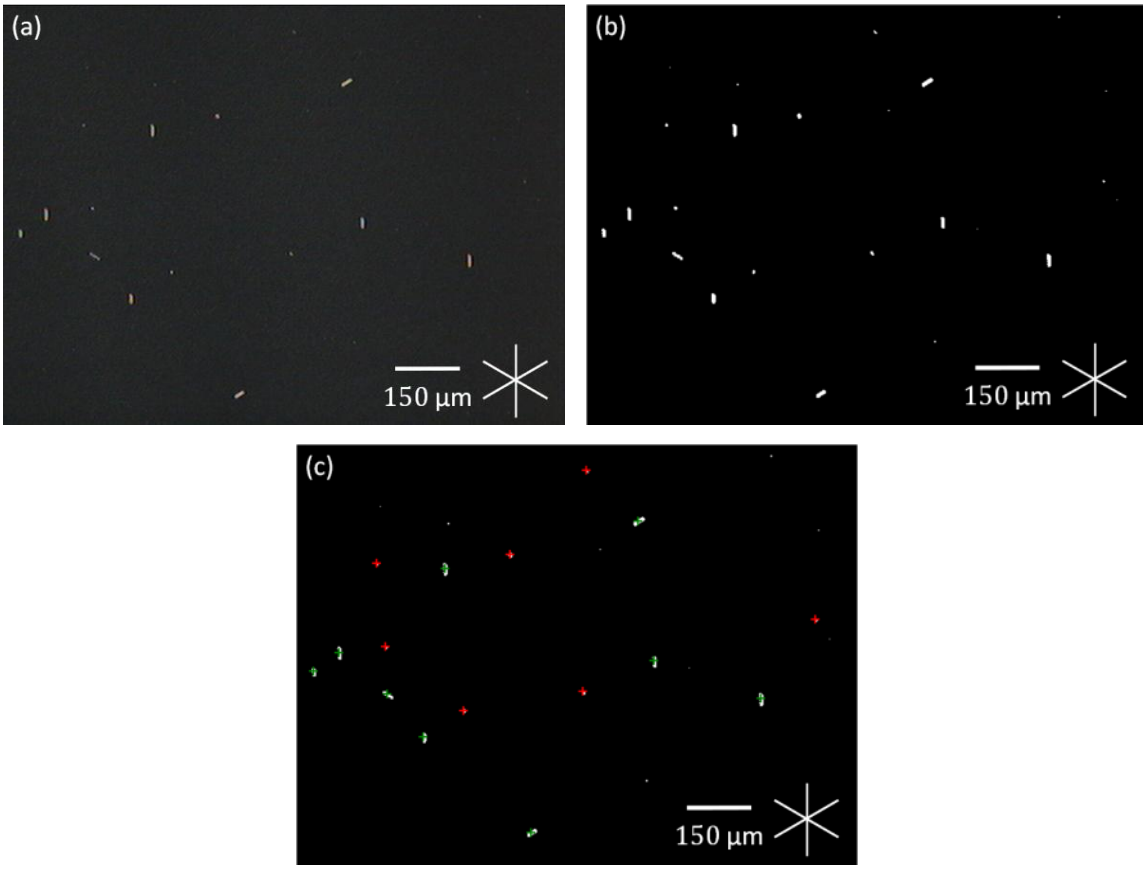
Rozložení OISF na povrchu Si desek bylo pozorováno okem pod kolimovaným světlem (obr. 6.1) a světelným mikroskopem (obr. 6.2). Radiální profil rozložení defektů byl určen počítáním OISF podél linie přes průměr desky. Průměrný počet OISF v závislosti na průměru desky byl určen z více měření v různých směrech. Byla provedena měření s objektivem zvětšujícím 10x a 20x. K detekci a vyhodnocení defektů byl použit program Defect Detect (DD) (viz kapitola 5.2.3).

Obr. 6.1 Fotografie rozložení OISF na povrchu Si desky (111) pod kolimovaným světlem.



Obr. 6.2 Snímek povrchu Si desky (111) pozorovaný pod světelným mikroskopem. V pravém dolním rohu jsou naznačeny možné směry OISF.

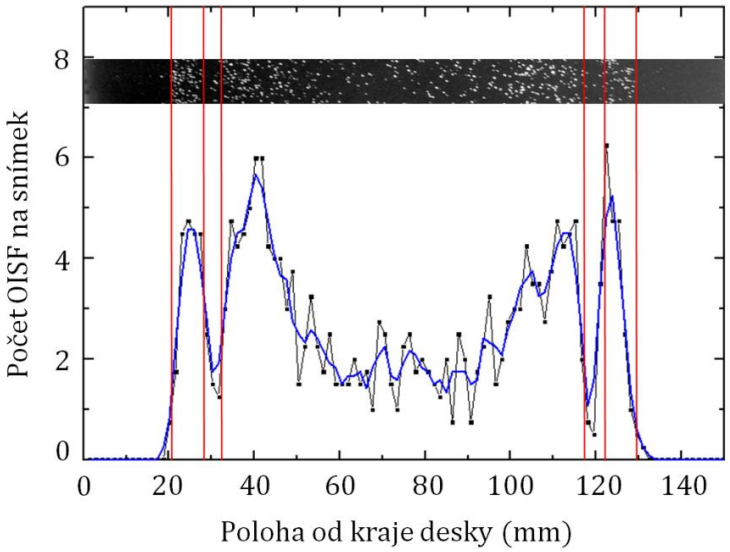
U měření objektivem zvětšujícím 10x byly OISF v případě měřené desky stále dobře viditelné (obr. 6.3a). Díky velkému zornému poli (1,81 x 1,36 mm) byly počty OISF na snímku vyšší (okolo 4-7 OISF v oblasti prstence), což lépe vypovídá o průměrné plošné hustotě. V programu DD byla hodnota prahování nastavena na 1,6 a hodnota momentu 7. Na obr. 6.3 jsou zobrazeny fáze zpracování snímku prahováním a analýzou defektů.



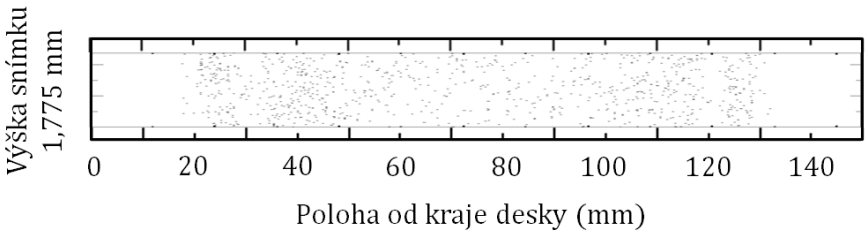
Obr. 6.3 Snímek povrchu Si desky (111) pořízený pomocí světelného mikroskopu s objektivem 10x. (a) Surový snímek, (b) prahovaný snímek v programu DD, (c) analyzovaný snímek v programu DD, červené křížky jsou detekované tečky a zelené křížky jsou detekované čárky (OISF). Vpravo dole u obrázků jsou naznačeny možné směry OISF.

Na obr. 6.4 je graf počtu defektů na snímku v závislosti na poloze od kraje desky. Graf byl získán z hodnot exportovaných z programu DD příkazem: *exportovat seznam fotek*. Hodnoty v grafu byly získány zprůměrováním dvou na sebe kolmých měření. Černá křivka reprezentuje naměřená data
a modrá křivka je vyhlazení dat zprůměrováním dvou sousedů. Naměřené hodnoty odpovídají rozložení OISF pozorované okem (pásek v horní části grafu).

Prostorové rozložení OISF, mapa defektů je na obr. 6.5. Jedná se o rozložení OISF při měření přes průměr desky, tedy výška skenované oblasti je 1,775 mm a šířka cca 150 mm. Data souřadnic OISF byly exportovány z programu DD příkazem: *exportovat seznam defektů*. Opět lze vidět, že rozložení OISF je podobné jako v případě pozorování desky okem.

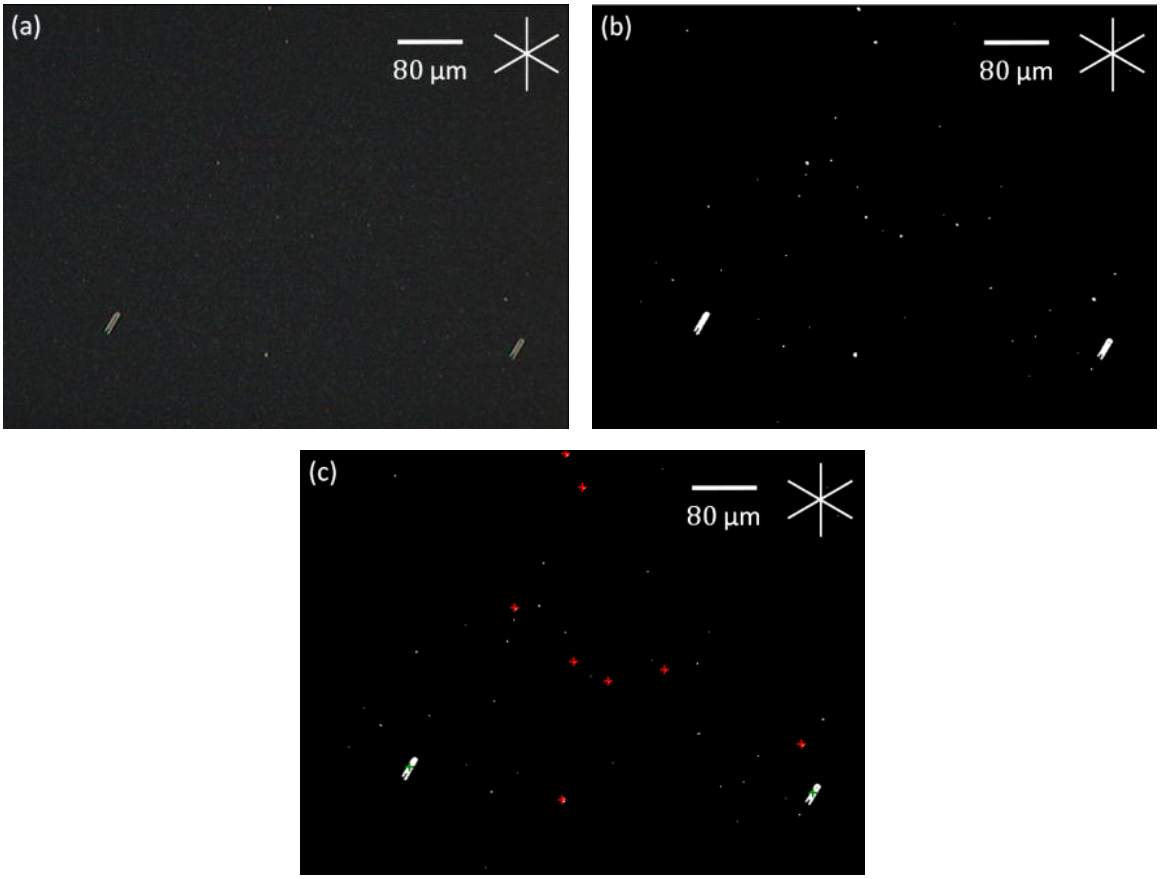


Obr. 6.4 Graf počtu defektů na snímku v závislosti na poloze od kraje desky. Data byla naměřena programem DD. Černá křivka reprezentuje naměřené data, modrá křivka je plovoucí průměr naměřených dat.



Obr. 6.5 Mapa OISF při měření přes průměr desky.

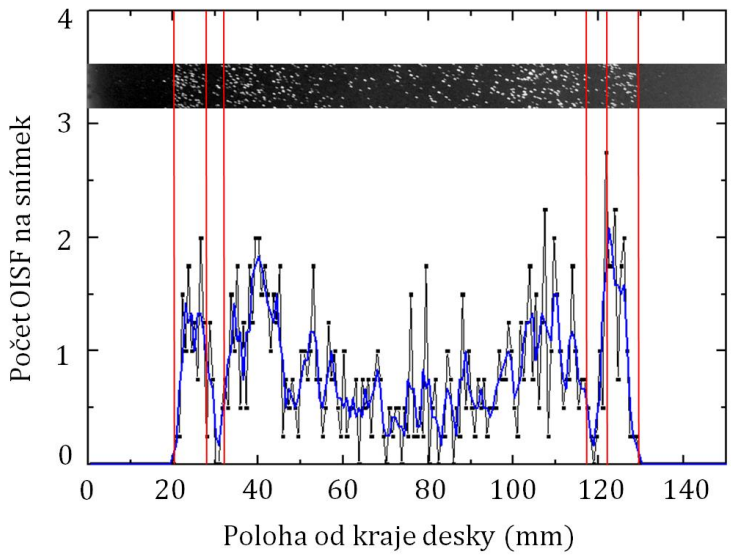
U měření objektivem zvětšujícím 20x jsou OISF jasně viditelné. Předepsaný objektiv pro OISF test ve firmě ON Semiconductor je právě se zvětšením 20x, při daném okuláru. V tomto případě je zorné pole čtvrtinové (0,90 x 0,68 mm) oproti objektivu 10x. Počet OISF na snímku byl okolo 1-3 v oblasti prstence. V programu DD byla hodnota prahování nastavena na 1,8 a hodnota momentu 18, na obr. 6.6 je fáze zpracování snímku po prahování a po analýze defektů.



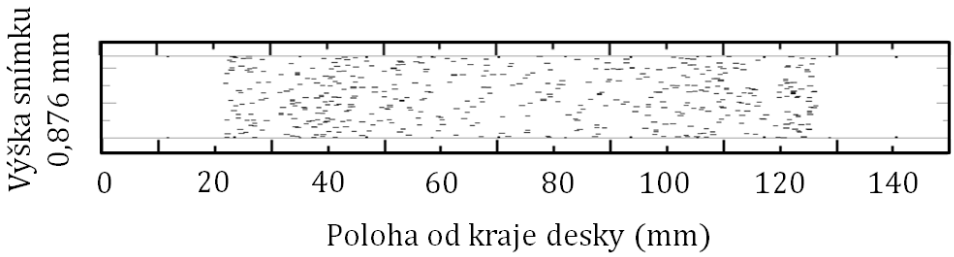
Obr. 6.6 Snímek povrchu Si desky (111) pořízený pomocí světelného mikroskopu s objektivem 20x. (a) Surový snímek, (b) prahovaný snímek v programu DD, (c) analyzovaný snímek v programu DD, červené křížky jsou detekované tečky a zelené křížky jsou detekované čárky (OISF). Vpravo dole u obrázků jsou naznačeny možné směry OISF.

Na obr. 6.7 je tentýž graf jako na obr. 6.4 pro objektiv se zvětšením 20x.

Na obr. 6.8 je prostorové rozložení OISF, tentokrát při měření s objektivem 20x. Jedná se o rozložení OISF při měření přes průměr desky, tedy výška skenované oblasti je 0,876 mm a šířka cca 150 mm.



Obr. 6.7 Graf počtu defektů na snímku v závislosti na poloze od kraje desky. Data byla naměřena programem DD. Černá křivka reprezentuje naměřené data, modrá křivka je plovoucí průměr naměřených dat.



Obr. 6.8 Mapa OISF při měření přes průměr desky.

6.3 Shrnutí experimentu

V obou případech měření s objektivem 10x i objektivem 20x byly OISF jasně rozpoznatelné, což neplatí u všech typů desek, proto je standardně používán pro OISF test objektiv 20x. Avšak větší snímané pole lépe vypovídá o plošné hustotě. Vhodnou alternativou ke snímání objektivem 10x je provádět měření s objektivem 20x ve 2-3 řádcích nad sebou a plošnou hustotu počítat ze 2-3 snímaných polí nad sebou se stejnou souřadnicí *x*.

Naměřené hodnoty a analýza provedená programem Defect Detect odpovídá rozložení OISF pozorované okem pod kolimovaným světlem. A to v obou případech u objektivu 10x a objektivu 20x i přes nízký počet OISF na snímek.

7 Závěr

Cílem této diplomové práce bylo navrhnout a sestavit zařízení pro automatizované skenování křemíkových desek a vytvoření programu pro detekci a následné vyhodnocování vrstevných chyb - tzn. provést automatizaci tzv. OISF testu.

V první třetině této práce je sepsána rešeršní studie zabývající se krystalografickými defekty v křemíku a jejich analýzou. Na začátku je popsán způsob získávání čistého křemíku a jeho zpracování pro použití v polovodičovém průmyslu. Práce byla vypracována ve spolupráci s firmou ON Semiconductor, která vyrábí křemíkové desky Czochralského metodou. Proto je tato metoda rozepsána podrobně, zatímco metoda zonální tavby je zmíněna jen stručně. Dále je v této části uveden přehled krystalografických defektů v křemíku a jejich vliv na elektronické součástky. Následují kapitoly věnující se zabudovávání kyslíku do krystalu a růstovým defektům, které mají za následek existenci tzv. OISF prstence. OISF pás je tvořen vrstevnými chybami, které byly zvýrazněny oxidací desky a následným selektivním leptáním. Metoda pro zvýraznění vrstevných chyb je popsána na konci první části a na konci práce v experimentální části.

Druhá část této práce je čistě praktická, věnuje se automatizaci OISF testu. Pro automatizaci OISF testu byl zkonstruován motorizovaný skenovací stolek, konstrukční návrh je popsán v této části. Dále byla sestavena elektronika pro komunikaci s uživatelem. Uživatel může stolek obsluhovat skrze ruční ovladač nebo počítač. Jako uživatelské rozhraní v počítači k obsluze stolku byl vytvořen program Defect Detect, který také slouží k detekci OISF na povrchu desky a k následné analýze. Zařízení bylo umístěno a zprovozněno ve firmě ON Semiconductor v Rožnově pod Radhoštěm, v současné době je používáno k OISF testu.

V poslední části této práce je popsáno měření, které bylo provedeno na testovací křemíkové desce. K měření OISF bylo použito zkonstruované zařízení, k detekci a vyhodnocení OISF byl použit program Defect Detect. Naměřené hodnoty odpovídaly očekávaným výsledkům.

Výstupem této práce je kompletní sestava pro automatizaci OISF testu. Tato sestava je tvořena motorizovaným skenovacím stolkem včetně ovládací elektroniky a programu pro detekci a analýzu OISF na povrchu křemíkových desek. Její funkčnost byla ověřena při testovacím měření ve firmě ON Semiconductor. Fotodokumentace zařízení je přiložena v kap. 9 - příloha A.

8 Reference

[1] J. CZOCHRALSKI, J. Ein neues Verfahren zur Messung der Kristallisationsgeschwindigkeit der Metalle.Zeitschrift für Physikalische Chemie. 1918, č. 92, s. 219-221.

[2] TEAL, G., M. SPARKS a E. BUEHLER. Growth of Germanium Single Crystals Containing p-n Junctions. *Physical Review*. 1951, roč. 81, č. 4, s. 637-637. ISSN 0031-899x.

[3] TEAL, G. K. a E. BÜHLER. Growth of Silicon Single Crystals and of Single Crystal Silicon Containing p-n Junctions. *Physical Review.* 1952, roč. 87, s. 190. ISSN 0031-899x.

[4] HUBER, D. The Development of Silicon in Europe. In: HUFF, H., R. H TSUYA a U. GÖSELE. *Semiconductor Silicon 1998*. Pennington: The Electrochemical Society, 1998, 116-125. ISBN 1-56677-195-1.

[5] PFANN, W. G. Principles of zone-melting. *Trans. AIME*. 1952, s. 747-753.

[6] DASH, W. C. Growth of Silicon Crystals Free from Dislocations. *Journal of Applied Physics*. 1959, roč. 30, č. 4, s. 459. ISSN 0021-8979.

[7] BOND, W. L. a W. KAISER. Interstitial versus substitutional oxygen in silicon. *Journal of Physics and Chemistry of Solids.* 1960, roč. 16, č. 1-2, 44-45. ISSN 0022-3697.

[8] BULLIS, W. M. Silicon Material Properties. In: O'MARA, W. C., R. B. HERRING a L. P. HUNT. *Handbook of semiconductor silicon technology*. Park Ridge, N.J.: Noyes Publications, 1990, s. 347-450. ISBN 08-155-1237-6.

[9] ZULEHNER, W. Czochralski Growth of Silicon and Germanium. In: SCHUZL, M. a H. WEIS. *Landolt-Boernstein: Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology*. Berlin: Springer-Verlag, 1984, s. 28.

[10] LIAW, H. M. Crystal Growth of Silicon. In: O'MARA, W. C., R. B. HERRING a L. P. HUNT. *Handbook of semiconductor silicon technology*. Park Ridge, N.J.: Noyes Publications, 1990, s. 94. ISBN 08-155-1237-6.

[11] HUFF, H. R, L. FÁBRY a S. KISHINO. *Semiconductor silicon 2002*: *proceedings of the Ninth International Symposium on Silicon Materials Science and Technology*. Pennington, N.J.: Electrochemical Society, 2002, s. 163. ISBN 15-667-7374-1.

[12] VPS, s.r.o. *Od křemene ke křemíkové desce*: *Výroba monokrystalů a křemíkových desek*. Piešťany, březen 2002. Interní firemní materiál zpřístupněný firmou ON Semiconductor.

[13] VÁLEK, L. *Růstové defekty v monokrystalech Czochralskiho křemíku*, Rožnov pod Radhoštěm, 2009. Pojednání ke státní závěrečné zkoušce. VUT v Brně, FSI, Ústav fyzikálního inženýrství.

[14] VÁLEK, L. *Růstové defekty v monokrystalech Czochralskiho křemíku*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. Disertační práce.. Vedoucí prof. RNDr. Jiří Spousta, Ph.D. Bude publikováno 2012-2013.

[15] BORGHESI, A., B. PIVAC, A. SASSELLA a A. STELLA. Oxygen precipitation in silicon. *Journal of Applied Physics*. 1995, roč. 77, č. 9, s. 4169. ISSN 00218979.

[16] HARBEKE, G. a M. SCHULZ. *Semiconductor silicon*. New York: Springer-Verlag, 1989, 345 s. ISBN 03-875-1073-7.

[17] O'MARA, W. C. Oxygen, Carbon and Nitrogen in Silicon. In: O'MARA, W. C., R. B. HERRING a L. P. HUNT. *Handbook of semiconductor silicon technology*. Park Ridge, N.J.: Noyes Publications, 1990, s. 451-549. ISBN 08-155-1237-6.

[18] KITTEL, CH. a H. KROEMER. *Thermal Physics.* 2nd ed. New York: W. H. Freeman, 1980, 473 s. ISBN 07-167-1088-9.

[19] PICHLER, P. *Intrinsic point defects, impurities, and their diffusion in silicon*. New York: Springer, 2004, 554 s. ISBN 32-112-0687-6.

[20] GRAFF, K. *Metal impurities in silicon-device fabrication*. 2nd, rev. ed. New York: Springer, 2000, 268 s. Springer series in materials science, ISBN 35-406-4213-7.

[21] VÁLEK, L. a J. ŠIK. Defect Engineering during Czochralski Crystal Growth and Silicon Wafer Manufacturing. In: KOLESNIKOV, N. a E. BORISENKO. *Modern Aspects of Bulk Crystal and Thin Film Preparation.* Rijeka: In-Tech, 2012, s. 43-70. ISBN 978-953-307-610-2.

[22] ITSUMI, M. Octahedral void defects in Czochralski silicon. *Journal of Crystal Growth*. 2002, 237–239, s. 1773–1778. ISSN 0022-0248.

[23] FÖLL, H. a B. O. KOLBESEN. Formation and nature of swirl defects in silicon. *Applied Physics* [online]. 1975, roč. 8, č. 4, s. 319-331 [cit. 2012-05-04]. ISSN 0340-3793.

[24] TSUYA, H. Oxygen Effect on Electronic Device Performance. SHIMURA, Fumio. *Oxygen in silicon*. Boston: Academic Press, 1994, s. 619-663. ISBN 01-275-2142-9.

[25] SINNO, T., E. DORNBERGER, W. Von AMMON, R. A. BROWN a F. DUPRET. Defect engineering of Czochralski single-crystal silicon.*Materials Science and Engineering: R: Reports*. 2000, roč. 28, 5-6, s. 149-198. ISSN 0927-796x.

[26] SHIMURA, Fumio. *Oxygen in silicon*. Boston: Academic Press, 1994. ISBN 01-275-2142-9.

[27] INOUE, N., J. OSAKA a K. WADA. Oxide Micro-Precipitates in As-Grown CZ Silicon. *Journal of the Electrochemical Society*. New York: Electrochemical Society, 1982, roč. 129, č. 12, s. 2780-2788 ISSN 0013-4651.

[28] INOUE, N., K. WATANABE, K. WADA a J. OSAKA. Time-lag in nucleation of oxide precipitates in silicon due to high temperature preannealing. *Journal of Crystal Growth*. 1987, roč. 84, č. 1, s. 21-35. ISSN 0022-0248.

[29] VANHELLEMONT, J. a C. CLAEYS. Erratum: „A theoretical study on the critical radius of precipitates and its application to silicon oxide in silicon“ . *Journal of Applied Physics*. 1992, roč. 71, č. 2, s. 1073. ISSN 0021-8979.

[30] VANHELLEMONT, J. a C. CLAEYS. A theoretical study of the critical radius of precipitates and its application to silicon oxide in silicon. *Journal of Applied Physics*. 1987, roč. 62, č. 9, s. 3960. ISSN 0021-8979.

[31] WADA, K., H. NAKANISHI, H. TAKAOKA a N. INOUE. Nucleation temperature of large oxide precipitates in as-grown Czochralski silicon crystal. *Journal of Crystal Growth*. 1982, roč. 57, č. 3, s. 535-540. ISSN 0022-0248.

[32] VORONKOV, V. V. a C. CLAEYS. The mechanism of swirl defects formation in silicon. *Journal of Applied Physics*. 1987, roč. 62, č. 9, s. 625-643. ISSN 0021-8979.

[33] VORONKOV, V. V. a R. FALSTER. Vacancy and self-interstitial concentration incorporated into growing silicon crystals. *Journal of Applied Physics*. 1999, roč. 86, č. 11, s. 5975. ISSN 0021-8979.

[34] VORONKOV, V. V. a R. FALSTER. Dopant effect on point defect incorporation into growing silicon crystal. *Journal of Applied Physics*. 2000, roč. 87, č. 9, s. 4126. ISSN 0021-8979.

[35] DORNBERGER, E., et al. Influence of boron concentration on the oxidation-induced stacking fault ring in Czochralski silicon crystals. *Journal of Crystal Growth*. 1997, roč. 180, 3-4, s. 343-352. ISSN 0022-0248.

[36] WILIAMS, K. R. The institution of Electrical Engineers. In: HULL, R. *Properties of crystalline silicon*. London: INSPEC, 1999. ISBN 08-529-6933-3.

[37] JENKINS, Margaret Wright. A New Preferential Etch for Defects in Silicon Crystals. *Journal of The Electrochemical Society*. 1977, roč. 124, č. 5, s. 757. ISSN 0013-4651.

[38] SIRTL, E. a A. Z. ADLER. Chromic-hydrofluoric acid as a specific system for the development of Etch pits on silicon. *Zeitschrift für Metallkunde*. 1961, roč. 52, č. 8, s. 529- 531.

[39] SCHIMMEL, D. G. Defect Etch for <100> Silicon Evaluation. *Journal of The Electrochemical Society*. 1979, roč. 126, č. 3, s. 479. ISSN 0013-4651.

[40] YANG, K. H. An Etch for Delineation of Defects in Silicon. *Journal of The Electrochemical Society*. 1984, roč. 131, č. 5, s. 1140. ISSN 0013-4651.

[41] SECCO D' ARAGONA, F. Dislocation Etch for (100) Planes in Silicon. *Journal of The Electrochemical Society*. 1972, roč. 119, č. 7, s. 948. ISSN 0013-4651.

[42] CHANDLER, T. C. MEMC Etch: A Chromium Trioxide-Free Etchant for Delineating Dislocations and Slip in Silicon. *Journal of The Electrochemical Society*. 1990, roč. 137, č. 3, s. 944. ISSN 0013-4651.

[43] DASH, W. C. Copper Precipitation on Dislocations in Silicon. *Journal of Applied Physics*. 1956, roč. 27, č. 10, s. 1193-. ISSN 00218979.

[44] THK. *Caged Ball LM Guid: Ball Cage Effect Lightweight, Compact Typ* [online]. THK, 2005 [cit. 2012-03-24]. Dostupné z: http://www.thk.ru/cataloguespdf/srs.pdf

[45] ATMEL. *Xmega A manual* [online]. Atmel, © 2009 [cit. 2012-05-21]. Dostupné z: http://www.atmel.com/Images/doc8077.pdf

[46] ASTM F1188-02. *Standard Test Method for Interstitial Atomic Oxygen Content ofSilicon by Infrared Absorption with Short Baseline*. ASTM International, 2003.

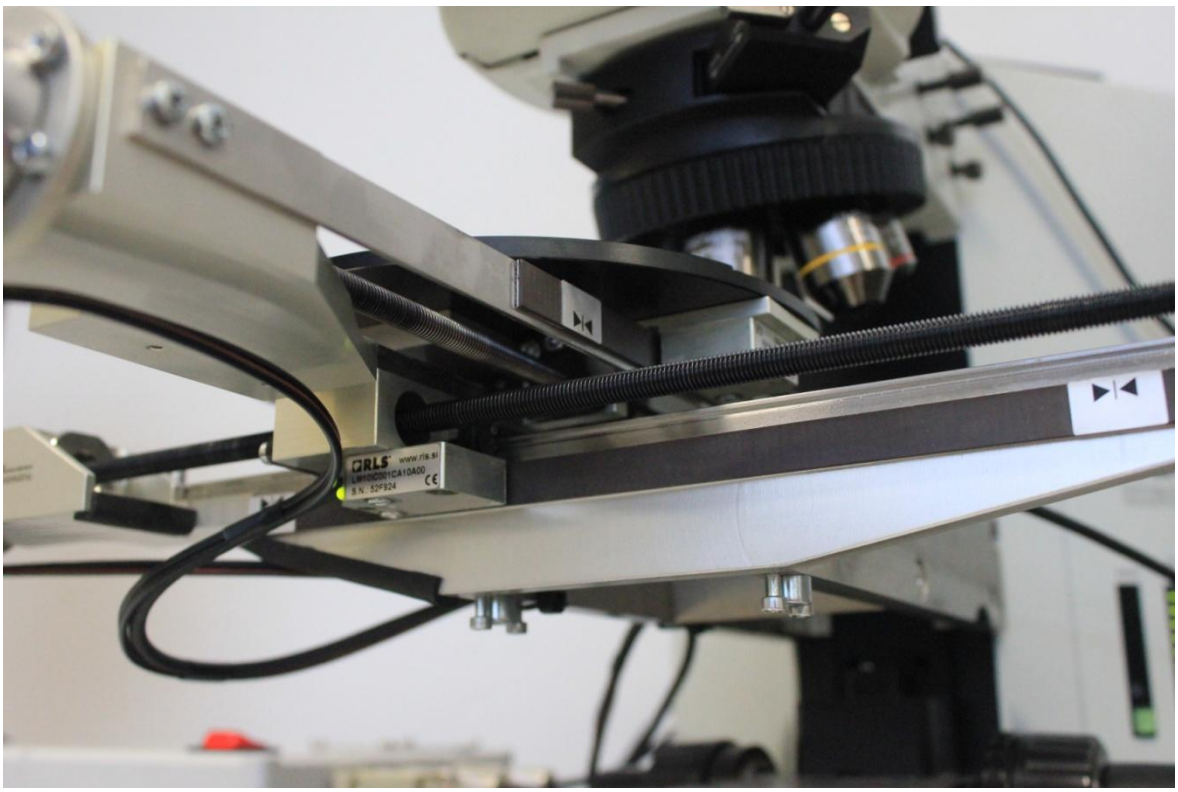
9 Přílohy

PŘÍLOHA A - FOTODOKUMENTACE ZAŘÍZENÍ

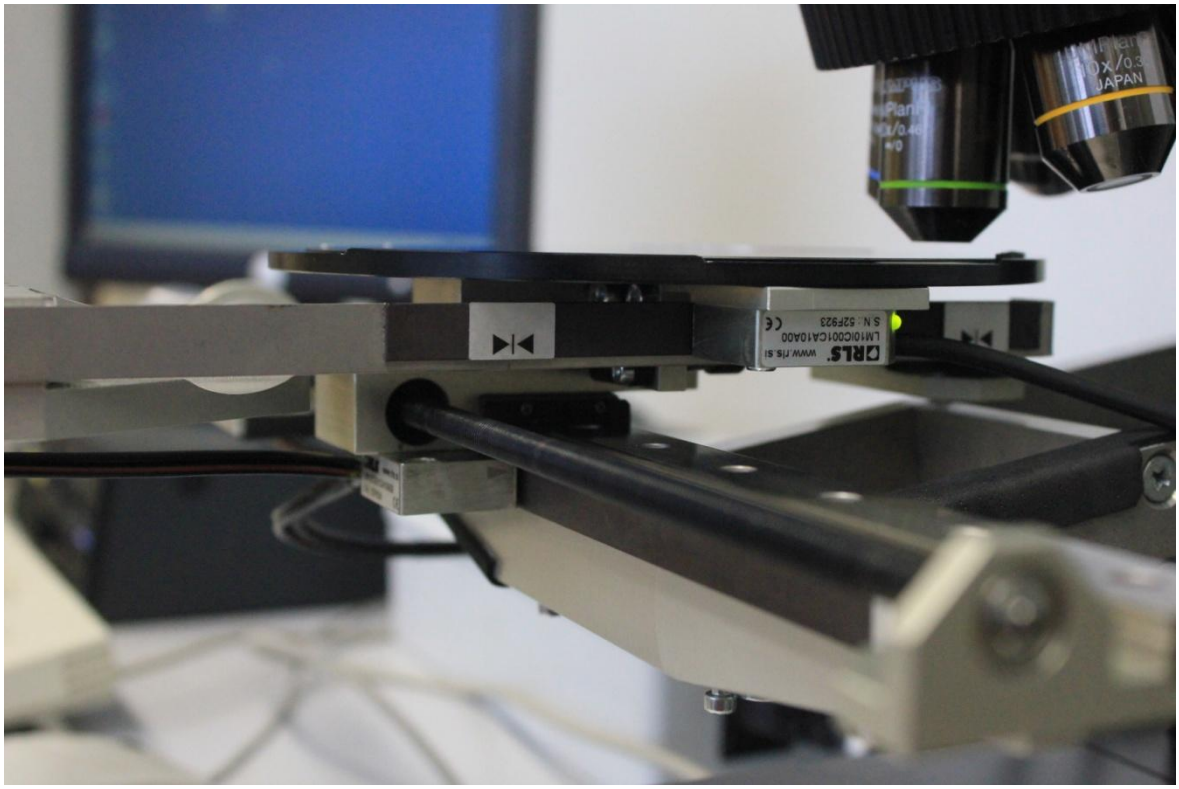
Obr. 9.1 Fotografie zařízeni v chodu.

Obr. 9.2 Fotografie skenovacího stolku.

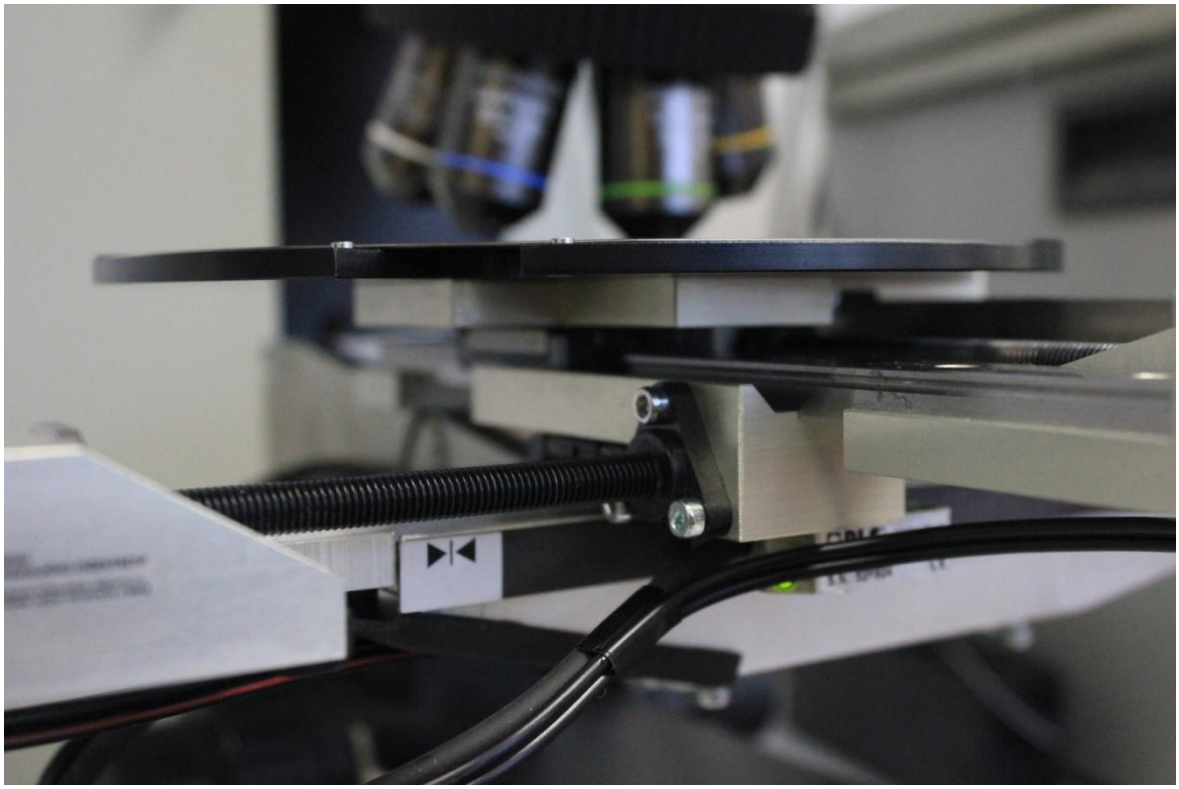
Obr. 9.3 Fotografie skříně s řídicí elektronikou.



Obr. 9.4 Fotografie stolku - detail.



Obr. 9.5 Fotografie stolku - detail.



Obr. 9.6 Fotografie stolku - detail.

PŘÍLOHA B - DVD

- výkresová dokumentace v PDF formátu
- CAD soubory ve formátu kompatibilním s programem SolidWorks a ve formátu *.stp
- fotografie funkčního zařízení
- program Defect Detect
- zdrojové kódy programu Defect Detect
- data k testovacímu měření programem Defect Detect

10 Seznam použitých zkratek

C_I	-	rovnovážná koncentrace intersticiálů
C_I^*	-	rovnovážná koncentrace intersticiálů
C_V	-	rovnovážná koncentrace vakancí
C_V^*	-	rovnovážná koncentrace vakancí
C_{ox}	-	koncentrace kyslíku
C_{ox}^*	-	rovnovážná koncentrace nasycení kyslíku
T_m	-	teplota tání
V_p	-	objem kyslíku v oxidové částici SiO_x
k_B	-	Boltzmannova konstanta
r_c	-	kritický poloměr zárodkuprecipitátu
ΔG_V	-	objemová Gibbsova energie
ΔG	-	změna volné energie
a	-	mřížkový parametr
Al_2O_3	-	oxid hlinitý
C	-	uhlík
CO	-	oxid uhelnatý
COP	-	z angl. *Crystal Originated Particle*
CZ křemík	-	Křemík vyroben Czochralského metodou
CZ metoda	-	Czochralského metoda
CZ tažička	-	Czochralského tažička
DD	-	název programu Defect Detect
d_{hkl}	-	vzdálenost mezi rovinami v jednoduché kubické mřížce
FCC	-	plošně centrovaná kubická mřížka (z angl. *Face Centered Cubic*)
FSI	-	Fakulta Sstrojního Inženýrství
H	-	vodík

h,k,l	-	symboly označující Millerovy indexy
H_2O_2	-	peroxid vodíku
HCl	-	kyselina chlorovodíková
HF	-	kyselina fluorovodíková
HNO_3	-	kyselina dusičná
IR	-	infračervená
KOH	-	hydroxid draselný
LDDA	-	Laboratoř Diagnostiky Defektů a Analýzy
NH_4OH	-	hydroxid amonný
O	-	kyslík
OISF	-	z angl. *Oxidation Induced Stacking Fault*
ONČR	-	ON Semiconductor Česká Republika
PVA	-	polyvinylalkohol
r	-	poloměr zárodku precipitátu
RF cívka	-	radiofrekvenční cívka
SC1	-	označení pro standardní čistící roztok
SC2	-	označení pro standardní čistící roztok
SF	-	vrstevná chyba (z angl. *Stacking Fault*)
Si	-	křemík
Si^H	-	hutní křemík
SiH_4	-	silan
$SiHCl_3$	-	trichlorsilan
SiO_2	-	oxid křemičitý
T	-	teplota
V-I	-	vakantně-intersticiální rozhraní
C	-	koncentrace bodových defektů
D	-	koeficient difuze
G	-	teplotní gradient

v	-	rychlost tažení krystalu
α	-	koeficient tepelné difuze
γ a β	-	koeficienty popisující emisi intersticiálů a absorpci vakancí při růstu precipitátů
γ	-	povrchová energie
δ	-	změna objemu
ε	-	napětí
μ	-	modul pružnosti
ξ	-	kritický poměr rychlosti tažení krystalu a teplotního gradientu
π	-	Ludolfovo číslo