



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY**

**A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

**ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY**

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

**CHARAKTERISTIKY POLOVODIČOVÉHO BSE**

**DETEKTORU ELEKTRONOVÉHO MIKROSKOPU**

CHARACTERISTICS OF SEMICONDUCTOR BSE ELECTRON MICROSCOPE DETECTOR

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. Vítězslav Plot**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**prof. Ing. Jaroslav Boušek, CSc.**

**BRNO 2023**

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Mikroelektronika**

Ústav mikroelektroniky

**Student:** Bc. Vítězslav Plot

**ID:** 195417

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2022/23

**NÁZEV TÉMATU:**

## **Charakteristiky polovodičového BSE detektoru elektronového mikroskopu**

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

Seznamte se s principem polovodičového BSE detektoru a proveďte rešerši dostupných materiálů na výrobu polovodičových detektorů BSE.

Proveďte měření charakteristických vlastností včetně reakce na rychlé změny u BSE detektoru firmy Delong Instruments a sestavte jeho charakteristiky. Následně proveďte stejná měření pro detektor od jiného výrobce a oba detektory porovnejte.

Na základě získaných dat vyhodnoťte životnost detektoru DI v závislosti na prostředí a zatížení a sestavte doporučení k případné optimalizaci jeho vlastností.

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

Podle pokynů vedoucího práce.

**Termín zadání:** 6.2.2023

**Termín odevzdání:** 23.5.2023

**Vedoucí práce:** prof. Ing. Jaroslav Boušek, CSc.

**Konzultant:** Mgr. Petr Štěpán, Delong Instruments

**doc. Ing. Lukáš Fucík, Ph.D.**  
předseda rady studijního programu

**UPOZORNĚNÍ:**

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **Abstrakt**

Práce se zabývá charakterizací polovodičového detektoru zpětně odražených elektronů. Teoretická část popisuje dva typy elektronových mikroskopů, interakci primárního svazku se vzorkem a jednotlivé druhy elektronů a záření vznikající při interakci. Dále jsou shrnuty nejpoužívanější typy detektorů elektronů v rastrovacím elektronovém mikroskopu. Jsou popsány základní charakteristiky polovodičového detektoru zpětně odražených elektronů a metody jejich měření. Experimentální část se zabývá měřením charakteristik detektoru firmy Delong Instruments a jeho porovnáním s komerčně dostupnými detektory. Bylo provedeno měření voltampérové charakteristiky a proudu za temna, závislosti zisku na urychlovacím napětí a také časové odezvy detektoru.

## **Klíčová slova**

Elektronový mikroskop, zpětně odražené elektrony, polovodičový detektor, charakterizace detektoru, voltampérová charakteristika, zisk detektoru, časová odezva

## **Abstract**

The thesis deals with the characterization of a semiconductor detector of backscattered electrons. The theoretical part describes two types of electron microscopes, the interaction of the primary beam with the sample and individual types of electrons and radiation arising during the interaction. The most used types of electron detectors in scanning electron microscope are summarized. The basic characteristics of the semiconductor backscattered electron detector and their measurement methods are described. The experimental part deals with measuring the characteristics of the detector made by Delong Instruments and comparing it with commercially available detectors. Volt-ampere characteristic and dark current, the dependence of the gain on the accelerating voltage, as well as the time response of the detector were measured.

## **Keywords**

Electron microscope, backscattered electrons, semiconductor detector, detector characterization, volt-ampere characteristic, detector gain, time response

## **Bibliografická citace**

PLOT, Vítězslav. *Charakteristiky polovodičového BSE detektoru elektronového mikroskopu* [online]. Brno, 2023 [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/152474>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky. Vedoucí práce Jaroslav Boušek.

# Prohlášení autora o původnosti díla

**Jméno a příjmení studenta:** *Vítězslav Plot*

**VUT ID studenta:** *195417*

**Typ práce:** *Diplomová práce*

**Akademický rok:** *2022/23*

**Téma závěrečné práce:** *Charakteristiky polovodičového BSE  
detektoru elektronového mikroskopu*

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné 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 části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 23.5.2023

-----  
podpis autora

## Poděkování

*Děkuji vedoucímu diplomové práce prof. Ing. Jaroslavu Bouškovi, CSc. za metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a cenné rady při zpracování mé diplomové práce. Dále chci poděkovat zaměstnancům firmy Delong Instruments a.s., především Mgr. Petru Štěpánovi a Ing. Janu Robotkovi za odbornou pomoc při zpracování experimentální části práce. Děkuji také Ing. Břetislavu Míkelovi Ph.D. za možnost provedení experimentu na Ústavu přístrojové techniky Akademie věd. V neposlední řadě děkuji Bc. Jitce Vechetové za podporu při psaní práce.*

V Brně dne: 23. května 2023

-----  
podpis autora

# Obsah

<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>9</b>
<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>11</b>
<b>ÚVOD .....</b>	<b>12</b>
<b>1 ELEKTRONOVÁ MIKROSKOPIE .....</b>	<b>13</b>
1.1 ELEKTRONOVÝ MIKROSKOP .....	13
1.2 ZDROJE ELEKTRONOVÉHO SVAZKU .....	13
1.2.1 Termoeemisní zdroje.....	13
1.2.2 Autoemisní zdroje.....	14
1.2.3 Schottkyho katoda .....	14
1.3 TRANSMISNÍ ELEKTRONOVÝ MIKROSKOP .....	15
1.3.1 Konstrukce .....	15
1.4 RASTROVACÍ ELEKTRONOVÝ MIKROSKOP .....	16
1.4.1 Konstrukce .....	16
<b>2 INTERAKCE ELEKTRONŮ SE VZORKEM .....</b>	<b>17</b>
2.1 SEKUNDÁRNÍ ELEKTRONY .....	18
2.2 ZPĚTNĚ ODRAŽENÉ ELEKTRONY .....	19
2.3 RENTGENOVÉ ZÁŘENÍ.....	20
2.4 KATODOLUMINISCENCE .....	21
2.5 AUGEROVY ELEKTRONY.....	21
<b>3 DETEKTORY .....</b>	<b>22</b>
3.1 EVERHART-THORNLEY DETEKTOR .....	22
3.2 MICROCHANNEL-PLATE DETEKTOR.....	23
3.3 SCINTILAČNÍ BSE DETEKTOR.....	24
3.4 POLOVODIČOVÝ DETEKTOR.....	24
<b>4 CHARAKTERIZACE BSE DETEKTORU .....</b>	<b>27</b>
4.1 ELEKTRICKÉ PARAMETRY .....	27
4.1.1 Bariérová kapacita.....	27
4.1.2 Svodový odpor.....	28
4.1.3 Sériový odpor .....	28
4.2 VOLTAMPÉROVÁ CHARAKTERISTIKA .....	28
4.3 ZISK DETEKTORU .....	30
4.4 ČASOVÁ ODEZVA .....	31
<b>5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....</b>	<b>33</b>
5.1 MĚŘENÉ DETEKTORY .....	33
5.2 VOLTAMPÉROVÁ CHARAKTERISTIKA .....	33
5.3 VÝPOČET SVODOVÉHO ODPORU .....	34
5.4 ZISK DETEKTORU .....	35
5.5 ČASOVÁ ODEZVA .....	39
5.5.1 Detektor + zesilovač LVEM5.....	39
5.5.2 Detektor + zesilovač UVA.....	44

5.5.3	<i>Detektor + předzesilovač</i> .....	45
5.5.4	<i>Vliv délky kabelu na časovou odezvu</i> .....	49
5.6	DISKUSE NAMĚŘENÝCH VÝSLEDKŮ.....	54
<b>6</b>	<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>56</b>
	<b>LITERATURA</b> .....	<b>57</b>



# SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Schématické zobrazení transmisního elektronového mikroskopu. Převzato z [3].....	15
Obrázek 2: Schématické zobrazení rastrovacího elektronového mikroskopu. Převzato z [3] .....	16
Obrázek 3: Schématické zobrazení interakce primárního svazku se vzorkem. [4] .....	17
Obrázek 4: Schématické rozložení energie emitovaných elektronů ze vzorku. [4] .....	18
Obrázek 5: Porovnání obrazu elektronového mikroskopu získaného pomocí detekce a) sekundárních elektronů b) zpětně odražených elektronů [7] .....	19
Obrázek 6: Schématické zobrazení E-T detektoru. [12] .....	22
Obrázek 7: Polovodičový detektor STD-BSD-40-4-1-10 firmy PN detector [16].....	25
Obrázek 8: Vliv polohy detektoru ke vzorku při zkoumání topografického kontrastu u dvou segmentového detektoru a) rovnoběžně se vzorkem, b) kolmo ke vzorku, c) čtyř segmentový detektor. Převzato z [19] .....	26
Obrázek 9: Náhradní schéma fotodiody.....	27
Obrázek 10: Voltampérová charakteristika BSE detektoru bez osvětlení [převzato z 22] .....	29
Obrázek 11: Schéma měření voltampérové charakteristiky.....	29
Obrázek 12: Blokové schéma zapojení pro měření zisku .....	30
Obrázek 13: Blokové schéma měření časové odezvy BSE detektoru.....	32
Obrázek 14: Voltampérové charakteristiky měřených detektorů.....	34
Obrázek 15: Rozmístění komponent na pohyblivém stolku elektronového mikroskopu.....	35
Obrázek 16: Závislost zisku detektorů na urychlovacím napětí primárního svazku.....	37
Obrázek 17: Celkový naměřený časový průběh po osvětlení pulsem výbojky a laseru na detektoru DI se zesilovačem LVEM5.....	40
Obrázek 18: Sestupná hrana odezvy na puls laseru detektoru DI se zesilovačem LVEM5 .....	40
Obrázek 19: Celkový naměřený časový průběh po osvětlení pulsem výbojky a laseru na detektoru firmy Opto Diode se zesilovačem LVEM5 .....	41
Obrázek 20: Sestupná hrana odezvy na puls laseru detektoru Opto Diode se zesilovačem LVEM5 .....	41
Obrázek 21: Celkový naměřený časový průběh po osvětlení pulsem výbojky a laseru na detektoru firmy PNdetector se zesilovačem LVEM5.....	42
Obrázek 22: Sestupná hrana odezvy na puls laseru detektoru PNdector se zesilovačem LVEM5 .....	42
Obrázek 23: Naměřený časový průběh detektoru Opto Diode se zesilovačem UVA .....	44
Obrázek 24: Časový průběh detektoru DI v zapojení s předzesilovačem po osvětlení pulsem laseru .....	45
Obrázek 25: Nástupná hrana detektoru DI v zapojení s předzesilovačem po osvětlení pulsem laseru .....	46
Obrázek 26: Sestupná hrana detektoru DI v zapojení s předzesilovačem po osvětlení pulsem laseru .....	46
Obrázek 27: Nástupná hrana detektoru Opto Diode v zapojení s předzesilovačem po osvětlení pulsem laseru .....	47
Obrázek 28: Sestupná hrana detektoru Opto Diode v zapojení s předzesilovačem po osvětlení pulsem laseru .....	47
Obrázek 29: Nástupná hrana detektoru PNdector v zapojení s předzesilovačem po osvětlení pulsem laseru .....	48
Obrázek 30: Sestupná hrana detektoru PNdector v zapojení s předzesilovačem po osvětlení pulsem laseru .....	48
Obrázek 31: Naměřené průběhy nástupných hran detektoru DI s předzesilovačem pro různé délky kabelu .....	50
Obrázek 32: Naměřené průběhy sestupných hran detektoru DI s předzesilovačem pro různé délky kabelu .....	50
Obrázek 33: Naměřené průběhy nástupných hran detektoru Opto Diode s předzesilovačem pro různé délky kabelu .....	51

Obrázek 34: Naměřené průběhy sestupných hran detektoru Opto Diode s předzesilovačem pro různé délky kabelu .....	51
Obrázek 35: Naměřené průběhy nástupných hran detektoru PNdetector s předzesilovačem pro různé délky kabelu .....	52
Obrázek 36: Naměřené průběhy sestupných hran detektoru PNdetector s předzesilovačem pro různé délky kabelu .....	52

## SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Srovnání zdrojů elektronů. [2] .....	14
Tabulka 2: Vybrané vlastnosti komerčně dostupných detektorů [16, 24].....	33
Tabulka 3: Naměřené hodnoty proudu za temna při napětí 10 mV a vypočítané hodnoty svodového odporu .....	35
Tabulka 4: Naměřené hodnoty proudů primárního svazku a proudy detektorů pro různá urychlovací napětí .....	36
Tabulka 5: Zisk detektorů pro daná urychlovací napětí .....	37
Tabulka 6: Naměřené hodnoty časů sestupných hran jednotlivých detektorů v zapojení se zesilovačem LVEM5 .....	43
Tabulka 7: Naměřené hodnoty nástupných a sestupných hran pro jednotlivé detektory .....	49
Tabulka 8: Změřené hodnoty času nástupných a sestupných hran měřených detektorů pro různé délky kabelu .....	53

# ÚVOD

Elektronová mikroskopie se stala klíčovou technikou pro pozorování a analýzu materiálů na mikro a nano úrovni, kde světelná mikroskopie již nedostačuje. Nachází uplatnění jak v průmyslu, tak v různých vědních oborech, jako je biologie a biomedicína, materiálové vědy, chemie a mnoho dalších. Detekce elektronů je zásadním krokem pro vytvoření kvalitního obrazu vzorku. Výběr správného detektoru je důležitý, protože určuje, jaký typ elektronů bude detekován. Na základě druhu detekovaných elektronů můžeme získat informaci o topografickém či materiálovém kontrastu. Jedním z oblíbených detekčních systémů v elektronové mikroskopii je polovodičový detektor zpětně odražených elektronů (BSE). Tento detektor nabízí vynikající účinnost detekce, zesílení a vynikající materiálový kontrast. Díky možnosti segmentace detektoru lze jednotlivé signály zpracovávat odděleně, a tak je možné pozorovat i topografický kontrast.

Teoretická část diplomové práce se věnuje popisu různých typů elektronových mikroskopů a jejich základní konstrukci. Dále se zabývá interakcí primárního svazku se vzorkem a popisuje jednotlivé elektrony a záření vznikající při srážce elektronu s materiálem. Také se zaměřuje na detekci elektronů v elektronových mikroskopech. Jsou zde popsány nejčastější typy detektorů používaných v rastrovací elektronové mikroskopii a je popsán princip jejich funkce. Další část práce se věnuje popisu různých charakteristik, které určují základní vlastnosti detektoru. Jsou zde také popsány metody měření těchto charakteristik a očekávané výsledky.

V praktické části jsou změřeny charakteristiky polovodičového BSE detektoru firmy Delong Instruments a porovnání jeho vlastností s dvěma komerčně dostupnými detektory, SXUVPS1/LP od firmy Opto Diode a BSD-40-4-1-10 od firmy PNdector. Cílem experimentů je zjistit, zda jsou parametry detektoru firmy Delong Instruments srovnatelné s ostatními detektory na trhu. Bylo provedeno měření voltampérové charakteristiky pro určení velikosti proudu za temna a měření zisku detektoru v závislosti na změně urychlovacího napětí. V poslední části práce byla změřena časová odezva detektoru, která je klíčovým faktorem ovlivňujícím rychlost rastrování. Časová odezva byla měřena v zapojení se zesilovačem používaným u elektronového mikroskopu LVEM5. Následně byla změřena časová odezva v zapojení s experimentálním předzesilovačem. Na závěr bylo provedeno měření vlivu parazitní kapacity na časovou odezvu celého zapojení.

# 1 ELEKTRONOVÁ MIKROSKOPIE

Elektronová mikroskopie vznikla jako způsob zkoumání objektů, které nejsme schopni zobrazit pomocí klasického optického mikroskopu. U optického mikroskopu využíváme fotony viditelného světla s vlnovou délkou ve stovkách nanometrů. Kvůli tomu je maximální rozlišovací schopnost zhruba 200 nm. U elektronového mikroskopu využíváme místo fotonů urychlené elektrony, jejichž vlnová délka je mnohonásobně nižší a díky tomu jsme schopni dosáhnout lepšího rozlišení. Moderní elektronové mikroskopy dosahují rozlišení v jednotkách nm až ve stovkách pm.

## 1.1 Elektronový mikroskop

Elektronový mikroskop se skládá ze zdroje primárních elektronů, kondenzorových čoček, clon, držáku vzorku a detekčního systému. Nedílnou součástí elektronového mikroskopu je čerpací systém vakua, neboť vakuum je nezbytné pro správnou funkci elektronového mikroskopu. Nutnost vakua souvisí hlavně se snížením střední dráhy doletu elektronu, ale je nutné i pro správnou funkci katody a udržení její životnosti. Elektronový mikroskop vyžaduje pro optimální funkci tlaky kolem  $10^{-5}$  Pa. V komoře elektronové trysky ovšem může být tlak až na úrovni ultra vysokého vakua (UHV). [1] Pro dosažení požadovaného vakua se nejčastěji používá soustava několika čerpacích jednotek pro různé úrovně vakua. Nejčastější používané typy pump a vývěv jsou membránové pumpy, turbomolekulární pumpy, iontové vývěvy a getrové vývěvy. Jsou známy hlavní dva typy elektronových mikroskopů, transmisní elektronový mikroskop (TEM) a rastrovací elektronový mikroskop (SEM).

## 1.2 Zdroje elektronového svazku

Zdrojem primárního svazku elektronů je elektronová tryska. V elektronových mikroskopech se používají hlavně termoemisní trysky, kde k emisi dochází žhavením hrotu trysky, a autoemisní trysky, kde jsou elektrony z hrotu vytrhávány pomocí silného elektrického pole.

### 1.2.1 Termoemisní zdroje

U termoemisních trysek se emise elektronu dosáhne žhavením hrotu katody, kdy elektrony získají dostatečnou energii a jsou emitovány. Nejjednodušším zdrojem elektronů je wolframové vlákno. Wolframovým vláknem prochází elektrický proud, který vlákno zahřeje až na teplotu 2700 K, elektrony získají vyšší energii, než je výstupní práce, a jsou emitovány. Wolframové vlákno má ze všech zdrojů elektronů nejmenší nároky na vakuum, nicméně vyšší hodnota tlaku snižuje jeho životnost. Životnost wolframového vlákna se pohybuje maximálně kolem 100 hodin. [2] Dalším typem termoemisního zdroje

je krystal LaB<sub>6</sub>. Hrot katody je tvořen krystalem LaB<sub>6</sub> a je žhaven nepřímo, pomocí topného tělesa. Výhodou LaB<sub>6</sub> katody je funkce při nižších teplotách, okolo 1700 K, a větší životnost až 1000 hodin. [2]

### 1.2.2 Autoemisní zdroje

U autoemisní trysky, tzv. studené katody, dochází k emisi elektronů pomocí elektrického pole. Katoda je tvořena tenkým wolframovým vláknem, na které je působeno silným elektrickým polem. Elektrony jsou díky elektrickému poli vytrhávány z katody ven. Studená katoda je velmi náchylná na adsorpci plynů na povrchu, a proto při provozu vyžaduje vysoké nároky na vakuum. Zároveň může být katoda zahřívána, aby se adsorpce eliminovala. Studené katody se vyznačují vysokou životností v řádech tisíců hodin v závislosti na úrovni vakua. Konstrukce studené katody je ovšem složitá, a tedy i dost drahá.

### 1.2.3 Schottkyho katoda

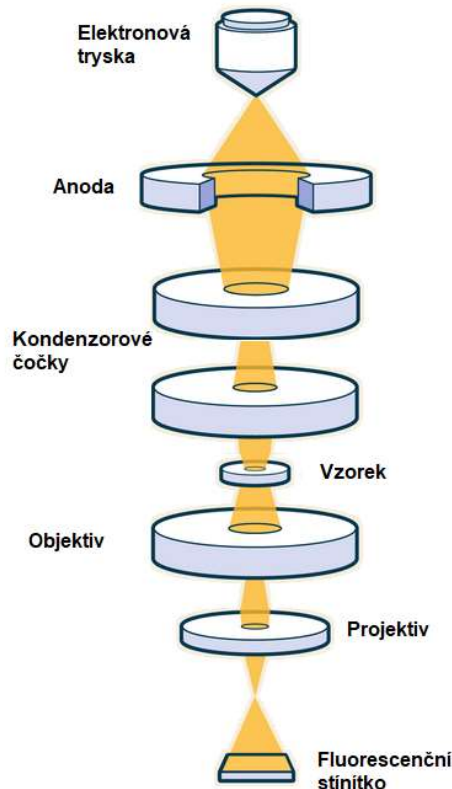
Speciálním typem zdroje elektronů je Schottkyho katoda. U Schottkyho katody je kombinována termoemise s autoemisí. Na wolframovém hrotu je vytvořena tenká vrstva ZrO<sub>2</sub>, která snižuje výstupní práci. Hrot je následně žhaven na teplotu kolem 1800 K a zároveň na něj působí elektrické pole. Teplota má stabilizační účinek na katodu a zároveň zajišťuje vyšší čistotu hrotu. Díky stabilnější emisi než u autoemisních katod a dobré životnosti se jedná o oblíbený zdroj v elektronových mikroskopech.

Tabulka 1: Srovnání zdrojů elektronů. [2]

Typ zdroje elektronů	Wolframové vlákno	Krystal LaB <sub>6</sub>	Autoemisní zdroj	Schottkyho katoda
Provozní teplota [K]	2700	1700	300	1700
Světelnost [A/m <sup>2</sup> sr]	10 <sup>10</sup>	5*10 <sup>11</sup>	10 <sup>13</sup>	5*10 <sup>12</sup>
Vakuum [Pa]	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-9</sup>	10 <sup>-6</sup>
Doba života [hod]	100	1000	>5000	>5000

## 1.3 Transmisní elektronový mikroskop

U transmisního elektronového mikroskopu prochází primární svazek skrze vzorek a výsledný obraz je promítán na fluorescenční stínítko, které převádí dopadající elektrony na viditelné světlo. Množství prošlých elektronů závisí na tloušťce a materiálu vzorku. U transmisního mikroskopu je velkým omezením tloušťka zkoumaného vzorku. Pro získání obrazu v TEM musí elektron projít skrz vzorek bez interakce s atomy vzorku. S rostoucí tloušťkou počet elektronů ubývá a slábne signál výsledného obrazu.



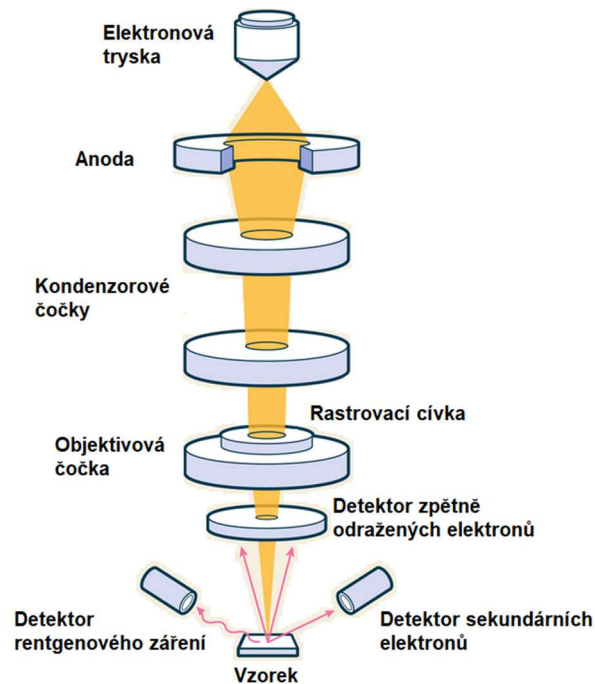
Obrázek 1: Schématické zobrazení transmisního elektronového mikroskopu.  
Převzato z [3]

### 1.3.1 Konstrukce

Základní konstrukce TEM je zobrazena na obrázku 1. Od zdroje elektronů prochází primární elektronový svazek do soustavy kondenzorových čoček. Kondenzorové čočky fokusují svazek na požadovanou velikost stopy. Vzorek je prozářen a průchozí svazek je pomocí objektivu a projektivu, zvětšen na požadovanou velikost. Svazek následně dopadá na fluorescenční stínítko, kde jsou elektrony převedeny na viditelné světlo a vzniká zvětšený obraz vzorku. Obraz ze stínítka je poté snímán kamerou a obraz je dále zpracován. V ose elektronového svazku mohou být umístěny další prvky elektronové optiky jako například clony a korektory. Clony slouží k ořezání svazku na požadovanou velikost a tím pádem přispívají k potlačení vad čoček. Korektory jsou prvky elektronové optiky, které korigují elektronový svazek a také napomáhají k minimalizaci vad.

## 1.4 Rastrovací elektronový mikroskop

U rastrovacího elektronového mikroskopu (SEM) se primární svazek zaostří do co nejmenší stopy, která se vychyluje pomocí deflektoru. Postupně se skenuje povrch vzorku a z jednotlivých bodů následně skládáme výsledný obraz. Při interakci se vzorkem vznikají, mimo jiné, sekundární a zpětně odražené elektrony, které následně můžeme pomocí detektorů detekovat. Kontrast výsledného obrazu je vytvářen díky rozdílné intenzitě signálu z jednotlivých bodů na vzorku. Při dopadu elektronů na vzorek vzniká vedle sekundárních a zpětně odražených elektronů také například rentgenové záření, které se v SEM mikroskopech dá využít pro analýzu látkového složení vzorku.



Obrázek 2: Schématické zobrazení rastrovacího elektronového mikroskopu. Převzato z [3]

### 1.4.1 Konstrukce

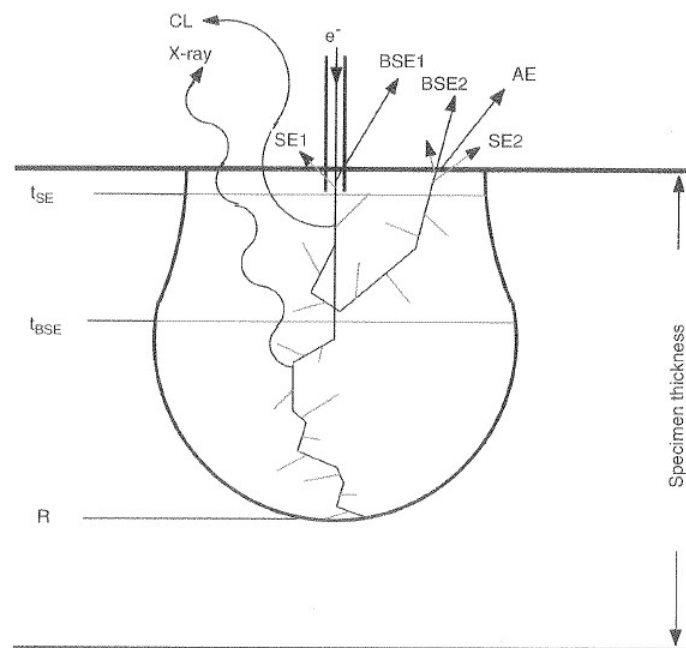
Základní sestava SEM je zobrazena na obrázku 2. Část pro vedení primárního svazku je velice podobná TEM, ale obsahuje navíc deflektor neboli rastrovací cívku, která zajišťuje vychylování svazku na požadovaná místa a objektiv, který zajišťuje zaostření svazku na co nejmenší průměr. Po dopadu na vzorek neprochází elektronový svazek dál, ale odráží se zpět na detektor. Detekční systémy jsou tedy obvykle umístěny nad vzorkem.

Rastrovací mikroskop poskytuje lepší informaci o povrchu a podpovrchové části vzorku. U TEM mikroskopů, kde detekujeme procházející svazek, získáme pouze informaci o vnitřní struktuře vzorku. Jelikož u SEM elektrony neprochází skrz vzorek, ale po interakci primárního svazku se emitují elektrony z povrchové a podpovrchové části vzorku, můžeme pomocí SEM mikroskopů zkoumat i topografii.



## 2 INTERAKCE ELEKTRONŮ SE VZORKEM

U TEM mikroskopu projde elektronový svazek skrz vzorek, aniž by došlo k interakci. K tomu je nutné dodržet podmínku, aby tloušťka vzorku byla menší, než je penetrační hloubka elektronu. Pokud je vzorek silnější, elektrony nemohou procházet skrz a interaguje uvnitř vzorku. Oblast, ve které dochází k interakcím, se nazývá excitační či interakční objem. Excitační objem je závislý na urychlovacím napětí a protonovém čísle atomů vzorku. V důsledku interakcí mohou vznikat různé druhy elektronů a záření, které jsou vyzářeny zpět nad vzorek, a jsme schopni je následně detekovat.

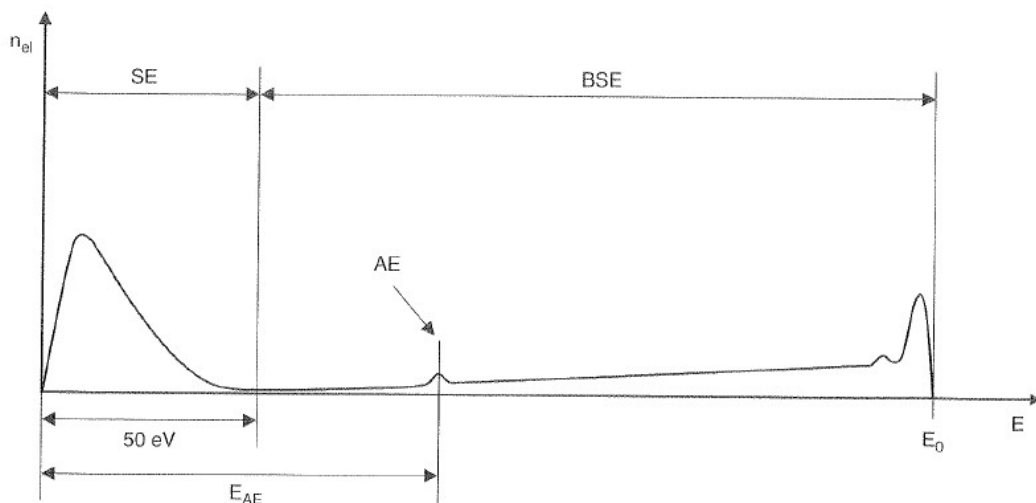


Obrázek 3: Schématické zobrazení interakce primárního svazku se vzorkem. [4]

U interakcí urychleného elektronu s atomy vzorku rozlišujeme dva děje, pružné a nepružné srážky. Pružná srážka nastává, když se elektron primárního svazku dostane do elektrostatického pole jádra atomu vzorku. Elektron při pružné srážce neztrácí téměř žádnou energii a vznikají tzv. zpětně odražené elektrony. Pravděpodobnost pružné srážky závisí na protonovém čísle atomu vzorku a na velikosti energie primárního svazku. [5] Nepružná srážka nastává při srážce urychleného elektronu s jádrem nebo elektronovým obalem atomu vzorku. Při srážce elektron primárního svazku ztratí část kinetické energie, kterou předá elektronu atomu vzorku. Elektron, který získá energii, je následně excitován nebo ionizován. Při zpětném sestupu elektronu na nižší energetickou hladinu se uvolní část energie. Tato energie může být uvolněna ve formě fotonu nebo je předána jinému elektronu v elektronovém obalu, který se může uvolnit a emitovat pryč.

## 2.1 Sekundární elektrony

Sekundární elektrony (SE) vznikají při nepružných srážkách elektronu se vzorkem. Elektrony primárního svazku při nárazu předají určité množství své energie valenčním elektronům atomům vzorku. Pokud je velikost předané energie větší, než je výstupní práce valenčního elektronu, elektron se odpoutá a je emitován z atomu vzorku. Emisi sekundárního elektronu může vyvolat srážka s elektronem primárního svazku a zároveň i srážka se zpětně odraženým elektronem, vracejícím se na povrch vzorku. Kinetická energie sekundárních elektronů se pohybuje v hodnotách do 50 eV, jak je zobrazeno na obrázku 4. Kvůli malé kinetické energii těchto elektronů mohou vzorek opustit pouze elektrony generované v hloubce maximálně 5 nm pro kovy a 50 nm pro izolanty. [6]



Obrázek 4: Schématické rozložení energie emitovaných elektronů ze vzorku. [4]

Sekundární elektrony proto poskytují dobré informace o topografii vzorku. Na obrázku 5a) je zobrazen obraz z elektronového mikroskopu získaný pomocí detekce sekundárních elektronů. Je zřetelný kontrast topografie vzorku, ale obraz nenes žádnou informaci o materiálu. Obrazy získané pomocí sekundárních elektronů se používají hlavně pro zkoumání povrchu vzorku. Pro získání informací o materiálovém složení vzorku musíme detekovat elektrony s větší energií, které se mohou emitovat z větší hloubky vzorku, například zpětně odražené elektrony.

## 2.2 Zpětně odražené elektrony

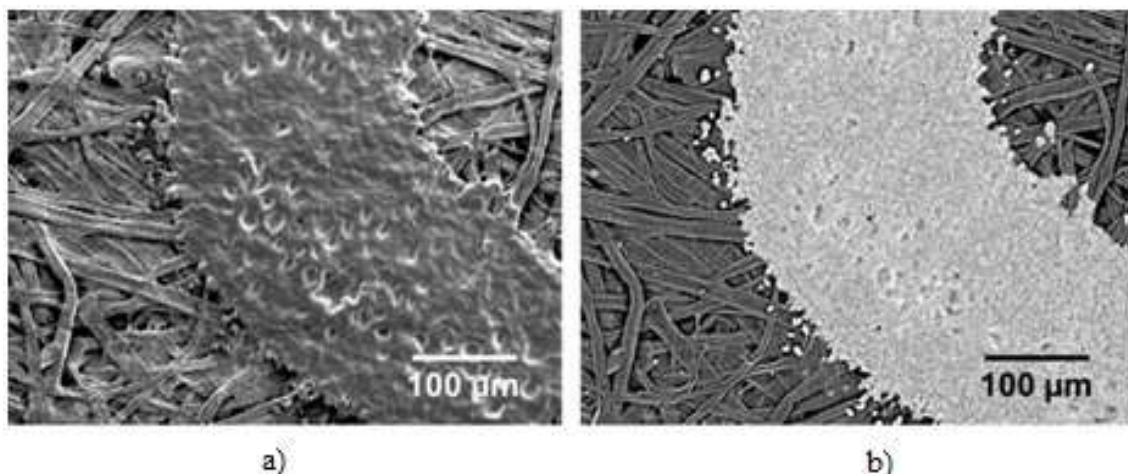
Zpětně odražené elektrony (BSE) vznikají při pružných i nepružných srážkách elektronů s atomy vzorku. Při dopadu elektronu primárního svazku může dojít k jedné, nebo více srážkám, než dojde k odrazu elektronu zpět nad vzorek. V závislosti na typu a počtu srážek elektronu se liší i výsledná kinetická energie BSE elektronů, která je v rozmezí  $50 \text{ eV} < E_{BSE} \leq E_0$ , jak je zobrazeno na obrázku 4. Většina BSE má však energii jen o něco menší, než je energie primárního svazku  $E_0$ . [4]

Schopnost pružných srážek elektronů vyjadřuje koeficient zpětně odražených elektronů  $\eta$ , který je definován jako

$$\eta = \frac{n_{BSE}}{n_B} = \frac{i_{BSE}}{i_B}$$

Kde  $n_B$  je počet elektronů svazku interagujících se vzorkem,  $n_{BSE}$  počet zpětně odražených elektronů. Zároveň může být koeficient vyjádřen jako podíl proudu svazku primárních elektronů  $i_B$  a proudu zpětně odražených elektronů uvolněných ze vzorku  $i_{BSE}$ . [5]

Na rozdíl od sekundárních elektronů se zpětně odražené elektrony generují ve větším interakčním objemu vzorku a také ve větší hloubce. Interakční objem, ze kterého se mohou BSE generovat, roste s energií primárního svazku a zároveň klesá se vzrůstajícím protonovým číslem atomů vzorku. [4] Z materiálů s větším protonovým číslem budeme tedy získávat více zpětně odražených elektronů a výsledný obraz bude v tomto bodě světlejší. Díky rozdílnému kontrastu u různých chemických prvků jsme schopni pozorovat materiálový kontrast na vzorku jako je zobrazeno na obrázku 5b). Je patrný kontrast mezi jednotlivými materiály vzorku, ale nelze dobře pozorovat topografii, jako v případě obrazu získaného pomocí sekundárních elektronů (5a)).



Obrázek 5: Porovnání obrazu elektronového mikroskopu získaného pomocí detekce a) sekundárních elektronů b) zpětně odražených elektronů [7]

## 2.3 Rentgenové záření

Rentgenové záření se nachází v rozsahu vlnových délek 10 nm až 1 pm. Toto záření se dělí na dva typy, spojité rentgenové záření a charakteristické rentgenové záření. Spojité (brzdné) rentgenové záření vzniká při dopadu elektronu na vzorek. Elektron je brzděn atomem vzorku a kinetická energie, kterou elektron ztratil, je vyzářena ve formě fotonu rentgenového záření. Energie fotonu závisí na energii urychleného elektronu a na vzdálenosti průletu od jádra atomu. Brzdné záření se vyznačuje spojitým spektrem. Charakteristické rentgenové záření vzniká při neelastických srážkách elektronu s atomem a závisí na materiálu vzorku. Urychlený elektron excituje nebo zcela ionizuje elektron z vnitřní slupky elektronového obalu atomu vzorku. Excitovaný elektron se následně vrací zpět na svoji pozici. Ionizovaný elektron je nahrazen elektronem z vyšší energetické hladiny. Při sestupu elektronu na nižší hladinu je vyzářena energie ve formě fotonu rentgenového záření. Charakteristické záření vytváří čárové spektrum, které je superponováno na spektru spojitého rentgenového záření.

Energie fotonu odpovídá energii mezi energetickými hladinami daného prvku. Rozdíly hladin jsou závislé na protonovém čísle. Čím větší je protonové číslo atomů vzorku, tím větší je energie vyzářeného fotonu. Jelikož energetické hladiny každého prvku mají určitou a neměnnou hodnotu, je možné charakteristické rentgenové záření využít pro analýzu chemického složení vzorku.

Charakteristické rentgenové záření může být použito v tzv. rentgenové spektrální mikroanalýze. Pomocí této nedestruktivní metody, jsme schopni určit chemické složení zkoumaného vzorku. Pro rentgenovou spektrální mikroanalýzu je možné využít dvě metody. Vlnově disperzní spektroskopii (WDS) a energiově disperzní spektroskopii (EDS). U WDS se k detekci charakteristického rentgenového záření využívá odraz lomu v závislosti na vlnové délce. Pro detekci rentgenového záření u EDS se využívají dva nejnámější typy detektorů. Si(Li<sup>+</sup>) detektor a křemíkový driftový detektor (SDD). SDD detektory jsou dnes oblíbenější díky svým vlastnostem. Skládají se z části ochuzené oblasti náboje, ve které se generují při dopadu ionizujícího záření páry elektron-díra. Generované elektrony jsou následně silným elektrickým polem přitahovány ke sběrné anodě. Elektrické pole je vytvořeno řadou prstenců s rostoucím závěrným napětím, čímž vzniká gradient elektrického pole, který žene elektrony do místa s nejnižší potenciálovou energií. Na anodě je následně díky FET předzesilovači převeden náboj na napětí, ze kterého následně vytvoříme spektrum. Takto vytvořené spektrum je možné pomocí počítače vyhodnotit a určit chemické složení vzorku. [8]

## 2.4 Katodoluminiscence

Katodoluminiscence je jev, který nastává při nepružné srážce elektronu s materiálem, při kterém mohou být vyzářeny fotony viditelného světla. Ke katodoluminiscenci může docházet v materiálech, které mají plně zaplněný valenční a vodivostní pás oddělený bariérou, tedy v izolantech a polovodičích. [4]

Při nepružné srážce může dojít k excitování elektronu z valenčního pásu do vodivostního pásu. Excitovaný elektron má tendenci se vrátit zpět na nižší energetickou hladinu do valenčního pásu. Elektron však může být zachycen v pasti, například v defektu krystalické struktury, nebo příměsi materiálu. Ve chvíli, kdy se elektron uvolní z pasti, je vyzářeno množství energie ve formě fotonu. Většina fotonů vyzařuje s vlnovou délkou viditelného světla, ovšem část je vyzářena ve formě ultrafialového nebo infračerveného záření. [9]

Tohoto jevu je možné využít v tzv. katodoluminiscenční spektroskopii, pro zkoumání defektů a nečistot v materiálech. Tuto techniku lze využít pro zkoumání defektů v integrovaných obvodech, nebo v geologii pro zkoumání růstů krystalových mřížek, deformačních mechanismů v horninách, vnitřní struktury fosilií, cementace a diagenese u sedimentárních hornin. [9]

## 2.5 Augerovy elektrony

K vyzáření Augerova elektronu, dochází podobným způsobem jako při charakteristickém rentgenovém záření. Letící elektron excituje elektron z vnitřní slupky elektronového obalu atomu. Excitovaný elektron se následně přesune zpět na své původní místo a uvolněnou energii předá elektronu ve valenční vrstvě. Pokud je energie dostatečná, elektron valenční vrstvy se uvolní z elektronového obalu. Takto vyzářený elektron je označován jako Augerův elektron. Energie Augerových elektronů je dána vztahem

$$E_{AE} = \Delta E_{ch} - E_{ionr}$$

Kde  $\Delta E_{ch}$  je rozdíl energií mezi elektronovými slupkami a  $E_{ionr}$  zahrnuje ionizační energii Augerova elektronu a zároveň relaxační efekt. [4]

Augerových elektronů je možné využít k Augerové elektronové spektroskopii. Jelikož se tyto elektrony generují v maximální hloubce do 5 nm, lze pomocí této techniky analyzovat povrchy materiálů. Využívá se pro charakterizaci materiálů a k analýze defektů a tenkých filmů. [10]

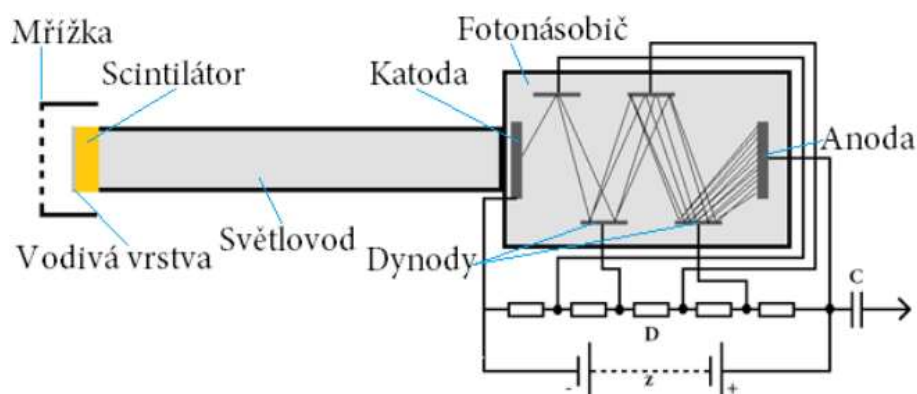
### 3 DETEKTORY

V transmisním elektronovém mikroskopu se pro detekci používá fluorescenční stínítko, které převádí elektrony na viditelné světlo, které následně snímáme kamerou. V rastrovacích mikroskopech se detektory liší podle typu elektronů a záření, které mají být detekovány. Musí být uzpůsobeny pro každý typ elektronů či záření, aby byla detekce co nejučinnější. Nejčastěji se detekují sekundární elektrony a zpětně odražené elektrony, z kterých můžeme vytvořit obraz vzorku.

Z hlediska životnosti nemá na detektory, díky vakuu uvnitř komory, vliv vlhkost ani reaktivní plyny, které by mohly způsobovat degradaci. Vliv těchto faktorů je možné zcela zanedbat. Velký vliv na degradaci většiny detektorů má ovšem kontaminace uhlíku uvnitř komory. Kontaminace vzniká rozkladem organických materiálů v důsledku ozařování elektronovým svazkem. Množství organických materiálů a následná kontaminace jsou závislé na úrovni vakua v komoře a nečistotách na vzorku. Při provozu roste na povrchu detektoru vrstva uhlíku, což může způsobit ztráty v detekci elektronů a snižovat hodnotu detekovaného signálu.

#### 3.1 Everhart-Thornley detektor

Everhart-Thornley (E-T) detektor se používá hlavně pro detekci sekundárních elektronů, je ho však možné použít i pro detekci zpětně odražených elektronů. Jelikož sekundární elektrony mají malou energii a krátkou trajektorii, je detektor umístěn v blízkosti vzorku. Schématické zobrazení E-T detektoru je na obrázku 6. Na vstupu E-T detektoru je mřížka s kladným potenciálem, která naláká elektrony s malou energií dovnitř detektoru. Elektrony jsou následně přivedeny na scintilátor s napařenou vrstvou vodivého materiálu. Vodivá vrstva je na vysokém potenciálu kolem 10 kV, který urychlí elektrony a na scintilátoru přemění elektrony na fotony. Fotony jsou následně vedeny světlovody do fotonásobiče, kde jsou opět převedeny na elektrický signál. Výsledný signál se následně ještě může upravovat zesilovači. [11]



Obrázek 6: Schématické zobrazení E-T detektoru. [12]

Pokud je na mřížku přivedeno malé záporné napětí, sekundární elektrony nemohou vstoupit a detektor funguje jako detektor zpětně odražených elektronů. Detekce BSE elektronů není u tohoto typu detektoru příliš účinná, neboť detekuje pouze elektrony se správným odrazovým úhlem, které směřují přímo na detektor. Lepší detekce BSE se dá dosáhnout zvětšením scintilátoru.

Pro ideální fungování detektoru a co nejmenší šum musí každý elektron, který dopadá na scintilátor opět vybudit aspoň jeden elektron ve fotonásobiči. Počet elektronů, vybuzených ve fotonásobiči z jednoho sekundárního elektronu vstupujícího do detektoru se rovná

$$n = \{(E_s - E_a)C_p C_0 C_e f(v_p)\} / E_p$$

kde  $E_s$  je energie elektronu dopadajícího na scintilátor,  $E_a$  energie ztracená při průchodu přes napařenou vodivou vrstvu,  $C_p$  účinnost přeměny energie na fotony o průměrné energii  $E_p$ ,  $C_0$  účinnost optického systému,  $C_e$  přeměnná účinnost fotokatody a  $f(v_p)$  spektrální odezva fotokatody na foton o energii  $E_p$ . [11]

### 3.2 Microchannel-plate detektor

Microchannel-plate detektor se používá pro detekci sekundárních i zpětně odražených elektronů. Microchannel-plate je tvořen polem mikro kanálků, nejčastěji z olovnatého skla, uspořádaných rovnoběžně vůči sobě. Požadovaný průměr jednotlivých kanálků je 10  $\mu\text{m}$  až 20  $\mu\text{m}$ . Uvnitř jednotlivých kanálků je vytvořena vrstva polovodičového materiálu s vysokým koeficientem emise sekundárních elektronů. Na zadní straně detektoru je vytvořena kovová vrstva, která je na vysokém potenciálu 1000 V. Díky tomu můžeme navádět elektrony na kolektorovou elektrodu. Pokud poté vletí elektron o dostatečné energii do kanálku, na povrchu vygeneruje velké množství dalších sekundárních elektronů a celý proces se lavinově opakuje. Emitované elektrony poté dopadají na elektrodu a vytvoří požadovaný detekovaný signál. Signál musí být izolovaný od vysokého napětí kolektoru a musí být zesílen, než může být zpracováván. [13]

Tento typ detektorů je využíván hlavně pro detekci sekundárních elektronů, pro své výhody oproti E-T detektoru. Využití nachází především v nízkonapěťových urychlovacích aplikacích při nedestruktivní inspekci a při inspekci nepokovených vzorků, kde je nízké urychlovací napětí potřeba, aby se omezilo nabíjení vzorku. Při nízkém urychlovacím napětí má E-T detektor malý poměr signálu vůči šumu. Zároveň E-T detektor trpí nesymetrickým umístěním detektoru vůči vzorku a nerovnoměrnou detekcí sekundárních elektronů. Jednou z nevýhod microchannel-plate detektoru je kontaminace

povrchu kanálků vlivem špatného vakua. Na povrchu se může vytvořit uhlíková vrstva, která poté snižuje citlivost detektoru. [13]

### 3.3 Scintilační BSE detektor

Účinnost detekce zpětně odražených elektronů u E-T detektoru je velice malá, kvůli nevyhovujícímu umístění detektoru v komoře. U nízkoenergiových sekundárních elektronů je možné dosáhnout vysoké účinnosti upravením trajektorie a nalákáním elektronů do detektoru. U BSE elektronů se trajektorie upravovat příliš nedá. Pro detekci BSE elektronů je tedy nutné umístit detektor do dráhy letu těchto elektronů. Zpětně odražené elektrony se vyzařují přímo nad vzorek a je tedy nutné umístit detektor těsně nad vzorek, nejčastěji přímo na horní pólový nástavec čočky. Tím dosáhneme nejlepší detekce BSE elektronů. Zároveň se používají detektory prstencového typu, které zajistí průchod primárního svazku, ale zároveň nejlepší detekci elektronů.

Scintilační BSE detektor funguje na podobném principu jako E-T detektor, tedy na použití scintilačního materiálu, který přemění dopadající elektrony na fotony viditelného světla. Mezi nepoužívanější scintilační materiály patří krystaly YAG (Yttrium-Aluminium Granát), případně YAP (Yttrium-Aluminium Perovskite). [14] Na scintilátoru je napařená slabá vrstva hliníku, která slouží k odvádění náboje. Zároveň slouží k odrazu světla, které je z detektoru dále vedeno světlovodem na fotonásobič. Ve fotonásobiči je světlo opět převedeno na elektrický signál, který můžeme dále upravovat. [15]

Na rozdíl od jiných typů detektorů nezávisí u scintilačního detektoru šířka pásma, šum a kapacita na vzdálenosti detektoru od vzorku. S klesající vzdáleností od vzorku zároveň roste detekovatelný prostorový úhel BSE a s ním i výsledný signál. Nevýhodou těchto detektorů může být větší požadavek na prostor uvnitř komory mikroskopu. Samotný scintilační krystal může mít tloušťku v jednotkách milimetrů, ale světlovod a fotonásobič potřebují více prostoru. Zároveň nelze scintilační detektor rozdělit na více segmentů. Kvůli tomu nejsme schopni počítat a odečítat signály generované v různých místech detektoru, jako je to možné u polovodičového BSE detektoru. Nelze tedy získat topografický kontrast. [15]

### 3.4 Polovodičový detektor

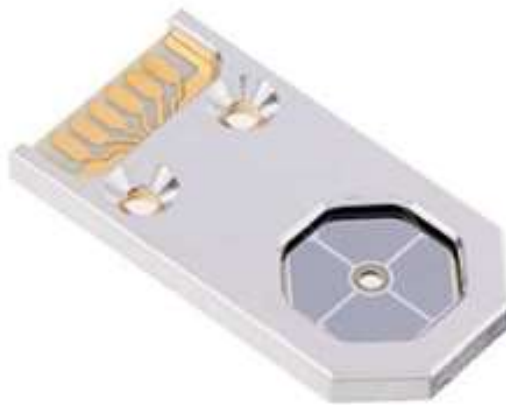
Polovodičový detektor (obrázek 7) se využívá především pro detekci BSE elektronů. Jedná se o fotodiodu určenou pro detekci elektronů a hlavní výhodou je velmi tenký tvar díky kterému může být umístěn přímo nad vzorek, tzv. in-beam. Jelikož je detektor umístěn přímo nad vzorkem dosahuje velkého prostorového úhlu detekce elektronů. Polovodičový detektor může být konstruován jako klasická polovodičová dioda s PN přechodem nebo jako Schottkyho dioda.



Princip detektoru je založen na generaci páru elektron-díra při dopadu zpětně odraženého elektronu do depletiční vrstvy detektoru. Odražený elektron dopadne na detektor a předá svoji energii. Pokud předaná energie je větší než excitační energie elektronu valenčního pásu, elektron se uvolní a přejde do pásu vodivostního. Na jeho původním místě vznikne díra. Tento pár je před svou rekombinací separován a vytváří elektrický proud. Počet párů elektron-díra je dán vztahem

$$n_m = \frac{E_{BSE}}{E_{exm}}$$

kde  $E_{BSE}$  je energie dopadajících odražených elektronů a  $E_{exm}$  je střední excitační energie. [4]



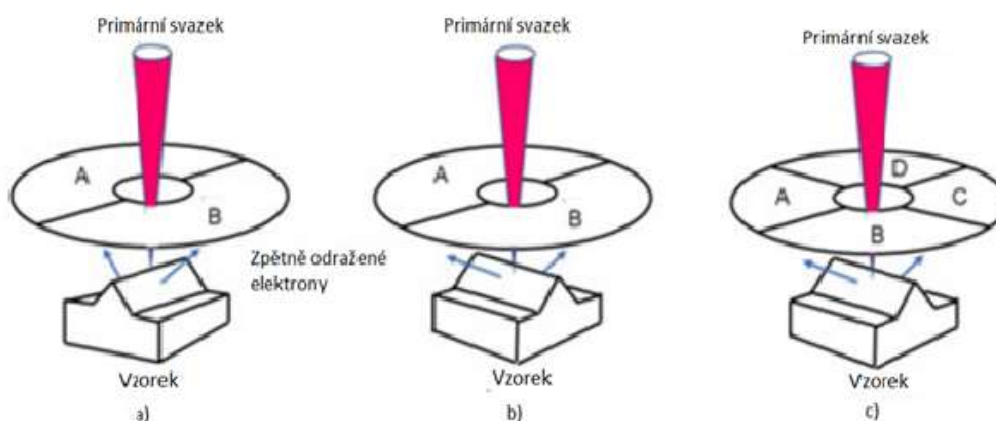
Obrázek 7: Polovodičový detektor STD-BSD-40-4-1-10 firmy PN detector [16]

Energie potřebná na vytvoření páru elektron-díra se liší podle materiálu. U křemíku, jako nejpoužívanějšího materiálu, se tato energie rovná 3,6 eV. Průměrná energie zpětně odraženého elektronu se pohybuje v řádech keV a počet vygenerovaných párů díra-elektron může být až několik tisíc. Polovodičové detektory tedy dosahují vysokého zisku. Účinnost kolekce BSE elektronů závisí na více parametrech. Důležitým parametrem je šířka depletiční vrstvy v polovodiči. Pro dosažení lepší kolekce elektronů musí být depletiční vrstva co nejširší a zároveň co nejvíce u povrchu, aby pokryla co největší penetrační hloubku elektronu. Šířku depletiční vrstvy lze zvětšit pomocí záporného předpětí na detektoru. Dalším důležitým parametrem je také tloušťka pasivační vrstvy. [17]

S rostoucí velikostí depletiční vrstvy roste i kapacita, která snižuje šířku pásma detektoru a tím se zvětšuje časová odezva. Při vyšších skenovacích rychlostech tak detektor nemusí stíhat reagovat na velké a rychlé změny a obraz může být rozmazaný. Pro vylepšení obrazu je nutné použít pomalejší skenovací rychlost, čímž docílíme

menšího šumu obrazu a dosáhneme lepšího rozlišení. [5] Pokud je časová odezva polovodičového detektoru příliš dlouhá a nelze použít vysoké skenovací rychlosti, je možné v elektronovém mikroskopu použít v prvním kroku rychlejší E-T detektor pro orientaci na vzorku a následně přepnout na pomalejší polovodičový BSE detektor.

Polovodičový detektor se používá zejména pro detekci zpětně odražených elektronů, které vznikají v hloubce objemu vzorku a jejich energie závisí na atomovém čísle. Díky tomu jsme schopni polovodičovým detektorem získat dobrý materiálový kontrast. Pomocí tohoto typu detektoru můžeme dosáhnout také topografického kontrastu použitím dvou jednotlivých segmentů detektoru (A, B) umístěných naproti sobě, jak je naznačeno na obrázku 8. Elektrony se od nerovností na povrchu vzorku mohou odrážet do různých směrů a při dopadu na segmenty získáme odlišné signály. Při odečtení signálu (A-B) z těchto dvou segmentů se odečte signál z nitra vzorku a zůstane pouze signál z povrchu. Tím vytvoříme topografický obraz vzorku. Použitím dvou detekčních ploch jsme schopni pozorovat nerovnosti na vzorku v rovnoběžném směru se segmenty. Pokud je nerovnost na vzorku v paralelním směru s jednotlivými segmenty, topografický obraz se nezobrazí. Vytvořením lepšího obrazu je možné dosáhnout použitím čtyř segmentů (A, B, C, D), kdy se sčítají vždy rozdíly protějších signálů (A-C) + (B-D). [18]



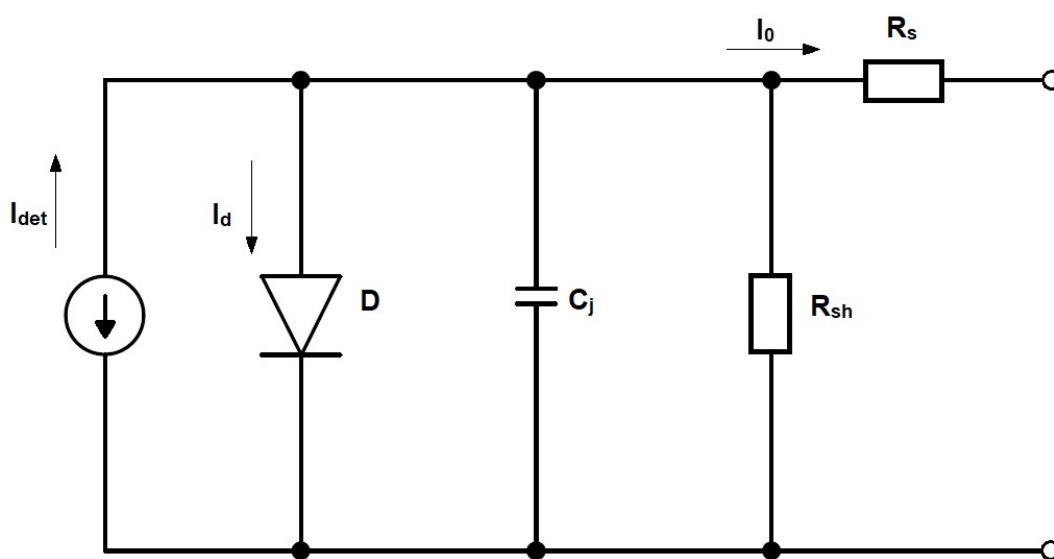
Obrázek 8: Vliv polohy detektoru ke vzorku při zkoumání topografického kontrastu u dvou segmentového detektoru a) rovnoběžně se vzorkem, b) kolmo ke vzorku, c) čtyř segmentový detektor. Převzato z [19]

Během provozu je detektor vystaven ozařování elektrony a rentgenovým zářením. Při ozařování může docházet k defektům v polovodičovém materiálu nebo na rozhraní polovodiče s oxidem, které mohou degradovat vlastnosti detektoru. Velký vliv na životnost má také kontaminace uhlíku. Vrstva uhlíku na povrchu může snižovat účinnost detekce a tím zhoršovat kvalitu výsledného obrazu.

## 4 CHARAKTERIZACE BSE DETEKTORU

### 4.1 Elektrické parametry

Polovodičový BSE detektor je ve své podstatě fotodioda a má tedy i stejné elektrické vlastnosti. Na obrázku 9 je zobrazeno náhradní schéma polovodičového detektoru, kde  $D$  je ideální dioda,  $C_j$  je bariérová kapacita,  $R_{sh}$  svodový odpor a  $R_s$  je sériový odpor.  $I_{det}$  ve schématu reprezentuje proud vyvolaný detekcí urychlených elektronů a  $I_d$  je proud za temna, protékající diodou při nulovém napětí.



Obrázek 9: Náhradní schéma fotodiody

#### 4.1.1 Bariérová kapacita

Hranice depleční vrstvy fungují jako elektrody deskového kondenzátoru. Hodnota kapacity je závislá na velikosti plochy p-n přechodu. Zároveň je nepřímo úměrná tloušťce ochuzené oblasti přechodu. Jelikož tloušťku ochuzené oblasti lze zvětšovat přivedením závěrného napětí, můžeme měnit i výslednou bariérovou kapacitu detektoru. Velikost této kapacity má vliv na šířku pásma detektoru a na rychlost přechodu. Bariérovou kapacitu lze vyjádřit vztahem

$$C_j = \frac{\epsilon_r \epsilon_{Si} S}{W_D}$$

kde  $\epsilon_r$  je relativní permitivita,  $\epsilon_{Si}$  permitivita křemíku,  $S$  plocha p-n přechodu a  $W_D$  je tloušťka ochuzené oblasti náboje. [20]

#### 4.1.2 Svodový odpor

Svodový odpor je způsoben poruchami a nečistotami v polovodiči. Vlivem těchto poruch může docházet k rekombinaci a je ovlivněn výstupní proud. V ideálním případě by tento svodový odpor měl být nekonečný, aby veškeré páry díra-elektron byly odvedeny na výstup detektoru a nedošlo k nechtěné rekombinaci. Pro nejlepší funkci detektoru je tedy potřeba co největší svodový odpor. Typické hodnoty tohoto odporu se pohybují v řádech desítek až stovek megaohmů.

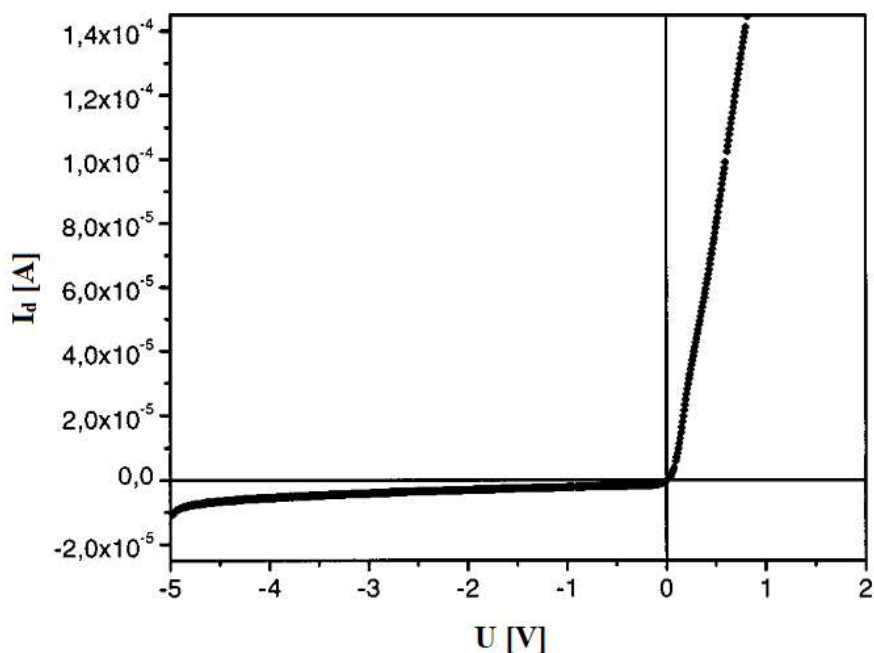
Svodový odpor lze získat přivedením malého napětí v řádu milivoltů a změřením proudu. Následně jsme schopni z naměřených dat dopočítat hodnotu svodového odporu. [20]

#### 4.1.3 Sériový odpor

Sériový odpor se skládá z parazitního odporu kontaktu na povrchu polovodiče a odporu polovodičového materiálu. V ideálním polovodiči by byl sériový odpor nulový, nicméně v reálných součástkách se hodnota sériového odporu pohybuje v desítkách až tisících ohmů. [20]

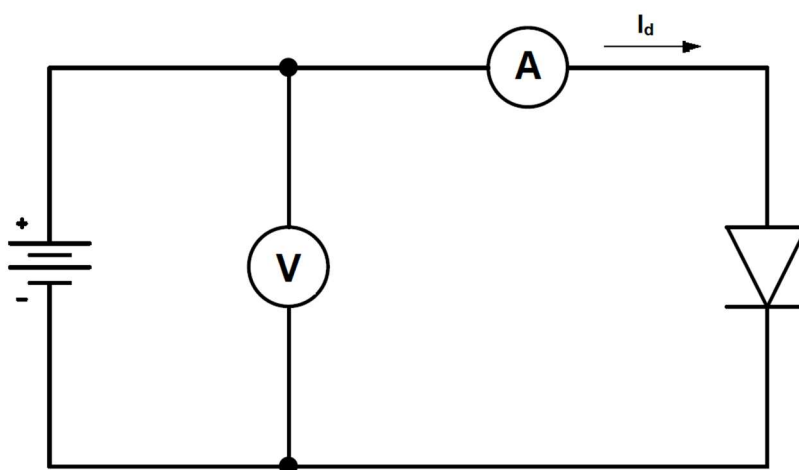
## 4.2 Voltampérová charakteristika

Voltampérová charakteristika je závislost mezi elektrickým proudem a přiloženým napětím na elektrickém prvku. Jedná se o jednu z nejpoužívanějších charakteristik, která popisuje funkci dané součástky. Na obrázku 10 je zobrazena typická voltampérová charakteristika polovodičového BSE detektoru bez osvětlení. Jedná se o voltampérovou charakteristiku měřenou při nulovém osvětlení součástky, kdy na povrch nedopadají žádné fotony ani elektrony. Proud měřený v této voltampérové charakteristice se označuje jako dark current neboli proud za temna. Temný proud je přítomný vždy i při nulovém napětí, kvůli náhodné generaci párů díra-elektron v ochuzené oblasti p-n přechodu. V závěrném směru je možné při zvětšujícím se napětí pozorovat rostoucí proud. Při kladném napětí přivedeném na detektor začne tento proud razantně růst. Jelikož detektory většinou fungují při nulovém napětí, zajímá nás hodnota tohoto proudu při nulovém napětí na detektoru. Typicky se pohybuje v řádu desítek pikoampérů, je tedy asi tisíckrát menší než detekovaný proud a jeho vliv na detekovaný proud lze zanedbat. Nicméně mikroskopy pracující s nízkým urychlovacím napětím generují proud srovnatelný s hodnotami proudu za temna a v těchto případech může ovlivňovat výsledný detekovaný proud. [21]



Obrázek 10: Voltampérová charakteristika BSE detektoru bez osvětlení [převzato z 22]

Schéma zapojení pro měření voltampérové charakteristiky je zobrazeno na obrázku 11. Při měření je důležité zajistit temné prostředí, aby na detektor nedopadaly žádné fotony, které by měření mohly ovlivnit. Na detektor je pomocí napěťového zdroje přivedeno požadované napětí. Pomocí ampérmetru je následně odečtena hodnota proudu za temna. Měření se opakuje pro požadovaný rozsah napětí. Z naměřených hodnot proudu pro každé napětí je možné následně vytvořit voltampérovou charakteristiku.



Obrázek 11: Schéma měření voltampérové charakteristiky

Typické hodnoty měřeného proudu se mohou pohybovat od jednotek pikoampérů až po stovky miliampérů, je tedy nutné použít ampérmetr, který je schopen měřit v tomto rozsahu hodnot proudu.

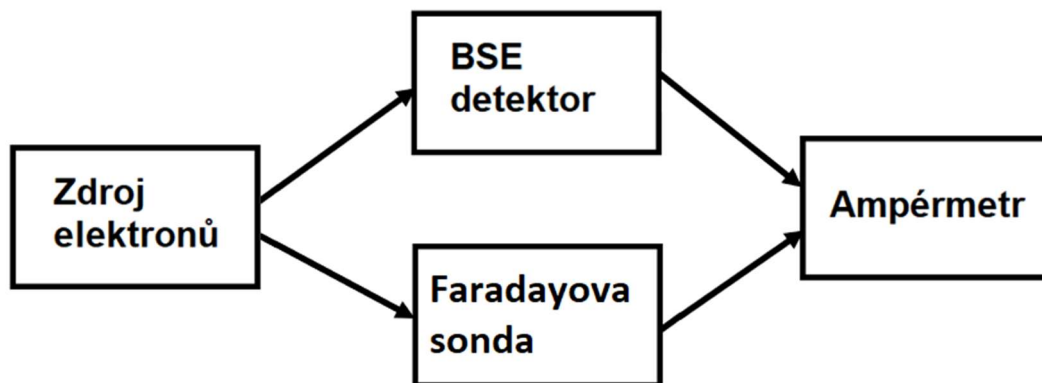
### 4.3 Zisk detektoru

Zisk se dá definovat jako poměr detekovaných elektronů k elektronům primárního svazku. Vztah pro výpočet zisku detektoru je uveden ve vzorci

$$Zisk = \frac{\text{detekované elektrony}}{\text{elektrony prim. svazku}} = \frac{I_{det} - I_{dark}}{I_{beam}} \approx \frac{I_{det}}{I_{beam}}$$

kde  $I_{det}$  je detekovaný proud,  $I_{beam}$  proud primárního svazku,  $I_{dark}$  proud za temna. Ve vzorci vidíme, že do detekovaného proudu vstupuje i proud za temna, nicméně jak bylo již zmíněno, tento proud dosahuje řádově menších hodnot a ve většině případů je možné ho zanedbat bez vlivu na výsledek. Zisk detektoru je závislý na energii elektronového svazku, neboť proud vznikající v detektoru roste se zvětšující se energií svazku, a tím roste i hodnota efektivního zisku detektoru. [21]

Pro měření zisku jde použít přímo elektronový mikroskop. Blokové schéma zapojení je zobrazeno na obrázku 12. Detektor je umístěn na pozici vzorku a je ozařován elektronovým svazkem. Hodnotu proudu elektronového svazku změříme například pomocí Faradayovy sondy a detekovaný proud detektoru změříme přímo na ozařovaném detektoru pomocí ampérmetru. Jak bylo zmíněno, zisk roste se zvětšující se energií primárního svazku. Pro vytvoření závislosti efektivního zisku detektoru v na energii primárního svazku se měření provádí v požadovaném rozsahu urychlovacího napětí.



Obrázek 12: Blokové schéma zapojení pro měření zisku

Jak bylo popsáno dříve, na vytvoření jednoho páru elektron-díra je potřeba energie zhruba 3,6 eV. Energie BSE elektronů se může pohybovat až v desítkách keV a díky tomu může jeden detekovaný elektron vygenerovat velké množství párů elektron-díra v detektoru. Vlivem nedokonalé detekce a ztrát v polovodičovém materiálu není veškerá energie BSE elektronů přeměněna na páry elektron-díra. I přesto dosahují polovodičové BSE detektory dostatečného zisku již při nízkých urychlovacích napětích.

Na nedokonalé detekci polovodiče se podílí několik různých ztrátových složek. Před tím, než elektron pronikne do depletiční vrstvy, musí projít pasivační vrstvou detektoru, ve které může interagovat a ztratit část své energie. Tyto ztráty mohou být posíleny také vrstvou uhlíku vlivem kontaminace na povrchu detektoru. Dále prochází skrz neochuzenou část polovodiče, kde může vytvářet páry elektron-díra. Tyto páry často rekombinují, než je stihneme rozdělit, a nepodílí se tedy na výstupním proudu detektoru. Při klesající energii dopadajících zpětně odražených elektronů probíhá těchto interakcí více a elektron ztrácí značnou část své energie. To může vést k tomu, že elektron neprojde do ochuzené oblasti a negeneruje požadovaný proud. Detektor tedy funguje jako vysokoenergiový filtr. Pro omezení těchto ztrát je důležité, aby ochuzená oblast byla co nejbližší u povrchu a dosahovala co největší šířky. Tak pokryje velkou část penetrační hloubky elektronu. Šířku ochuzené oblasti lze zvětšit pomocí přivedeného záporného napětí. Dalším důvodem nedokonalé detekce jsou odrazivé ztráty. Stejně jako při generaci zpětně odražených elektronů na vzorku, mohou i zde být elektrony odraženy pryč z detektoru a snižovat tak jeho účinnost. Jedná se o nejvýznamnější ztrátový mechanismus pro energie  $E > 1,5$  keV. Dále se na ztrátách může podílet také vliv rekombinace párů elektron-díra v depletiční vrstvě. Tyto ztráty jsou většinou malé a můžeme je zanedbávat. [23]

## 4.4 Časová odezva

Časová odezva je doba, za kterou stihne zareagovat součástka na vstupní impuls. U polovodičové fotodiody se jedná o čas, za který se po ozáření prvku objeví na výstupu vybuzený proud. U fotodiod rozlišujeme nástupnou a sestupnou hranu, respektive čas náběhu a čas doběhu. Čas náběhu je doba, za kterou fotodioda změní výstupní proud z 10 % na 90 % své finální hodnoty. Obdobně pro čas doběhu pro hodnoty 90 % a 10 %. Časová odezva detektoru je závislá na jeho odporu a kapacitě a zároveň na rychlosti nosičů náboje. Celková doba náběhu se dá vyjádřit jako

$$t_r = \sqrt{t_{RC}^2 + t_{drift}^2 + t_{diff}^2} \approx \sqrt{t_{RC}^2 + t_{diff}^2}$$

kde  $t_{RC}$  je časová konstanta RC obvodu detektoru,  $t_{drift}$  je driftová rychlost nosičů náboje a  $t_{diff}$  je difuzní rychlost. Při nulovém předpětí na detektoru převládá vliv difuzní rychlosti a driftovou rychlost lze zanedbat. [20] Časovou konstantu RC obvodu  $t_{RC}$  můžeme vyjádřit jako

$$t_{RC} = 2,2 RC$$

kde R je součet sériového odporu detektoru a odporu zátěže a C je součet bariérové kapacity a parazitních kapacit detektoru. Jelikož bariérová kapacita je závislá na šířce

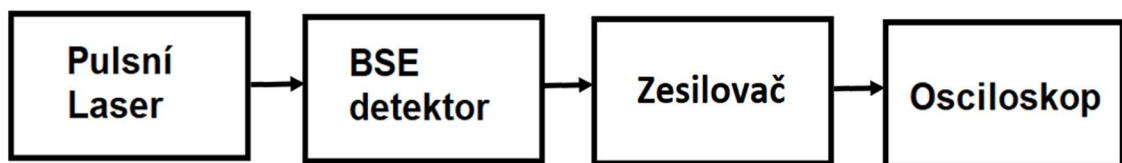
depletiční vrstvy, je možné tuto časovou konstantu měnit přivedením závěrného napětí na detektor. Tím vrostne šířka ochuzené oblasti přechodu, klesne časová konstanta a zmenší se časová odezva detektoru. [20]

Pomocí časové odezvy jsme schopni také vypočítat přibližnou teoretickou hodnotu šířky pásma BW podle vzorce

$$BW = \frac{0,35}{t_r}$$

kde  $t_r$  je čas náběhu. [20]

Měření časové odezvy na detektoru můžeme provést například pomocí pulsního laseru. Na detektor vysíláme jednotlivé pulsy, kterými vybudíme páry elektron-díra a tím se generuje výstupní proud. Pomocí osciloskopu následně můžeme pozorovat průběh a z naměřených průběhů odečíst čas náběhu na nástupní hraně a čas doběhu na hraně sestupné.



Obrázek 13: Blokové schéma měření časové odezvy BSE detektoru

Velikost nástupné a sestupné hrany se typicky může pohybovat u BSE detektorů v řádu desítek nanosekund. Je tedy nutné pro měření použít dostatečně rychlý osciloskop, který je schopný měřit tyto rychlé pulsy. Při osvitu detektoru generujeme proud. Aby bylo možné tento signál změřit, musíme ho převést na napětí, jehož průběh jsme schopni následně pozorovat osciloskopem. Převod proudu na napětí zajišťuje transkonduktance zesilovače, který zároveň signál zesiluje. Zesilovače pro BSE detektor musí dosahovat vysokého zesílení, protože detekovaný signál se může pohybovat v řádu jednotek nanoampérů. Zároveň musí dosahovat velké šířky pásma, aby neovlivňovaly časovou odezvu detektoru.



## 5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

### 5.1 Měření detektory

Měření probíhalo na polovodičovém BSE detektoru vyráběném firmou Delong Instruments (DI). Jedná se o dvou segmentový polovodičový detektor, který je používán v elektronovém mikroskopu LVEM5. Jedná se o vhodný typ pro tento mikroskop vzhledem k jeho tenkému tvaru a dobré účinnosti při nízkých energiích primárního svazku v tomto mikroskopu. Zároveň dosahuje dobré životnosti. Díky nízké energii primárního svazku v elektronovém mikroskopu LVEM5 nebyla pozorována degradace ozařováním elektrony a rentgenovým zářením. Tyto vlivy tedy nemají výrazný vliv na jeho životnost. Větší vliv na degradaci detektoru byla pozorována u kontaminace uhlíkem na povrchu. Díky dobrému vakuu a nízké energii svazku u LVEM5 je kontaminace menší než u vysokoenergiových mikroskopů, avšak není zcela potlačena. Při inspekci detektorů s dlouhou provozní dobou byla pozorována tenká vrstva uhlíku na povrchu. Vrstva však nedosahovala tloušťky, která by výrazně ovlivnila detekci a ovlivňovala kvalitu obrazu.

Dále byly vybrány dva komerčně dostupné detektory pro srovnání naměřených charakteristik. Pro měření byly vybrány detektory SXUVPS1/LP od firmy Opto Diode a BSD-40-4-1-10 od firmy PNdetector. Některé vybrané vlastnosti jsou uvedeny v tabulce 2.

Tabulka 2: Vybrané vlastnosti komerčně dostupných detektorů [16, 24]

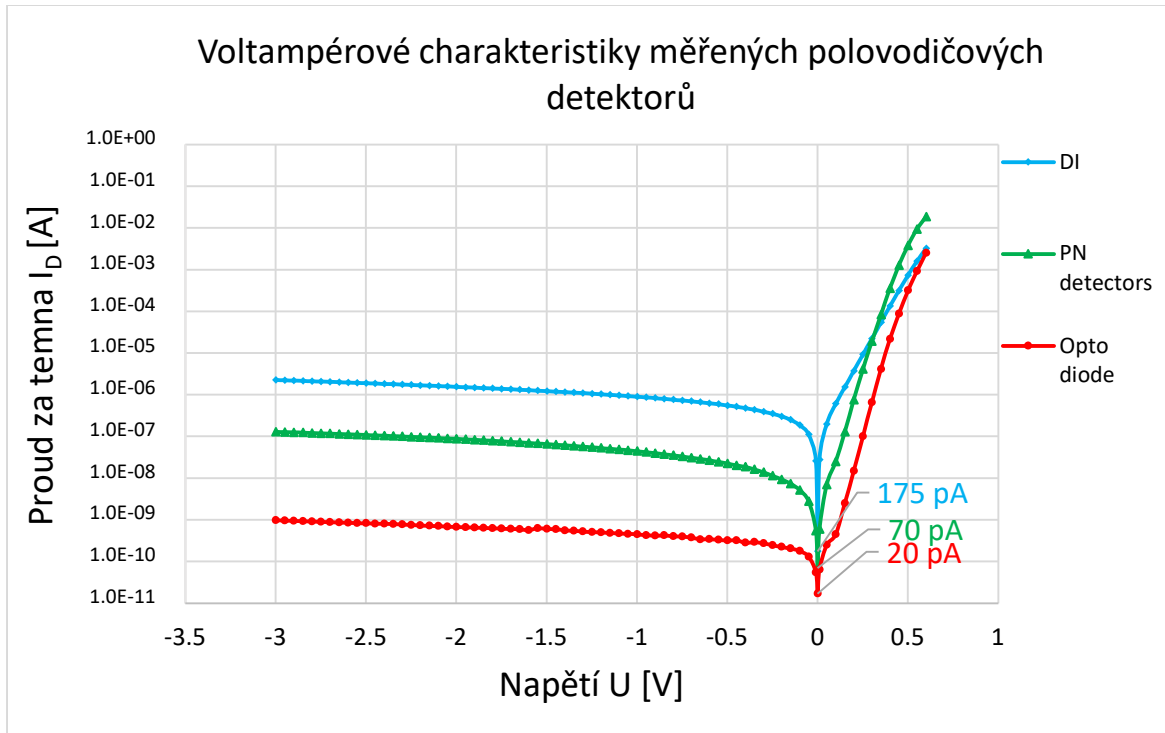
	SXUVPS1/LP	BSD-40-4-1-10
Aktivní plocha A	4x11 mm <sup>2</sup>	4x10 mm <sup>2</sup>
Svodový odpor R <sub>sh</sub>	>10 MΩ	-
Čas náběhu t <sub>rise</sub>	<2 μs	30 ns (U <sub>r</sub> = -60)
Proud za temna I <sub>d</sub>	-	<1nA (U <sub>r</sub> = -60)
Kapacita C	2 nF	6 pF (U <sub>r</sub> = -60)

Kde U<sub>r</sub> je záporně předpětí detektoru.

### 5.2 Voltampérová charakteristika

Při měření voltampérové charakteristiky byl detektor zapojen podle schématu na obrázku 9. Detektor byl během měření umístěn v temném prostředí, aby byla zajištěna nulová detekce fotonů, které by ovlivňovaly výsledek. Pomocí napěťového zdroje jsme přiváděli napětí. Napěťový zdroj ovšem nedosahuje dostatečné přesnosti, proto byla hodnota napětí určována pomocí přesnějšího měřidla, a to pomocí multimetru UNI-T UT70A. Multimetr také nedosahuje ideální přesnosti, nicméně v měřeném rozsahu není přesnost měřidla zásadní a lze ji zanedbat. Následně pomocí pikoampérmetru Keithley 6485 byl měřen

vyvolaný proud za temna detektoru. Zapojením pikoampérmetru zavádíme do obvodu napěťový offset ze vstupu pikoampérmetru, který může ovlivnit napětí na detektoru. Tento ampérmetr je ovšem vybaven funkcí korekce napěťového offsetu a vliv na měření je tedy minimální a tedy zanedbatelný. Naměřené průběhy jsme vynesli do grafu a jsou zobrazeny na obrázku 14.



Obrázek 14: Voltampérové charakteristiky měřených detektorů

Naměřené průběhy voltampérové charakteristiky odpovídají předpokládaným výsledkům. Z charakteristik byla odečtena hodnota proudu za temna při nulovém napětí, kdy dosahuje nejmenších hodnot. Nejmenší proud za temna byl naměřen na detektoru firmy Opto Diode SXUVPS1/LP  $I_d = 20 \text{ pA}$ . Pro detektor od firmy PNdetector vyšel proud  $I_d = 70 \text{ pA}$  a pro detektor firmy Delong Instruments byl naměřen proud za temna  $I_d = 175 \text{ pA}$ .

### 5.3 Výpočet svodového odporu

Ze zapojení pro měření voltampérové charakteristiky lze také naměřit hodnoty proudu pro výpočet svodového odporu detektoru. Při nízkém napětí 10 mV byl odečten proud. Hodnota proudu pro detektor od firmy Opto Diode byla naměřena  $I_d = 55 \text{ pA}$ . Pomocí ohmova zákona lze následně vypočítat hodnota svodového proudu.

$$R_{sh} = \frac{U}{I_d} = \frac{10 * 10^{-3}}{55 * 10^{-12}} = 181,82 \text{ M}\Omega$$

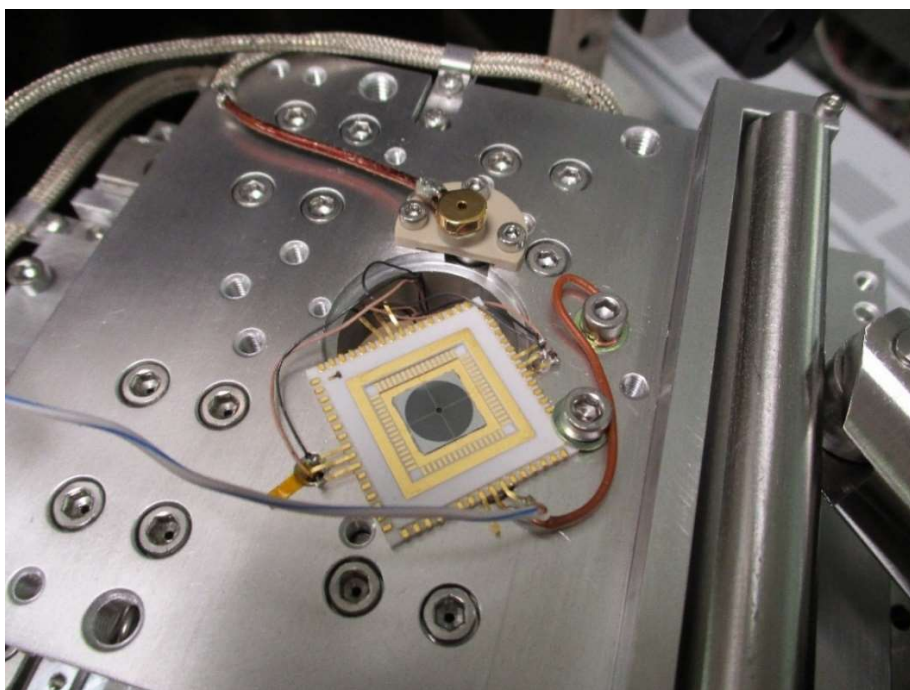
Obdobně jsme vypočítali hodnoty svodového odporu i pro další dva detektory. Naměřené hodnoty proudu za temna při napětí 10 mV a vypočítané hodnoty svodového proudu každého detektoru jsou uvedeny v tabulce 3.

Tabulka 3: Naměřené hodnoty proudu za temna při napětí 10 mV a vypočítané hodnoty svodového odporu

	DI	Opto Diode	PNdetector
$I_d$ [pA]	2600	55	550
$R_{sh}$ [M $\Omega$ ]	3,85	181,82	18,82

## 5.4 Zisk detektoru

Pro měření zisku detektoru byl použit rastrovací elektronový mikroskop s nastavitelným urychlovacím napětím. Během měření zisku byl detektor umístěn na pohyblivém stolku uvnitř komory elektronového mikroskopu. Na stolku byla zároveň umístěna také Faradayova sonda pro měření proudu primárního svazku. Umístění detektoru a Faradayovy sondy na stolku je zobrazeno na obrázku 15. Detektor byl připojen na vodič, který je následně vyveden ven z komory mikroskopu přes průchodku. Přes průchodku je také vyveden vodič od Faradayovy sondy.



Obrázek 15: Rozmístění komponent na pohyblivém stolku elektronového mikroskopu

Rozsah urychlovacího napětí  $U_r$  byl zvolen v závislosti na konfiguraci elektronového mikroskopu použitého pro měření. Maximální napětí použitého přístroje bylo 20 kV. Spodní hranice rozsahu byla zvolena na 5 kV. Při této hodnotě začal již razantně klesat proud svazku a pro nižší napětí již nebylo možné měření provést.

Během měření byl pro každé urychlovací napětí  $U_r$  nejprve pomocí pohyblivého stolku navedena do osy primárního svazku Faradayova sonda a byl odečten proud primárního svazku  $I_{beam}$ . Měření proudu primárního svazku bylo nutné provést pro každé urychlovací napětí, neboť s každou změnou urychlovacího napětí bylo nutné upravit hodnotu žhavicího proudu  $I_F$ , čímž se změnila hodnota proudu svazku. Také bylo nutné upravit nastavení kondenzorů, pro nastavení optimálního proudu primárního svazku. Proudů primárního svazku použitého elektronového mikroskopu se pohybují v řádech nanoampérů. Pro měření takového proudu bylo nutné použít ampérmetr s dostatečným měřicím rozsahem. Jak pro měření proudu primárního svazku, tak pro proud detektoru, byl použit pikoampérmetr Keithley 6485. Změřené hodnoty proudů pro jednotlivé detektory a proudy primárního svazku pro jednotlivá urychlovací napětí jsou uvedeny v tabulce 4.

Tabulka 4: Naměřené hodnoty proudů primárního svazku a proudy detektorů pro různá urychlovací napětí

$U_r$ [kV]	DI		Opto Diode		PNdetector	
	$I_{det}$ [uA]	$I_{fcup}$ [nA]	$I_{det}$ [uA]	$I_{fcup}$ [nA]	$I_{det}$ [uA]	$I_{fcup}$ [nA]
20	88,6	22,6	125,0	26,8	60,6	26,9
18	108,0	31,9	79,8	29,2	67,3	30,9
16	70,0	27,1	132,0	36,0	50,4	29,6
14	69,6	30,9	74,8	24,3	31,6	25,3
12	16,3	24,6	71,5	25,6	30,1	28,1
10	23,5	16,9	27,6	14,4	27,4	23,5
8	13,8	12,7	29,0	17,2	12,9	13,9
6	4,3	10,3	12,8	9,3	8,4	10,1
5	1,6	7,7	7,9	7,4	3,8	5,2

Ze změřených proudů jsme následně vypočítali zisk pro každé urychlovací napětí podle vztahu

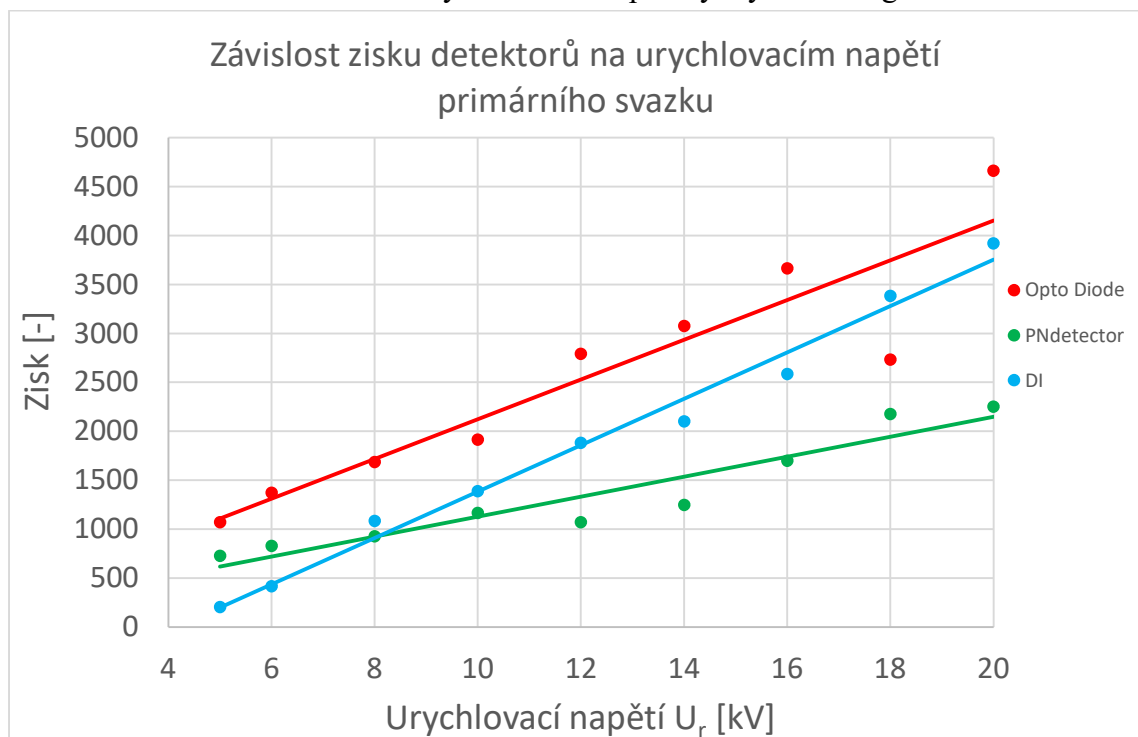
$$Zisk = \frac{I_{det}}{I_{beam}} = \frac{60,6 * 10^{-6}}{26,9 * 10^{-9}} = 2252,79$$

Stejným způsobem byly vypočítány hodnoty zisku pro všechny detektory a získané hodnoty jsou uvedeny v tabulce 5.

Tabulka 5: Zisk detektorů pro daná urychlovací napětí

	DI	Opto Diode	PNdetector
$U_r$ [kV]	zisk [-]	zisk [-]	zisk [-]
20	3920	4664	2252
18	3385	2732	2177
16	2586	3666	1701
14	2103	3078	1249
12	1882	2793	1071
10	1390	1916	1166
8	1086	1686	928
6	417	1372	831
5	205	1073	729

Průběh zisku v závislosti na urychlovacím napětí byl vyneseno do grafu na obrázku 16.



Obrázek 16: Závislost zisku detektorů na urychlovacím napětí primárního svazku

Průběhy zisku všech měřených detektorů odpovídají teoretickým datům a mají předpokládaný lineární průběh.

Jemné odchylky od lineárního průběhu mohou být způsobeny nestabilitou katody a následnou změnou proudu primárního svazku. Elektronový mikroskop použitý při měření používá termoemisi katodu z wolframového vlákna. Tento typ katod nedosahuje velké stability a proud svazku může kolísat. Kolísání proudu bylo zřetelné již při měření proudu primárního svazku pomocí Faradayovy sondy. Hodnota proudu kolísala i v řádu jednotek nanoampérů. Pro měření byla použita vždy průměrná hodnota proudu. U detektoru od

firmy Opto Diode, byla u urychlovacího napětí 18 kV naměřena velká odchylka od předpokládaného průběhu. Pravděpodobně se jedná o chybu v měření a špatné odečtení hodnot.

Během elektronového ozařování byl detektor vystaven také ozařování fotony z rozžhaveného vlákna termoemisioní katody. Toto fotonové ozařování je nutné brát v úvahu, neboť může zkreslovat hodnotu zisku a navyšovat neměřené hodnoty na detektoru. Pro eliminaci tohoto vlivu by bylo nutné změřit samotný proud vyvolaný fotony  $I_{\text{foton}}$  na detektoru a následně tuto hodnotu odečíst od proudu změřeného při ozařování elektrony. Měření tohoto proudu by bylo nutné provést opět pro každé urychlovací napětí, neboť byla upravována hodnota žhavicího proudu katody a tím se měnilo množství emitovaných fotonů, ale v použitém elektronovém mikroskopu nebylo možné takové měření provést.

Různé směrnice průběhů detektorů mohou být způsobeny odlišnou strukturou polovodičového materiálu, hlavně tloušťkou pasivační vrstvy a hloubkou a šířkou depletiční vrstvy detektoru. Hodnota zisku detektoru od firmy DI je srovnatelná s oběma komerčně dostupnými detektory a již při napětí kolem 8 kV dosahuje zisku 1000. Nicméně při nižších napětích kolem 5 kV je zřetelné, že hodnota zesílení razantně klesá. Tato nízká hodnota je nejspíše způsobena silnější pasivační vrstvou, případně také umístěním depletiční vrstvy ve větší hloubce polovodičového materiálu, v důsledku čehož elektrony s nízkou energií nejsou schopny dopadat do depletiční vrstvy a interagují ještě před depletiční vrstvou, kdy může docházet k větší rekombinaci a hodnota zesílení klesá.

## 5.5 Časová odezva

Měření časové odezvy detektoru bylo provedeno pomocí pulsního laseru s definovanou délkou pulsu, kterým byl ozařován měřený detektor. Pro měření byl použit pulsní laser Brilliant b od firmy Quantel, pracující ve viditelném spektru na vlnové délce 532 nm s frekvencí 10 Hz. Pulsní laser Brilliant b před samotným pulsem laseru bliká integrovanou výbojkou, jejíž puls má dlouho sestupnou hranu a ovlivňuje měření. Pro potlačení negativního vlivu světla výbojky byl vložen před detektor absorbní filtr pro odfiltrování tohoto pulsu světla. Nicméně světlo z výbojky nebylo potlačeno úplně a při zapojení zesilovače s velkým zesílením byl měřený časový průběh stále zatížen tímto jevem.

Detektor byl umístěn v optické ose laseru. Během měření byly všechny segmenty detektorů propojeny, nebylo tedy nutné, směřovat laser na jeden vybraný segment. Detektor byl připojen na zesilovač pomocí koaxiálního kabelu Belden 83269. Základní délka kabelu byla zvolena 40 cm. Tato délka byla zvolena v závislosti na zapojení na elektronovém mikroskopu LVEM5, aby naměřené výsledky co nejvíce odpovídaly hodnotám u zmíněného elektronového mikroskopu. Zesilovač byl napájen pomocí laboratorního zdroje a zároveň byla pomocí laboratorního zdroje nastavována i hodnota zesílení. Výstupní signál zesilovače byl následně přiveden do osciloskopu Teledyne LeCroy HDO6104A-MS. Pomocí osciloskopu byly naměřené průběhy uloženy a následně vyneseny do grafů. Z vynesených časových průběhů byly následně odečteny časy nástupných a sestupných hran.

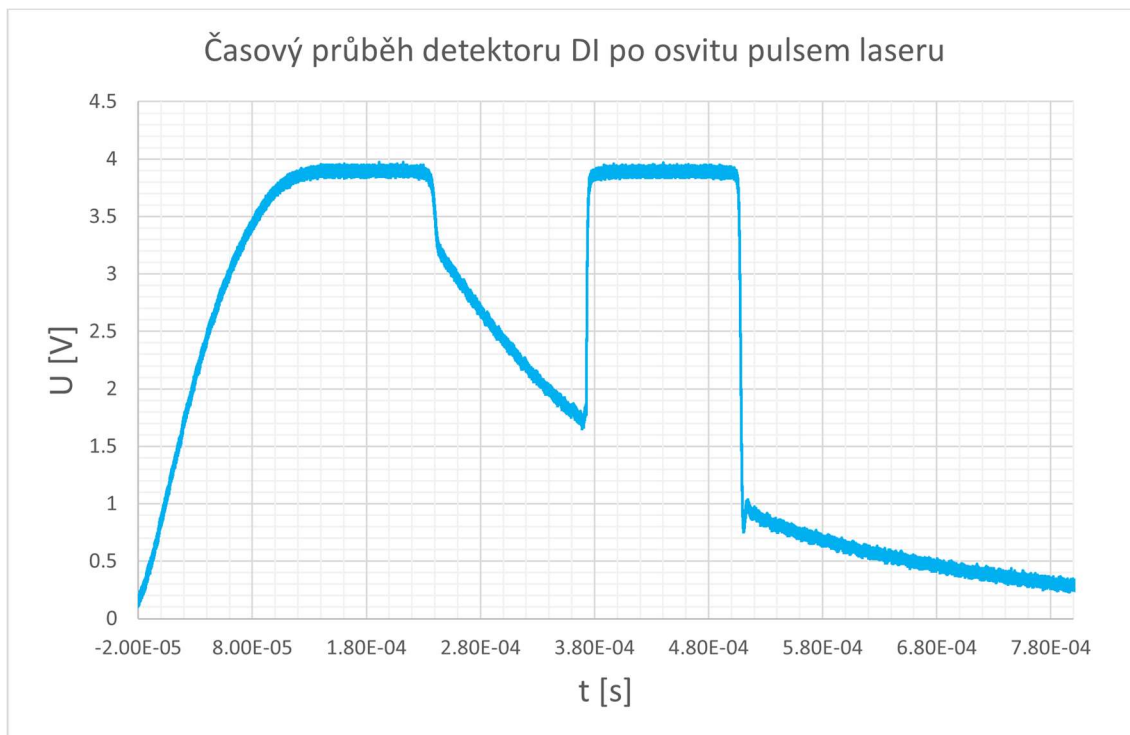
Měření časových průběhů bylo provedeno pro tři různé zesilovače. U každého zesilovače bylo měření opakováno pro všechny tři měřené detektory. Následně bylo provedeno měření časové odezvy v závislosti na změně parazitní kapacity vlivem různé délky propojovacího kabelu.

### 5.5.1 Detektor + zesilovač LVEM5

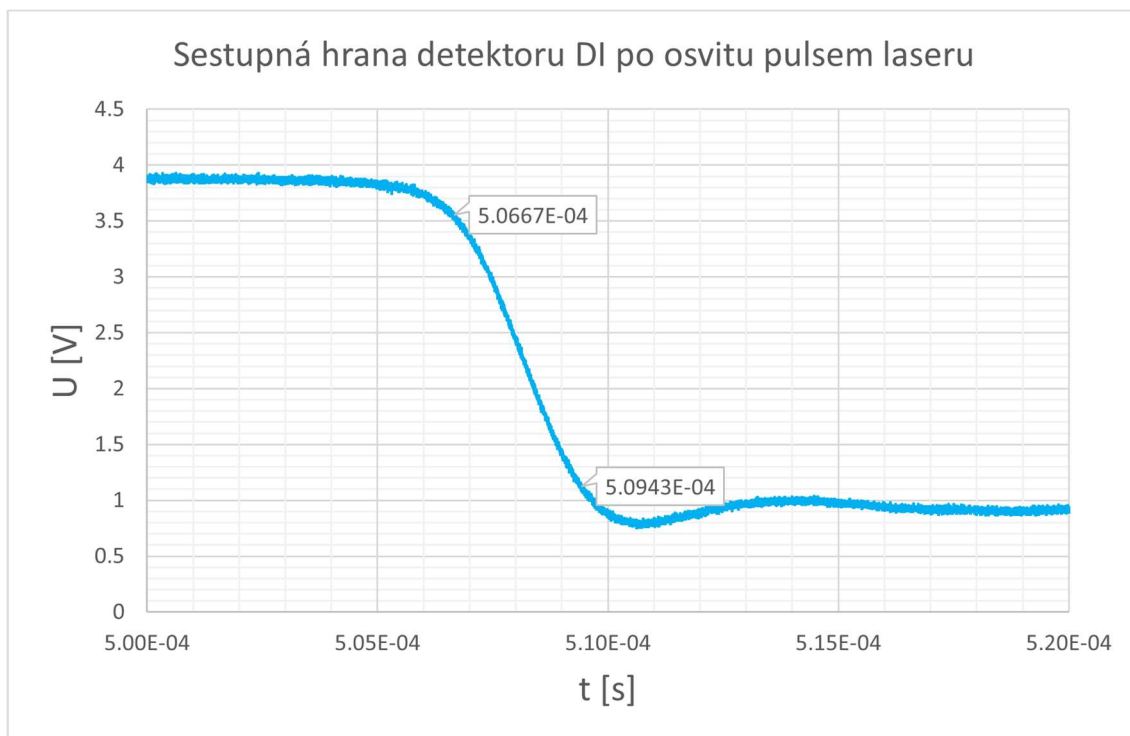
Zapojení pro měření časové odezvy detektoru bylo provedeno v co největším souladu se zapojením na elektronovém mikroskopu LVEM5. U tohoto mikroskopu je detektor připojen pomocí koaxiálního kabelu Belden 83269 o délce  $d = 40$  cm na zesilovač LVEM5. Během experimentu byl zesilovač napájen pomocí laboratorního zdroje a zároveň bylo pomocí napěťového zdroje řízeno zesílení zesilovače. Při měření bylo zesílení nastaveno na stejnou hodnotu pro všechny detektory. Na výstupu zesilovače byly následně pomocí osciloskopu odečteny výsledné průběhy.

Výsledný průběh je významně ovlivněn výbojkou blikající společně s laserem. Jelikož použitý zesilovač má vysoké zesílení, bylo světlo z výbojky velice zesílené a kvůli dlouhé sestupné hraně výbojky je zkrácený průběh po osvětlení pulsem laseru a napětí neklesne až na nulovou hodnotu.

## Detektor DI



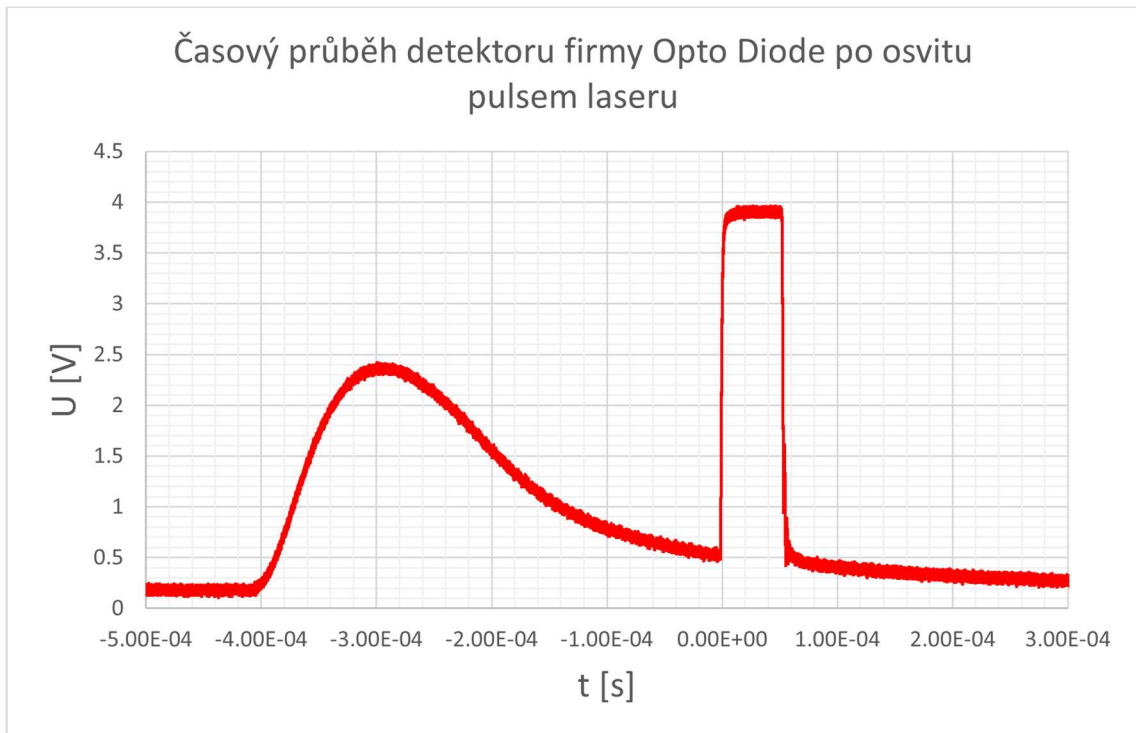
Obrázek 17: Celkový naměřený časový průběh po osvitě pulsem výbojky a laseru na detektoru DI se zesilovačem LVEM5



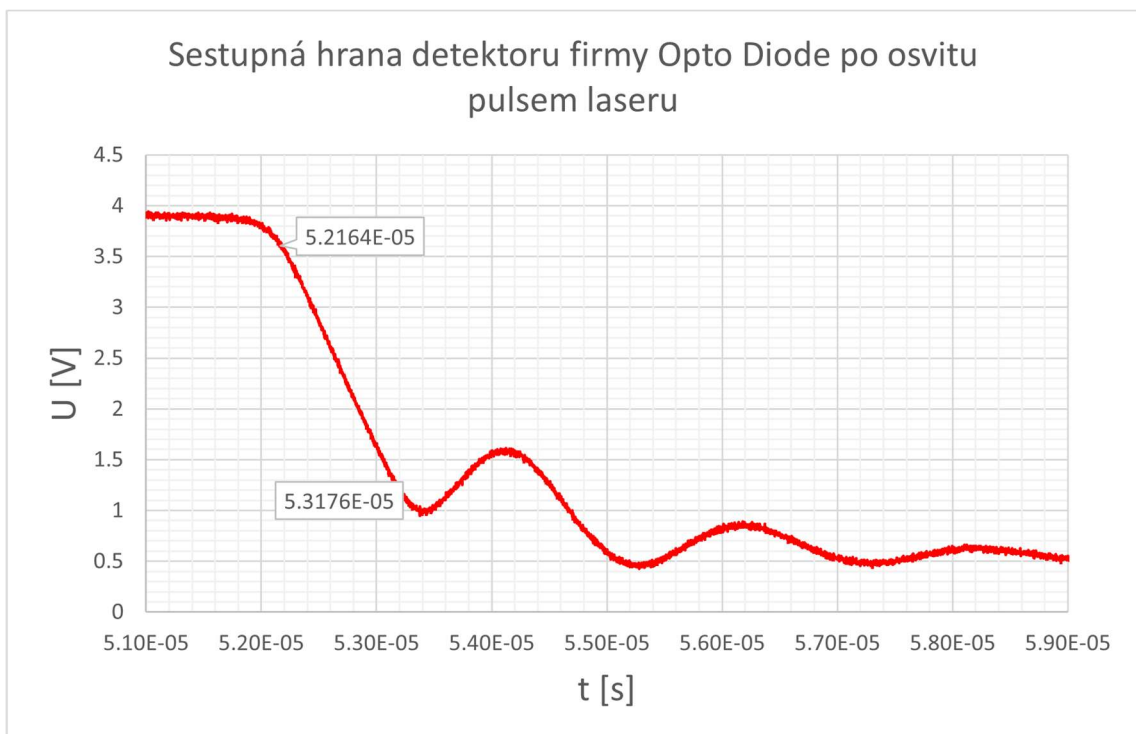
Obrázek 18: Sestupná hrana odezvy na puls laseru detektoru DI se zesilovačem LVEM5



## Detektor Opto Diode

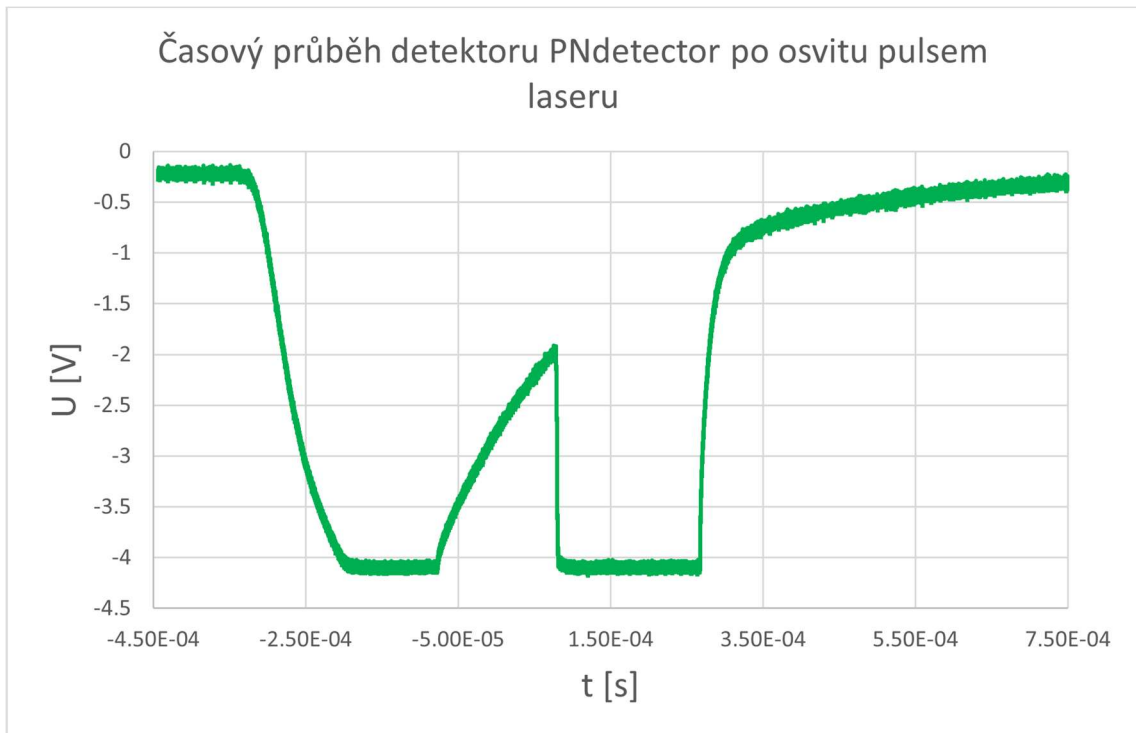


Obrázek 19: Celkový naměřený časový průběh po osvitu pulsem výbojky a laseru na detektoru firmy Opto Diode se zesilovačem LVEM5

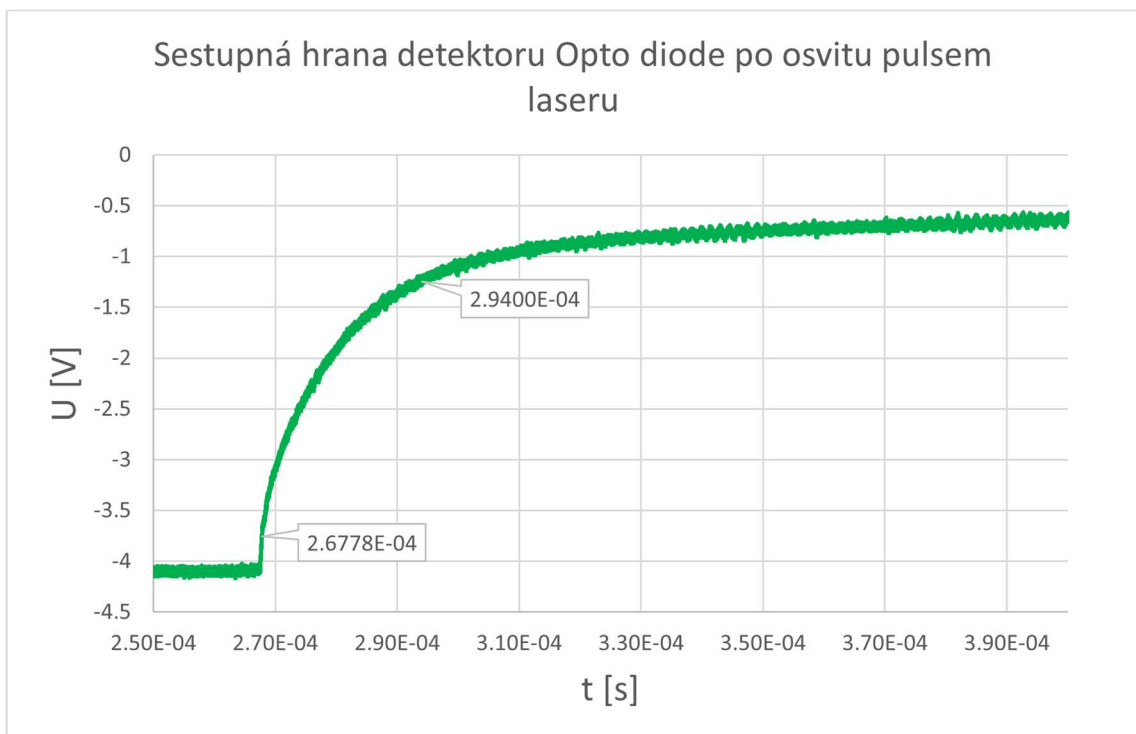


Obrázek 20: Sestupná hrana odezvy na puls laseru detektoru Opto Diode se zesilovačem LVEM5

## Detektor PNdetector



Obrázek 21: Celkový naměřený časový průběh po osvitě pulsem výbojky a laseru na detektoru firmy PNdetector se zesilovačem LVEM5



Obrázek 22: Sestupná hrana odezvy na puls laseru detektoru PNdetector se zesilovačem LVEM5

Na obrázku 17 je zobrazen celý časový průběh detektoru DI pozorovaný na osciloskopu. První puls na průběhu je způsoben výbojkou s následnou dlouhou sestupnou hranou, na které je následně superponován puls vyvolaný laserem. Z naměřeného průběhu je zřejmé, že nástupná hrana bude více zkreslena než sestupná a pro toto měření byla odečítána pouze hrana sestupná. Na obrázku 18 je zobrazena samotná sestupná hrana po osvětlení laserem.

Z naměřeného průběhu byl odečten čas sestupné hrany  $t_s$  detektoru DI. Hodnota byla odečítána jako rozdíl času při hodnotách 90 % a 10 % napětí.

$$t_s = t_{10\%} - t_{90\%} = 5,0943 * 10^{-4} - 5,0667 * 10^{-4} = 2,7640 * 10^{-6} = 2,76 \text{ us}$$

Na obrázku 19 je zobrazen celý naměřený časový průběh pro detektor od firmy Opto Diode. Na naměřeném průběhu je patrné, že detektor méně detekuje světlo z výbojky a díky tomu není tolik ovlivněn puls vyvolaný laserem. Menší detekce světla z výbojky může být způsobena horší citlivostí detektoru na vlnové délky světla, generovaného výbojkou. Na sestupné hraně po osvětlení laserem jsou viditelné překmity signálu. Tyto překmity jsou způsobeny samotným detektorem, jak je zřejmé z následujících experimentů. U Časového průběhu detektoru od firmy PNdetector na obrázku 21 je obrácená polarita výstupního signálu. Obrácená hodnota je způsobena vlivem opačného uspořádání polovodičů N a P ve struktuře detektoru.

Byly odečteny časy sestupných hran pro ostatní detektory stejným způsobem jako v případě detektoru DI a získané hodnoty byly vyneseny do tabulky 6.

Tabulka 6: Naměřené hodnoty časů sestupných hran jednotlivých detektorů v zapojení se zesilovačem LVEM5

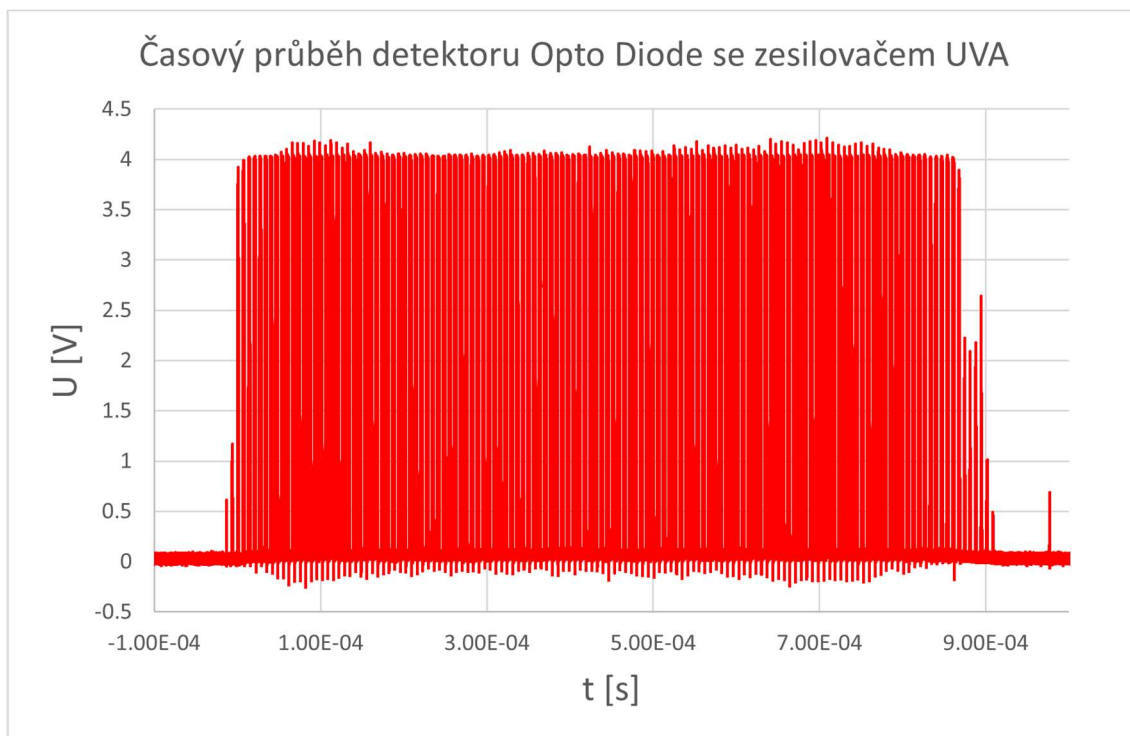
DI	Opto Diode	PNdetector
Sestupná hrana $t_s$	Sestupná hrana $t_s$	Sestupná hrana $t_s$
2,76 $\mu\text{s}$	1,01 $\mu\text{s}$	26,22 $\mu\text{s}$

Nejlepší hodnoty času sestupné hrany v zapojení se zesilovačem LVEM5 dosahuje detektor od firmy Opto Diode  $t_s = 1,01 \mu\text{s}$ . Detektor firmy DI dosáhl času  $t_s = 2,76 \mu\text{s}$ . Detektor PNdetector dosáhl délky sestupné hrany  $t_s = 26,22 \mu\text{s}$ . Tato hodnota je podstatně větší než ostatní dva detektory a neodpovídá předpokládanému výsledku.

Všechny naměřené hodnoty jsou větší, než byl předpoklad a je zřejmé, že časová odezva je ovlivněna použitým zesilovačem. Pro zjištění časové odezvy samotného detektoru je nutné provést měření s rychlejší zesilovačem, který nebude negativně ovlivňovat výsledný signál.

### 5.5.2 Detektor + zesilovač UVA

Během tohoto měření byl zesilovač LVEM5 nahrazen zesilovačem UVA, který má větší šířku pásma a předpokládaná časová odezva by měla být kratší. Ostatní části zapojení zůstaly totožné s předchozím měřením. Měření ovšem bylo neúspěšné. Při osvitě detektoru se zesilovač rozkmital a nebylo možné změřit časy nástupných a sestupných hran. Časový průběh je zobrazen na obrázku 23. Měření bylo provedeno se všemi detektory, ale vždy došlo k rozkmitání zesilovače.

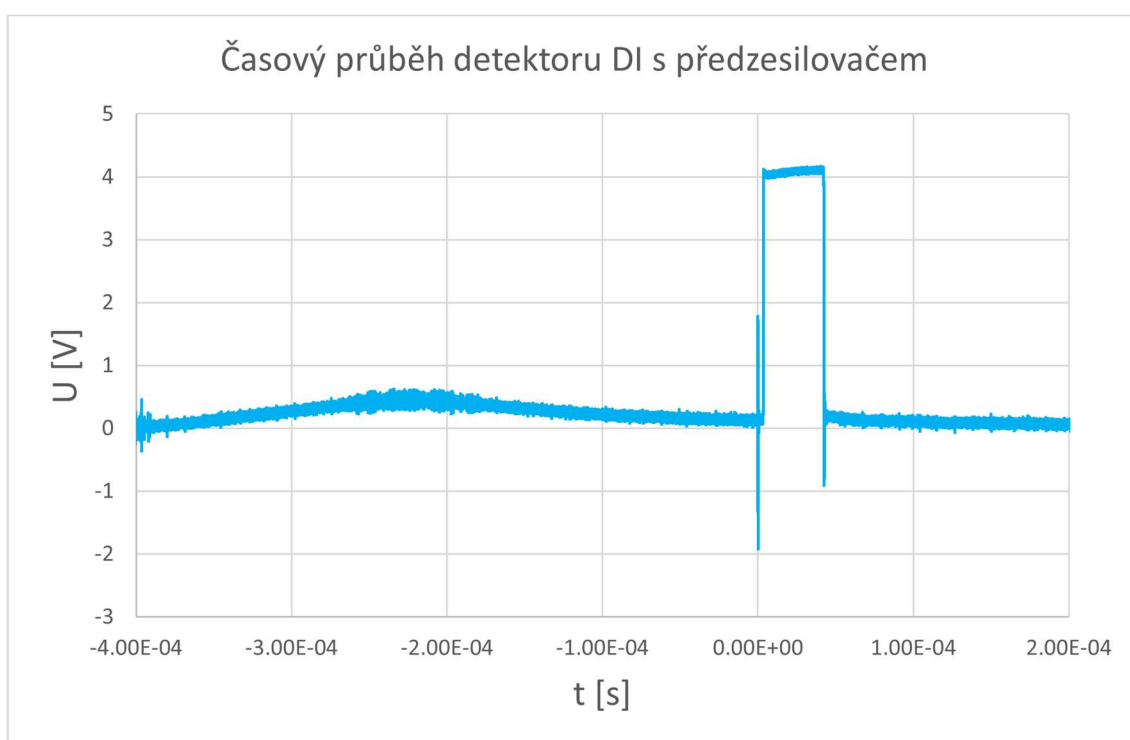


Obrázek 23: Naměřený časový průběh detektoru Opto Diode se zesilovačem UVA

Na výstupu zesilovače byl naměřen záznam plný krátkých pulsů. Puls výbojky a laseru vygeneroval na detektoru příliš silný signál a zesilovač přešel do saturace, což způsobilo rozkmitání zesilovače a nebylo možné pozorovat žádnou reakci na puls laseru. Pro měření by bylo nutné použít slabší zdroj světla, který by generoval menší proud na výstupu detektoru a zesilovač by nepřešel do saturace a nerozkmital se.

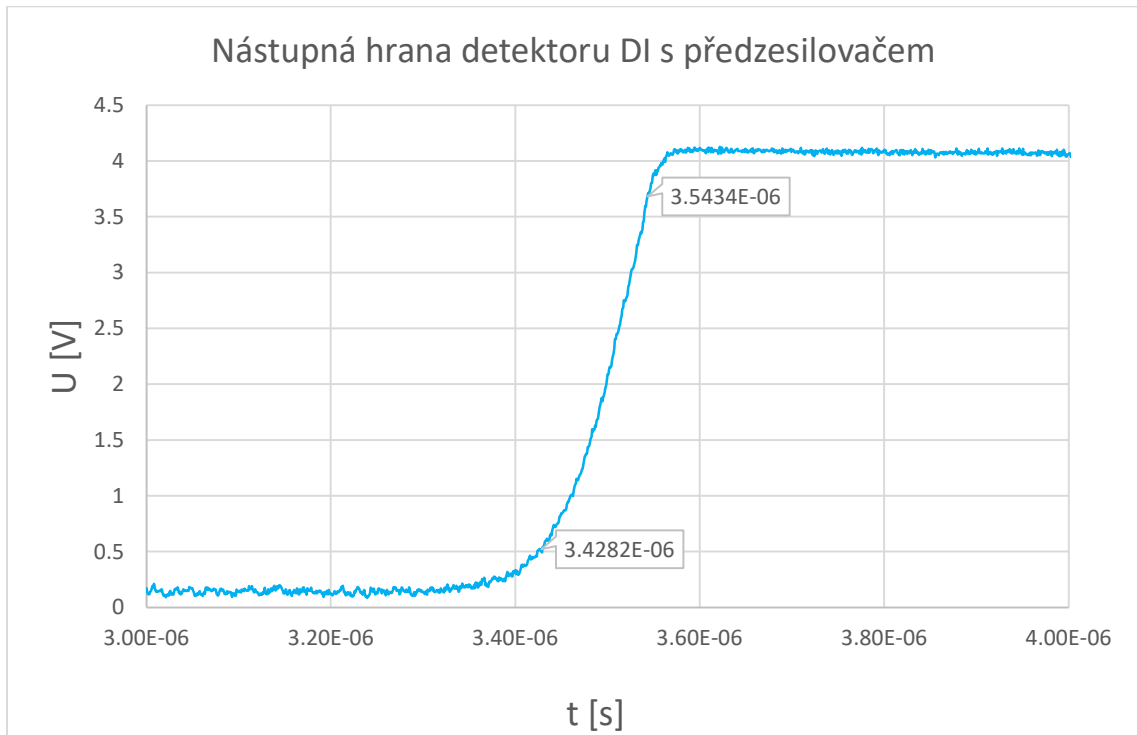
### 5.5.3 Detektor + předzesilovač

V dalším měření byl jako zesilovač detekovaného signálu použit první stupeň experimentálního zesilovače, který funguje jako předzesilovač pro celý zesilovač. Jelikož se jedná pouze o jeden zesilovací stupeň s malým zesílením, časová odezva výstupního signálu by neměla být tolik ovlivněna a měla by být změřena co nejpřesněji časová odezva detektoru. Zároveň díky předzesilovači byl také potlačen vliv výbojky na časový průběh, jak je zobrazeno na obrázku 24. Díky malému zesílení není tento nežádoucí signál dostatečně zesílen a v čase pulsu laseru není již časový průběh negativně ovlivněn. Měření bylo provedeno pro všechny detektory a následně byla zobrazena nástupná a sestupná hrana.

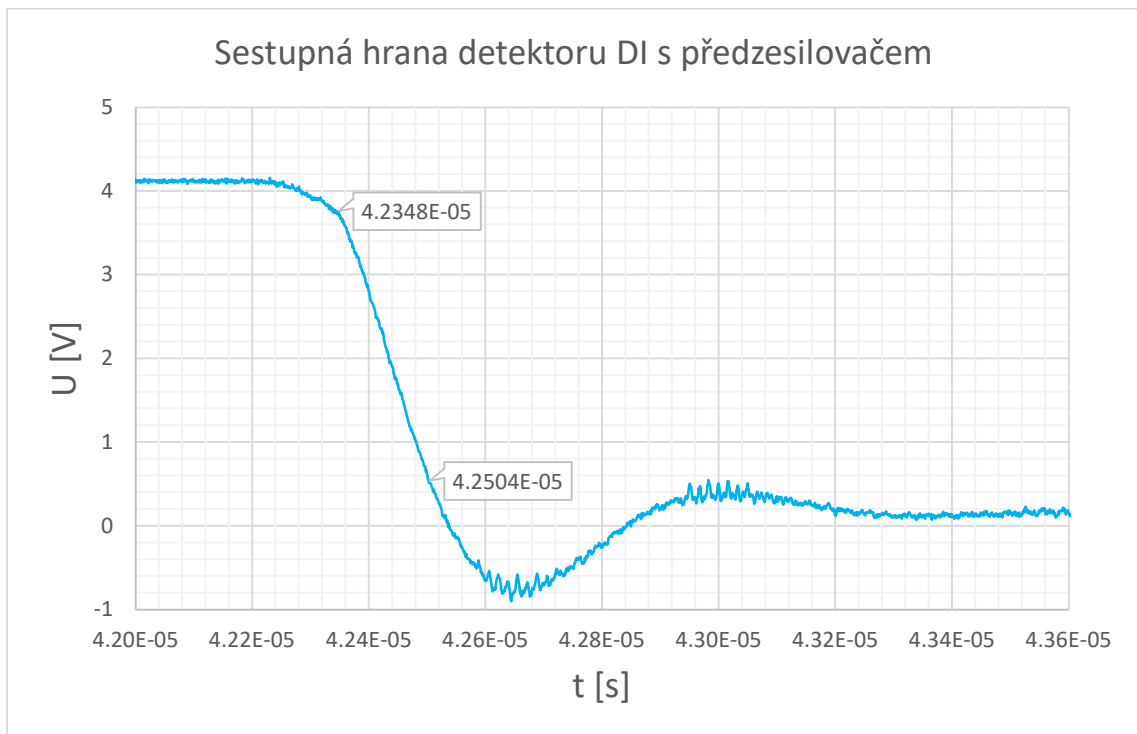


Obrázek 24: Časový průběh detektoru DI v zapojení s předzesilovačem po osvitu pulsem laseru

## Detektor DI

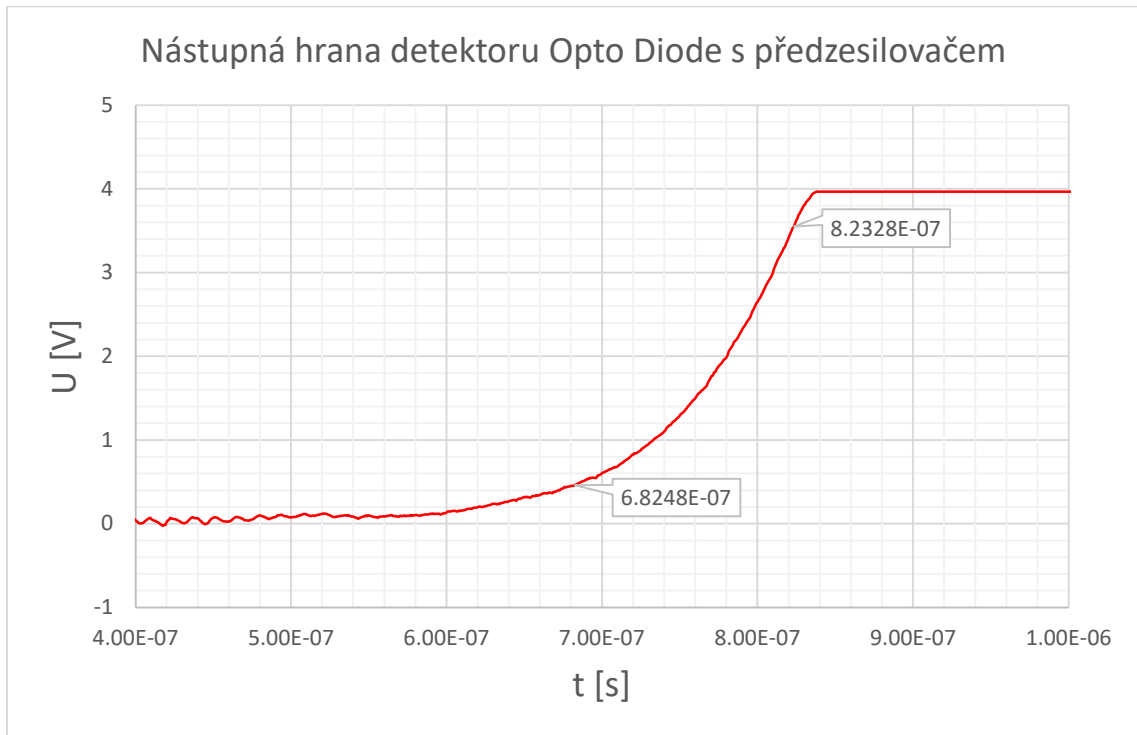


Obrázek 25: Nástupná hrana detektoru DI v zapojení s předzesilovačem po osvětlení pulsem laseru

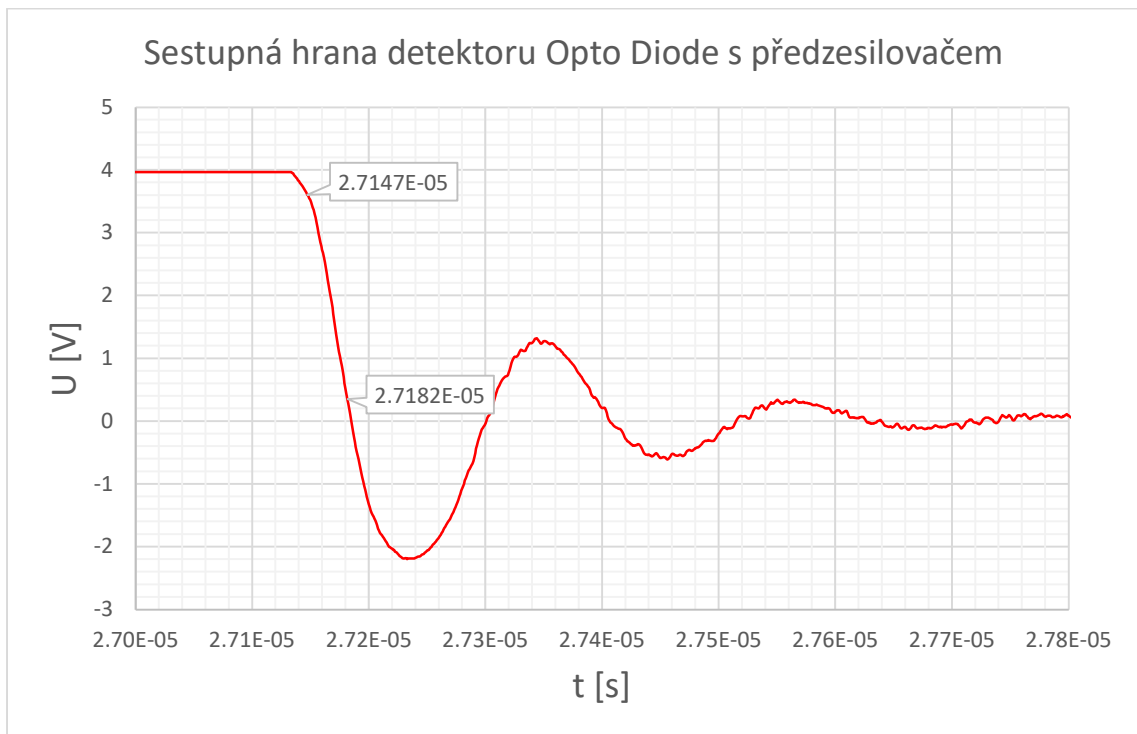


Obrázek 26: Sestupná hrana detektoru DI v zapojení s předzesilovačem po osvětlení pulsem laseru

## Detektor Opto Diode

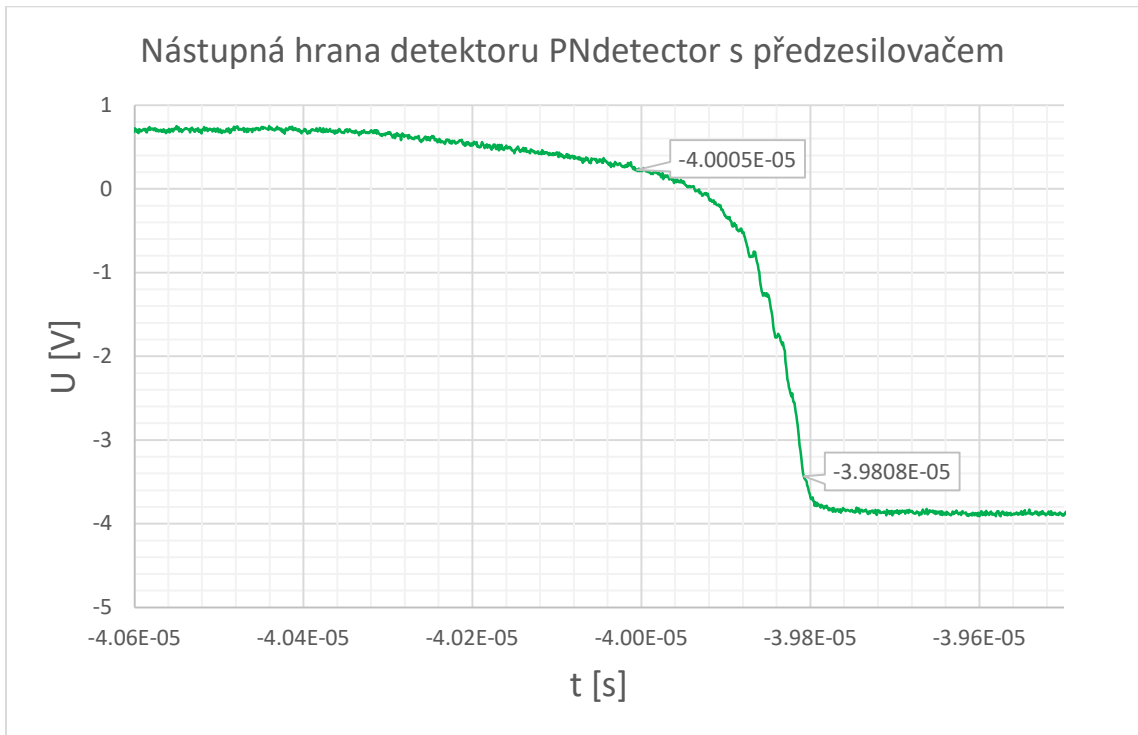


Obrázek 27: Nástupná hrana detektoru Opto Diode v zapojení s předzesilovačem po osvětlení pulsem laseru

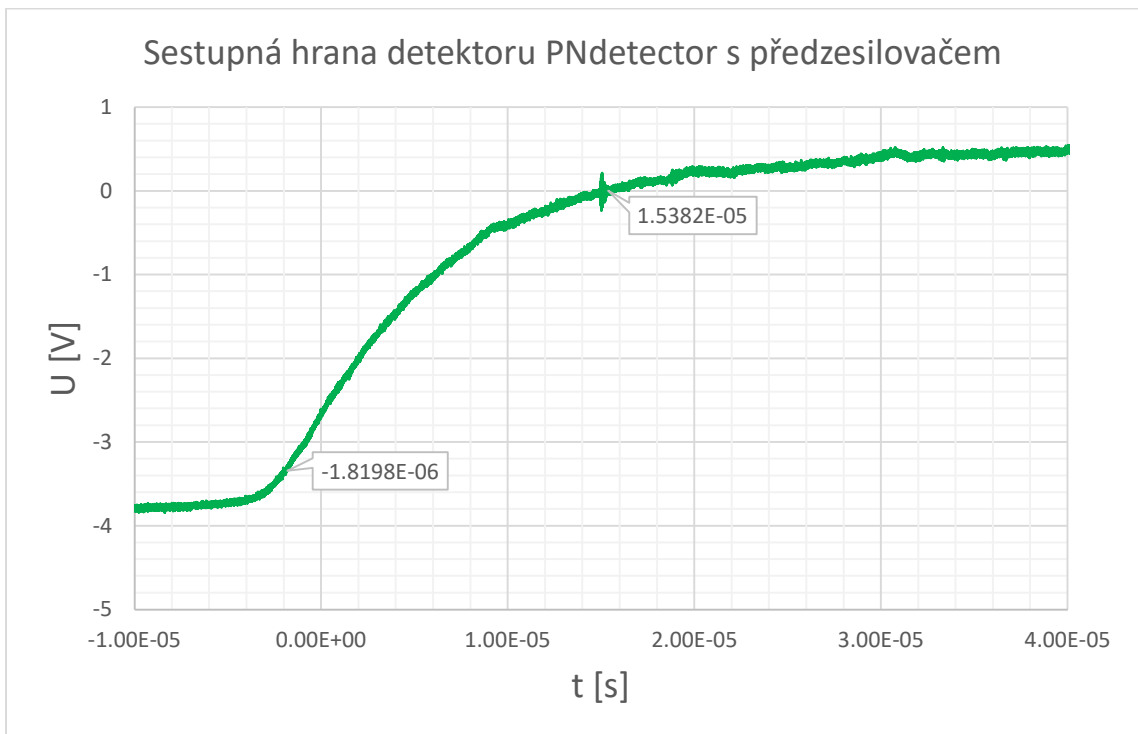


Obrázek 28: Sestupná hrana detektoru Opto Diode v zapojení s předzesilovačem po osvětlení pulsem laseru

## Detektor PNdetector



Obrázek 29: Nástupná hrana detektoru PNdetector v zapojení s předzesilovačem po osvětlení pulsem laseru



Obrázek 30: Sestupná hrana detektoru PNdetector v zapojení s předzesilovačem po osvětlení pulsem laseru



Na obrázcích jsou zobrazeny průběhy nástupných a sestupných hran jednotlivých detektorů. Na obrázku 28 jsou na průběhu sestupné hrany detektoru firmy Opto Diode patrné překmity, stejně jako při měření se zesilovačem LVEM5. Lze tedy předpokládat, že překmity nejsou způsobeny vlivem prvního zesilovače, ale jedná se o vlastnost detektoru. Stejně tak je patrný slabý překmit u detektoru DI na obrázku 26. U časového průběhu detektoru PNdetector je opět patrná obrácená polarita výstupního signálu, která je způsobena vlivem opačného uspořádání polovodičů N a P ve struktuře detektoru.

Odečtené hodnoty nástupných a sestupných hran všech detektorů jsou uvedeny v tabulce 7.

Tabulka 7: Naměřené hodnoty nástupných a sestupných hran pro jednotlivé detektory

DI		Opto Diode		PNdetector	
Nástupná hrana $t_n$	Sestupná hrana $t_s$	Nástupná hrana $t_n$	Sestupná hrana $t_s$	Nástupná hrana $t_n$	Sestupná hrana $t_s$
113,4 ns	156,0 ns	141,0 ns	34,4 ns	197,6 ns	17,2 $\mu$ s

Pro detektor DI byla změřena doba nástupné hrany  $t_n = 113,4$  ns. Doba nástupné hrany u detektoru DI je nejrychlejší ze všech změřených detektorů. Rozdíly nástupných hran nejsou příliš velké a všechny se pohybují v nízkých stovkách nanosekund.

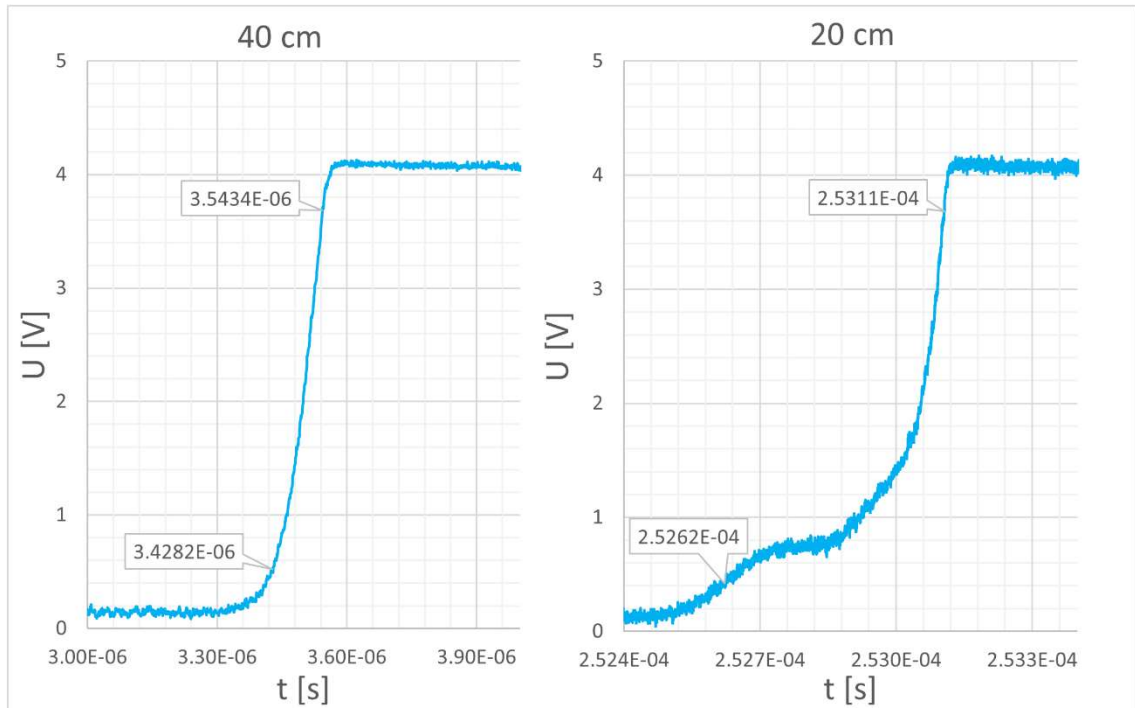
Nejkratší doba sestupné hrany byla naměřena u detektoru firmy Opto Diode  $t_s = 34,4$  ns. Doba sestupné hrany detektoru DI byla delší a to  $t_s = 156,0$  ns. Nejdelší doba sestupné hrany byla naměřena u detektoru PNdetector  $t_s = 17,2$   $\mu$ s. Tato naměřená hodnota se jako v případě měření se zesilovačem LVEM5 výrazně liší od předpokládané hodnoty.

#### 5.5.4 Vliv délky kabelu na časovou odezvu

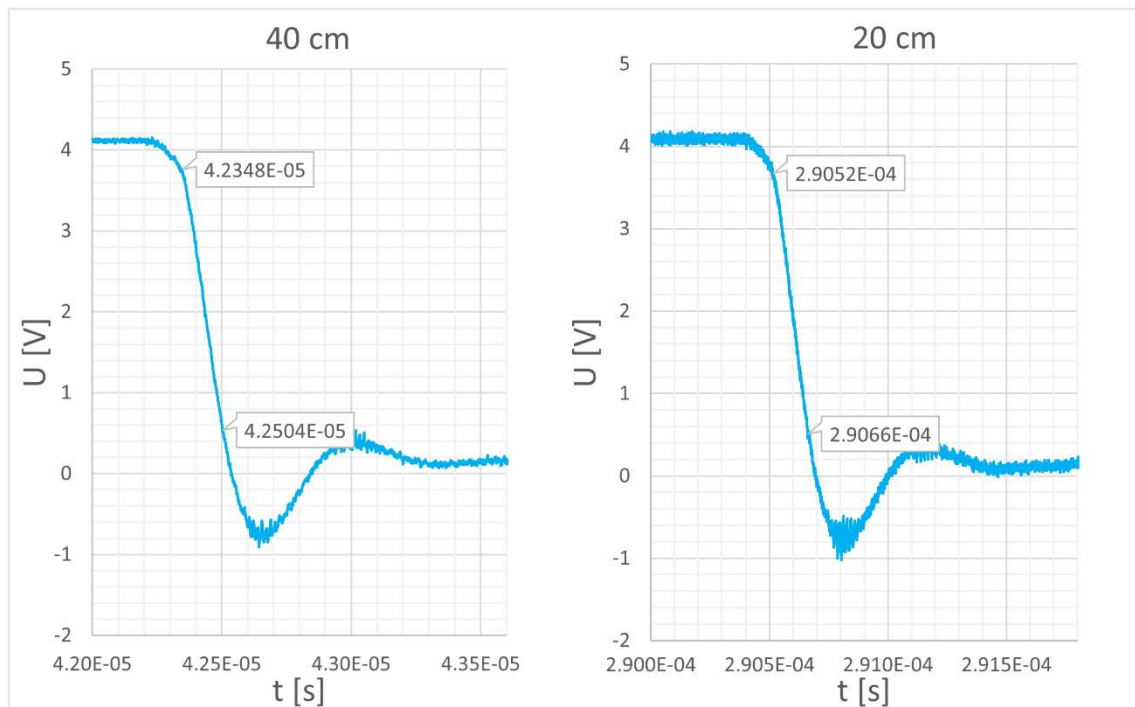
Na výsledné časy nástupných a sestupných hran má vliv kapacita jednotlivých prvků zapojení. Při měření časové odezvy při různých délkách propojovacího kabelu jsme schopni zjistit vliv parazitní kapacity na časový průběh výstupního signálu. Pro propojení detektoru se zesilovačem je použitý koaxiální kabel Belden 83269, který má definovanou parazitní kapacitu  $C_p = 95$  pF/m. Při délce kabelu 40 cm, která je standardně použita na mikroskopu LVEM5, odpovídá hodnota parazitní kapacity  $C_p = 38$  pF. Při zkrácení délky kabelu na 20 cm klesne hodnota parazitní kapacity o polovinu na  $C_p = 19$  pF. [25]

Zapojení zůstalo stejné jako v předchozím experimentu, tedy detektor byl připojen na předzesilovač, na jehož výstupu jsme následně odečítali výstupní signál osciloskopem. Měření bylo provedeno pro všechny detektory. Průběhy nástupných a sestupných hran byly zaznamenány a následně vyneseny do grafů.

## Detektor DI

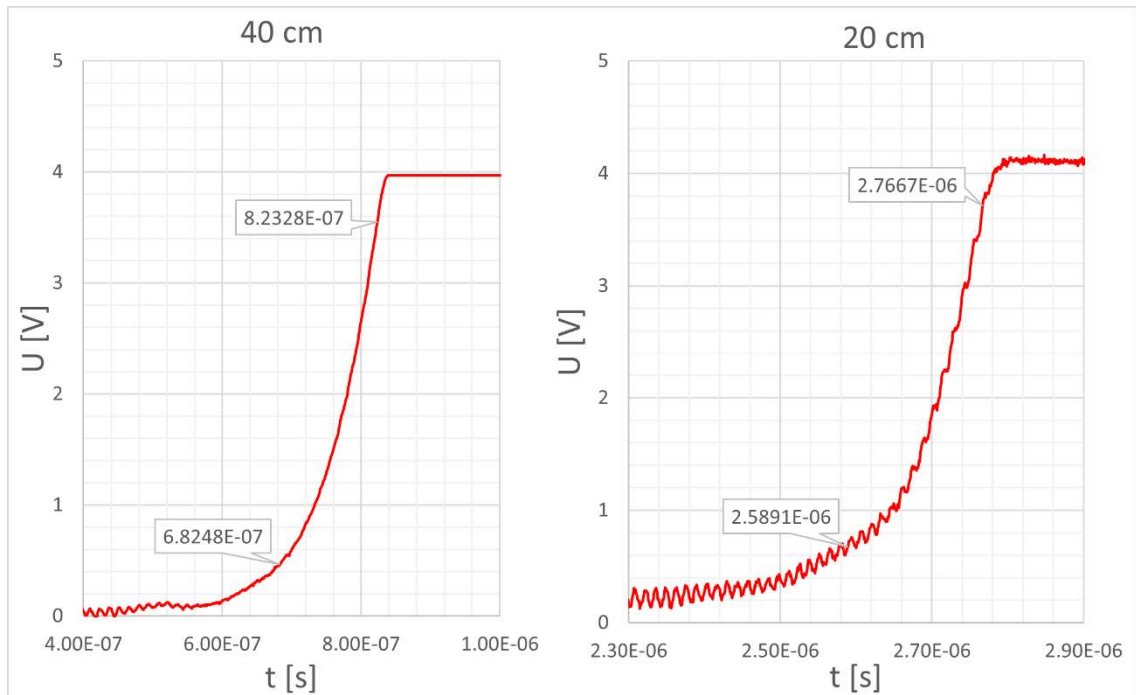


Obrázek 31: Naměřené průběhy nástupných hran detektoru DI s předzesilovačem pro různé délky kabelu

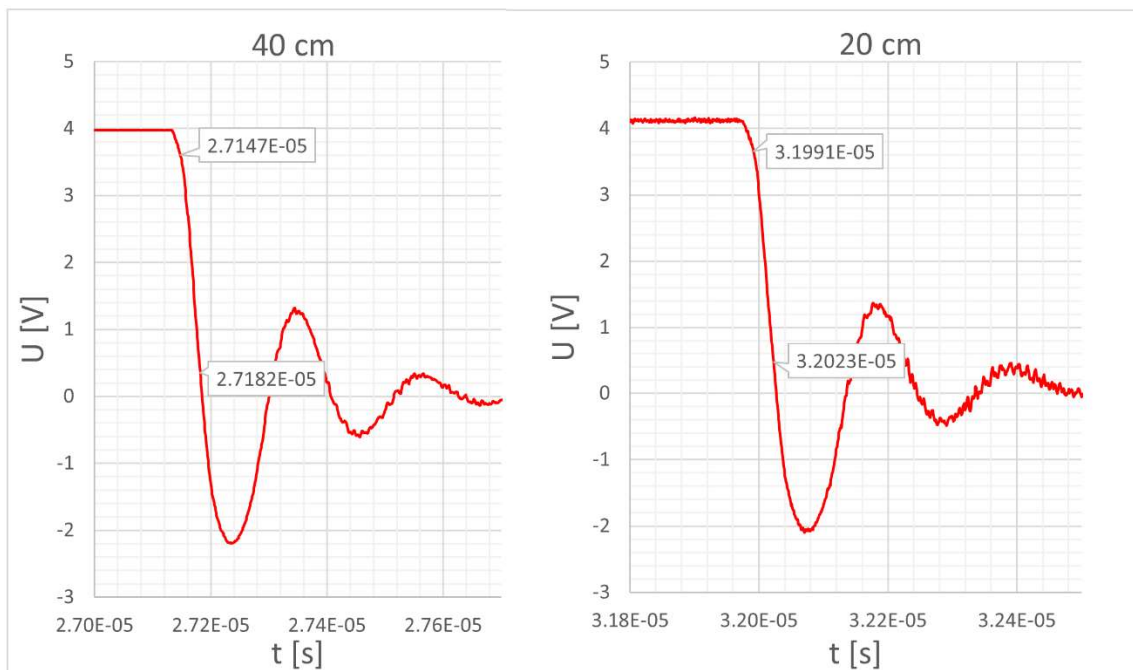


Obrázek 32: Naměřené průběhy sestupných hran detektoru DI s předzesilovačem pro různé délky kabelu

## Detektor Opto Diode

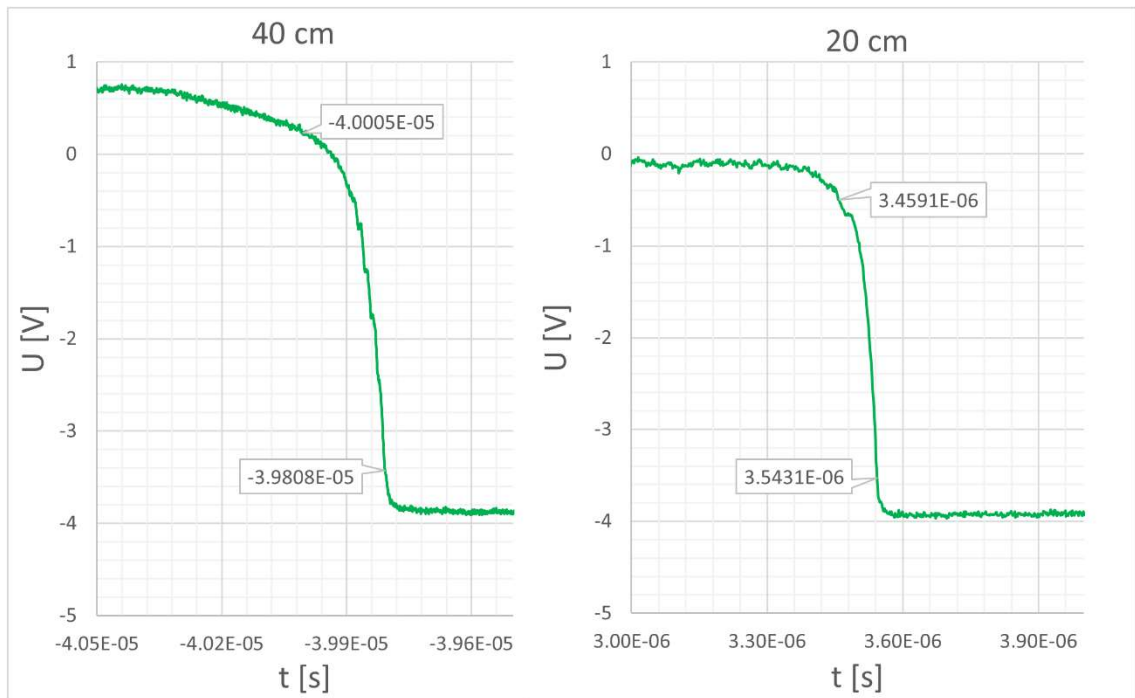


Obrázek 33: Naměřené průběhy nástupných hran detektoru Opto Diode s předzesilovačem pro různé délky kabelu

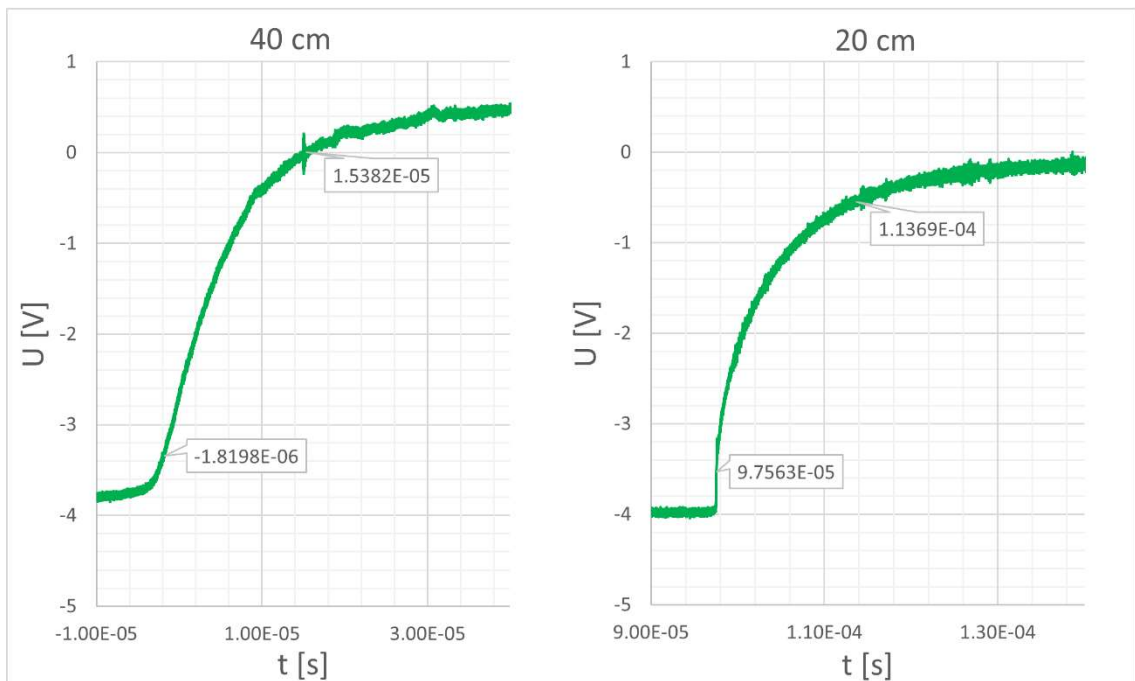


Obrázek 34: Naměřené průběhy sestupných hran detektoru Opto Diode s předzesilovačem pro různé délky kabelu

## Detektor PNdetector



Obrázek 35: Naměřené průběhy nástupných hran detektoru PNdetector s předzesilovačem pro různé délky kabelu



Obrázek 36: Naměřené průběhy sestupných hran detektoru PNdetector s předzesilovačem pro různé délky kabelu

Z vynesných časových průběhů je patrné, že při zapojení kabelu o délce 20 cm je výstupní signál zatížen šumem, který může negativně ovlivnit zkoumané časy. Ze zaznamenaných průběhů byly následně odečteny časy nástupných a sestupných hran a jednotlivé hodnoty byly zaznamenány do tabulky 8.

Tabulka 8: Změřené hodnoty času nástupných a sestupných hran měřených detektorů pro různé délky kabelu

Délka kabelu	DI		Opto diode		Pndetector	
	Nástupná hrana $t_n$	Sestupná hrana $t_s$	Nástupná hrana $t_n$	Sestupná hrana $t_s$	Nástupná hrana $t_n$	Sestupná hrana $t_s$
40 cm	113,4 ns	156,0 ns	141,0 ns	34,4 ns	197,6 ns	17,2 $\mu$ s
20 cm	484,8 ns	146,0 ns	177,6 ns	32,0 ns	84,0 ns	16,1 $\mu$ s

Z odečtených hodnot je patrné, že všechny časy sestupných hran se při kratší délce propojovacího kabelu mezi detektorem a zesilovačem zmenšily. U všech měřených detektorů se jedná zhruba o 7% pokles. Rozdíly u jednotlivých detektorů jsou velice konsistentní a předpoklad snížení časové odezvy při menší parazitní kapacitě kabelu byl potvrzen.

U nástupných hran jsou výsledky různé. U detektoru firmy PNdector došlo k výraznému zkrácení nástupné hrany z  $t_n = 197,6$  ns na  $t_n = 84,0$  ns. Jedná se o více jak 50% pokles času nástupné hrany. U detektorů DI a Opto Diode došlo naopak k nárůstu času nástupných hran. U srovnání časových průběhů nástupných hran detektoru Opto Diode na obrázku 33 je patrné, že při měření s kabelem o délce 20 cm je průběh zatížen šumem, který mohl negativně ovlivnit výslednou odečtenou hodnotu nástupné hrany. U detektoru DI je rozdíl časů nástupných hran razantnější. Při pohledu na srovnání nástupných hran detektoru DI na obrázku 31 je vidět, že při kratší délce kabelu je průběh na začátku nástupné hrany lehce zdeformován, čímž je ovlivněna doba nástupné hrany. Zároveň je vidět, že je signál opět ovlivněn šumem.

## 5.6 Diskuse naměřených výsledků

V experimentální části byly změřeny charakteristiky detektoru DI. Zároveň byla měření provedena i pro další dva komerční detektory. Cílem měření bylo zjistit, zda detektor DI dosahuje svými vlastnostmi podobných výsledků, jako komerční detektory.

Prvním experimentem bylo měření voltampérové charakteristiky, díky které jsme ověřili základní funkci detektoru a změřili proud za temna tohoto detektoru. Proud za temna pro detektor byl  $I_d = 175$  pA. V porovnání s ostatními detektory se jedná o vyšší hodnotu. U proudu za temna je důležité, aby jeho hodnota byla alespoň 1000krát menší než proud vyvolaný dopadajícími elektrony, aby negativně neovlivňoval výstupní signál. Elektronový mikroskop LVEM5, kde se detektor využívá, pracuje na urychlovacím napětí kolem 5 kV. Při tomto napětí, nedosahuje polovodičový detektor vysokého zisku a generovaný proud nemusí splnit podmínku tisícinásobku hodnoty a proud za temna může působit šum na výstupním signálu.

V dalším měření byla zkoumána právě hodnota zesílení v závislosti na energii elektronů. Zde všechny detektory dosahovaly předpokládaných výsledků, a především při vyšších napětích dosahoval detektor DI vysokých hodnot zesílení. Pro mikroskop LVEM5 je důležitá hodnota zesílení při 5kV. Při nízkých napětích pod 8kV začíná zesílení detektoru DI výrazně klesat a při napětí 5kV dosahuje hodnoty 205. Ostatní měřené detektory dosahují při tomto urychlovacím napětí podstatně lepších výsledků a jsou vhodnější pro použití v nízkonapěťových aplikacích.

Následující část byla věnována měření časové odezvy detektoru. Toto měření bylo provedeno ozařováním detektoru pulsním laserem. První měření bylo provedeno pro detektor se standardním zesilovačem, který je použitý u elektronového mikroskopu LVEM5. Výsledný čas sestupné hrany detektoru DI byl  $t_s = 2,76$   $\mu$ s. Hodnota sestupné hrany detektoru od firmy PNdetector  $t_s = 26,22$   $\mu$ s nedosáhla předpokládaných výsledků, a proto bylo provedeno porovnání především s detektorem Opto Diode, jehož hodnota sestupné hrany byla  $t_s = 1,01$   $\mu$ s. Doba sestupné hrany detektoru DI byla asi dvojnásobná oproti tomuto detektoru. Nicméně časy neodpovídaly očekávaným hodnotám sestupných hran detektorů a předpokládá se, že výsledné časy jsou ovlivněny použitým zesilovačem. Bylo tedy provedeno další měření s experimentálním předzesilovačem. Při tomto měření byla stanovena nástupná hrana  $t_n = 113,4$  ns a sestupná hrana  $t_s = 156,0$  ns. Změřená nástupná hrana detektoru DI byla nejrychlejší ze všech detektorů. U Sestupné hrany byla hodnota téměř 5x pomalejší než v případě detektoru od firmy Opto Diode.

Na závěr bylo provedeno měření vlivu parazitní kapacity kabelu na výslednou časovou odezvu. Měření bylo provedeno pro dvě různé délky kabelu, a to pro standardní délku 40 cm, která je použitá v zapojení na elektronovém mikroskopu LVEM5, a pro poloviční délku 20 cm. Zkrácením kabelu na poloviční délku klesne hodnota parazitní kapacity na polovinu. Z naměřených dat je patrné, že pro sestupnou hranu dojde ve všech případech k poklesu času zhruba o 7 %. U nástupných hran nebyly pozorován podobný

trend jako u sestupných hran. U detektoru PNdetector došlo k výraznému poklesu o více jak 50 %. U detektorů DI a Opto Diode došlo naopak k nárůstu v časech nástupných hran, což neodpovídá očekávání. Nicméně z vynesných dat je patrné, že časový průběh je zatížen šumem, který mohl negativně ovlivnit výsledné časy.

Z naměřených charakteristik je patrné, že detektor DI je zcela funkční a jeho aplikace v elektronovém mikroskopu je možná. Některé parametry ovšem nedosahují takových hodnot jako jiné komerčně dostupné detektory. Pro detektor použitý v elektronovém mikroskopu LVEM5 by bylo ideální, snížit proud za temna a zvýšit zisk detektoru. Při nízkém urychlovacím napětí může být detekovaný signál malý a může být zatížen šumem vlivem vyššího temného proudu. Pro zlepšení těchto parametrů by bylo nutné použít jiný polovodičový materiál a optimalizace by byla složitá.

V případě časové odezvy, která je důležitá pro celkovou rychlost rastrování, opět detektor DI nedosáhl výsledků, jako ostatní měření. Nicméně měřením se zesilovačem LVEM5 jsme zjistili, že výstupní signál je ovlivněn samotným zesilovačem a časová odezva by mohla být optimalizována změnou jeho návrhu. Zároveň by bylo možné docílit kratší časové odezvy snížením parazitní kapacity propojovacího kabelu mezi detektorem a zesilovačem jeho zkrácením. Další možností, jak by bylo možné zlepšit časovou odezvu, je použití jiného typu kabelu s menší parazitní kapacitou.

## 6 ZÁVĚR

Cílem práce bylo seznámit se s principem funkce polovodičového detektoru zpětně odražených elektronů a provést měření vybraných charakteristik detektoru firmy Delong Instruments. Zároveň bylo provedeno měření charakteristik dvou dalších komerčně dostupných detektorů, a to SXUVPS1/LP od firmy Opto Diode a BSD-40-4-1-10 od firmy PNdetector.

V teoretické části byl vysvětlen princip funkce elektronového mikroskopu a jeho jednotlivých režimů. Následně byla popsána interakce elektronu s látkou a jednotlivé elektrony a záření, které při interakci vznikají. Byla provedena rešerše různých typů detektorů a popsány jejich výhody a nevýhody. V další části práce byly popsány jednotlivé metody charakterizace polovodičového detektoru, možné způsoby měření jednotlivých charakteristik a předpokládané výsledky.

V experimentální části proběhlo měření vybraných charakteristik detektorů. Nejdříve byla změřena voltampérová charakteristika. Z naměřených charakteristik byl následně odečten proud za temna při nulovém napětí na detektoru. Temný proud detektoru Delong Instruments byl  $I_d = 175 \text{ pA}$ .

Dále byla změřena závislost zisku na urychlovacím napětí primárního svazku. Detektor DI dosahuje při vyšších urychlovacích napětích vysokého zisku. Při nižších urychlovacích napětích zisk klesá, při urychlovacím napětí 5kV, což je urychlovací napětí elektronového mikroskopu LVEM5, dosahuje hodnoty 205.

V další části byla měřena časová odezva detektoru v zapojení se zesilovačem LVEM5. Výsledné časové odezvy všech měřených detektorů neodpovídaly předpokládaným výsledkům, a proto byl experiment zopakován v zapojení s experimentálním předzesilovačem. Při tomto měření již hodnoty odpovídaly předpokladům. Pro detektor DI byla naměřena hodnota nástupné hrany  $t_n = 113,4 \text{ ns}$  a sestupné hrany  $t_s = 156,0 \text{ ns}$ .

V posledním experimentu byl měřen vliv parazitní kapacity propojovacího kabelu na výslednou časovou odezvu. Měření bylo provedeno pro délku 40 cm, používanou u elektronového mikroskopu LVEM5, a pro délku 20 cm. Sestupná hrana detektoru DI při zapojení s kratším kabelem dosáhla času  $t_n = 146,0 \text{ ns}$ . Jedná se asi o 7% zkrácení času. Identických výsledků bylo dosaženo i u časů sestupných hran ostatních detektorů. Časy nástupných hran se výrazně lišily a neodpovídaly předpokládaným výsledkům. Signál byl ovšem zatížen šumem, který zatěžoval výstupní signál a mohl ovlivnit odečítané hodnoty.



## LITERATURA

- [1] KARLÍK, Miroslav. Transmisní elektronová mikroskopie: pohled do nitra materiálů. *Československý časopis pro fyziku*. 2005, **2005**(55), 457- 464.  
Dostupné také z:  
[https://nanoed.tul.cz/pluginfile.php/603/mod\\_resource/content/1/TEM\\_05\\_Karlik.pdf](https://nanoed.tul.cz/pluginfile.php/603/mod_resource/content/1/TEM_05_Karlik.pdf)
- [2] WILLIAMS, David Bernard a C. Barry CARTER. *Transmission electron microscopy: a textbook for materials science*. Second edition. New York: Springer, [2009]. ISBN 978-0-387-76500-6.
- [3] GLEICHMANN, Nicole. SEM vs TEM. *Technology Networks* [online]. 2020, February 25, 2020 [cit. 2021-12-22]. Dostupné z:  
<https://www.technologynetworks.com/analysis/articles/sem-vs-tem-331262>
- [4] HAWKES, Peter W. a John C.H. SPENCE. *Science of Microscopy. Volume I*. Springer, 2007. ISBN 978-0387-25296-4.
- [5] GOLDSTEIN, Joseph I., Dale E. NEWBURY, Patrick ECHLIN, David C. JOY, Charles E. LYMAN, Eric LIFSHIN, Linda SAWYER a Joseph R. MICHAEL. *Scanning Electron Microscopy and X-ray Microanalysis* [online]. Boston, MA: Springer US, 2003 [cit. 2021-12-17]. ISBN 978-1-4613-4969-3. Dostupné z:  
doi:10.1007/978-1-4615-0215-9
- [6] SEILER, H. Secondary electron emission in the scanning electron microscope. *Journal of Applied Physics* [online]. 1983, 54(11), R1-R18 [cit. 2021-12-17]. ISSN 0021-8979. Dostupné z: <https://doi.org/10.1063/1.332840>
- [7] Backscattered electron image, BSE image. *Jeol* [online]. [cit. 2023-04-30].  
Dostupné z:  
<https://www.jeol.com/words/semterms/20190129.113542.php#gsc.tab=0>
- [8] VÍDEŇSKÝ, Ondřej. Analýza bateriových hmot metodami EDS. Brno, 2019.  
Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/119524>.  
Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie. Vedoucí práce Pavel Čudek.
- [9] What is SEM-Cathodoluminescence (SEM-CL)? *Www.horiba.com* [online]. [cit. 2021-12-17]. Dostupné z: [https://www.horiba.com/en\\_en/molecular-spectroscopysem-cathodoluminescence-sem-cl/](https://www.horiba.com/en_en/molecular-spectroscopysem-cathodoluminescence-sem-cl/)

- [10] Auger Electron Spectroscopy. *Physical Electronics* [online]. [cit. 2021-12-18]. Dostupné z: <https://www.phis.com/surface-analysis-techniques/aes.html>
- [11] EVERHART, T. E. a R. F. M. THORNLEY. Wide-band detector for micro-microampere low-energy electron currents. *JOURNAL OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS*. 1960, **1960**(vol. 37), 246-248. Dostupné také z: <https://authors.library.caltech.edu/12086/1/EVEjsi60.pdf>
- [12] ČUDEK, P. Scintilační detektor sekundárních elektronů pro ESEM. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 137 s. Vedoucí dizertační práce doc. Ing. Josef Jiráček, CSc
- [13] POSTEK, Michael T. a Nolan V. FREDERICK. Low-profile high-efficiency microchannel-plate detector system for scanning electron microscopy applications. *Review of Scientific Instruments* [online]. 1990, **1990**(61), 1648-1657 [cit. 2022-11-20]. Dostupné z: <https://aip.scitation.org/doi/pdf/10.1063/1.1141127>
- [14] AUTRATA, R. Backscattered Electron Imaging Using Single Crystal Scintillator Detectors. *Scanning Microscopy* [online]. 1989, **1989**(3), 739-763 [cit. 2022-11-19]. Dostupné z: <https://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2034&context=microscopy>
- [15] AUTRATA, R., P. WALTHER, S. KRIZ a M MÜLLER. A BSE scintillation detector in the (S)TEM. *Scanning* [online]. 1986, **1986**(Vol. 8), 3-8 [cit. 2022-11-15]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/sca.4950080103>
- [16] The Standard BSD - STD-BSD-40-4-1-10. In: *Pndetector* [online]. 2021 [cit. 2022-12-19]. Dostupné z: <https://pndetector.de/products-applications/standard-bsd-module/>
- [17] RADZIMSKI, Zbigniew J. SCANNING ELECTRON MICROSCOPE SOLID STATE DETECTORS. *Scanning Microscopy* [online]. 1987, 1987, 1(3), 975-982 [cit. 2021-12-22]. Dostupné z: <https://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1823&context=microscopy>
- [18] KACZMAREK, Danuta. BACKSCATTERED ELECTRONS TOPOGRAPHIC MODE PROBLEMS IN THE SCANNING ELECTRON MICROSCOPE. *Scanning Microscopy* [online]. 1998, 12(1), 161-169 [cit. 2021-12-21]. Dostupné z: <https://www.ecmjournal.org/smi/pdf/smi98-17.pdf>

- [19] Joel: topographic image, BSE topographic image. *Joel* [online]. [cit. 2021-12-21].  
Dostupné z:  
[https://www.jeol.co.jp/en/words/semterms/search\\_result.html?keyword=BSE%20topographic%20image](https://www.jeol.co.jp/en/words/semterms/search_result.html?keyword=BSE%20topographic%20image)
- [20] OSI OPTOELECTRONIC. *Photodiode Characteristics and Applications* [online]. 2-7 [cit. 2022-12-13]. Dostupné z:  
<https://www.osioptoelectronics.com/application-notes/an-photodiode-parameters-characteristics.pdf>
- [21] SAKIC, Agata, Gerard VAN VEEN, Kees KOOIJMAN, et al. High-Efficiency Silicon Photodiode Detector for Sub-keV Electron Microscopy. *IEEE Transactions on Electron Devices* [online]. 2012, 59(10), 2707-2714 [cit. 2022-12-05]. ISSN 0018-9383. Dostupné z: doi:10.1109/TED.2012.2207960
- [22] FRITZ, G. S., H. S. FRESSER, F. E. PRINS a D. P. KERN. Lateral pn-junctions as a novel electron detector for microcolumn systems. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures* [online]. 1999, 17(6) [cit. 2022-12-07]. ISSN 0734211X. Dostupné z: doi:10.1116/1.591078
- [23] FUNSTEN, H.O., D.M. SUSZCZYNSKY, S.M. RITZAU a R. KORDE. Response of 100% internal quantum efficiency silicon photodiodes to 200 eV-40 keV electrons. *IEEE Transactions on Nuclear Science* [online]. 1997, 44(6), 2561-2565 [cit. 2023-05-03]. ISSN 0018-9499. Dostupné z: doi:10.1109/23.650863
- [24] AXUV/SXUV/UVG: Salient Applications. In: *Optodiode* [online]. 2011 [cit. 2022-12-19]. Dostupné z: [www.optodiode.com](http://www.optodiode.com)
- [25] Belden 83269, Mil-Spec Coax, 50 Ohm, RG-188, 26 AWG Str SCCS, 95% SC Braid, PTFE Tape Jkt, Commercial Non-QPL, Data sheet [online]. 2023 [cit. 2023-05-19]. Dostupné z:  
[https://catalog.belden.com/techdata/EN/83269\\_techdata.pdf?\\_gl=1\\*1fowr6h\\*\\_ga\\*\\_MTE5Mzc4Njg4OS4xNjg0NDg1OTM2\\*\\_ga\\_X6Q7YE8B3L\\*\\_MTY4NDQ4NTkzNi4xLjAuMTY4NDQ4NjAzMC4wLjAuMA](https://catalog.belden.com/techdata/EN/83269_techdata.pdf?_gl=1*1fowr6h*_ga*_MTE5Mzc4Njg4OS4xNjg0NDg1OTM2*_ga_X6Q7YE8B3L*_MTY4NDQ4NTkzNi4xLjAuMTY4NDQ4NjAzMC4wLjAuMA)