



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

NÁVRH ELEKTROCHEMICKÉHO SENZORU PRO MĚŘENÍ ETHANOLU

DESIGN OF AN ELECTROCHEMICAL SENSOR FOR ETHANOL MEASUREMENT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jakub Božek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Alexandr Otáhal, Ph.D.

BRNO 2024



Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Mikroelektronika a technologie**

Ústav mikroelektroniky

Student: Jakub Božek

ID: 230459

Ročník: 3

Akademický rok: 2023/24

NÁZEV TÉMATU:

Návrh elektrochemického senzoru pro měření ethanolu

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Nastudujte problematiku elektrochemického měření ethanolu v roztocích. Zaměřte se na konstrukci senzoru a materiály měřicího elektrodového systému. Navrženou konstrukci elektrodového systému provedeného technologií tlusté vrstvy realizujte na flexibilním substrátu. Provéďte měření ethanolu v roztoku pomocí realizovaného elektrodového systému a zkuste porovnat výsledky s dostupnými metodami v odborných publikacích. Výsledky zpracujte v bakalářské práci.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 5.2.2024

Termín odevzdání: 30.5.2024

Vedoucí práce: Ing. Alexandr Otáhal, Ph.D.

doc. Ing. Pavel Šteffan, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské 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

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou tištěných elektrochemických senzorů a měřením ethanolu v roztoku krve. V teoretické části je popsána problematika senzorů, jejich rozdělení a využití. Dále se práce detailněji zaměřuje na elektrochemické senzory, měření a jejich elektrody. V praktické části jsou potom zhotoveny návrhy senzorů, zhotovení senzorů a provedené měření.

Klíčová slova

Senzory, Elektrochemické senzory, Tlustovrstvá technologie, Voltametrie, Tlustovrstvé senzory elektrody

Abstract

This bachelor thesis deals with printed electrochemical sensors and the measurement of ethanol in blood solution. The theoretical part describes the sensors, their distribution and applications. Then the thesis focuses in detail on electrochemical sensors, measurements and their electrodes. Then, in the practical part, the sensor designs, fabrication of the sensors and the measurements made are presented.

Keywords

Sensors, Electrochemical sensors, Thick film technology, Voltammetry, Thick-film sensors

Bibliografická citace

BOŽEK, Jakub. Návrh elektrochemického senzoru pro měření ethanolu. Brno, 2024. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/160772>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky. Vedoucí práce Alexandr Otáhal.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta: *Jakub Božek*

VUT ID studenta: *230459*

Typ práce: *Bakalářská práce*

Akademický rok: *2023/24*

Téma závěrečné práce: Návrh elektrochemického senzoru pro měření ethanolu

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: 30. května 2024

podpis autora

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu své práce Ing. Alexandru Otáhalovi, Ph.D, za velkou trpělivost, odborné rady, které mi poskytl, při zpracování bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat panu Mgr. Karlovi Lacinovi, Ph.D. za odbornou pomoc a možnost využít odborných měřících přístrojů.

V Brně dne: 30. května 2024

podpis autora

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ	9
1. ÚVOD.....	11
2. SENZORY.....	12
2.1 CHEMICKÉ SENZORY.....	13
3. ELEKTRODOVÝ SYSTÉM.....	15
3.1 REFERENČNÍ ELEKTRODA.....	16
3.2 PRACOVNÍ (FUNKČNÍ) ELEKTRODA.....	16
3.3 POMOCNÁ ELEKTRODA.....	16
3.4 MODIFIKACE POVRCHU ELEKTRODY.....	16
4. VOLTAMETRIE	17
4.1 CYKlickÁ VOLTAMETRIE	17
5. TLUSTOVRSTVÁ TECHNOLOGIE.....	18
5.1 SUBSTRÁTY VYUŽÍVANÉ V TLV	19
5.2 SLOŽENÍ PAST VYUŽÍVANÝ V TLV.....	19
5.3 ROZDĚLENÍ PAST VYUŽÍVANÝ V TLV	19
5.4 TECHNOLOGIE NANESENÍ PASTY.....	20
5.5 VYTVRZENÍ TLV.....	20
6. NÁVRHY SENZORŮ	21
6.1 DVOUELEKTRODOVÝ SENZOR S PŮLKRUHOVOU ELEKTRODOU	21
6.1.1 Vodiví vrstva.....	21
6.1.2 Funkční vrstva.....	21
6.1.3 Izolační vrstva.....	22
6.2 DVOUELEKTRODOVÝ SENZOR S KRUHOVÝMI ELEKTRODAMI.....	22
6.2.1 Vodivá vrstva.....	22
6.2.2 Funkční vrstva.....	23
6.2.3 Izolační vrstva.....	23
7. VÝROBA ELEKTROD	24
7.1 POUŽITÉ MATERIÁLY	24
7.1.1 Použitý substrát.....	24
7.1.2 Vodivá vrstva.....	24
7.1.3 Funkční vrstva.....	24
7.1.4 Krycí vrstva.....	25
7.2 SÍTOTISK.....	26
7.3 ČIŠTĚNÍ SENZORU.....	29
8. VÝSLEDKY A DISKUZE	30
8.1 PŘÍPRAVA MĚŘENÍ.....	30
8.2 MĚŘENÍ PEROXIDU VODÍKU.....	31
8.3 MĚŘENÍ FERRO-FERRI KYANIDU.....	34
8.4 MĚŘENÍ ETHANOLU.....	35

8.5	PROBLÉMOVÉ FAKTORY PŘI VÝROBĚ ELEKTROD	38
9.	ZÁVĚR	40
	LITERATURA	41
	SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	43

SEZNAM OBRÁZKŮ

2.1	Blokové uspořádání chemického senzoru [1]	13
2.2	Struktura chemické senzoru kapalných roztoků [1]	14
3.1	Tlustovrstvý tříelektrodový senzor od firmy Dropsens[3]	15
4.1	Ukázka voltamogramu [5]	17
5.1	Ukázka různých typů tlustovrstvých biosenzorů [8]	18
5.2	Princip sítotisku[9]	20
6.1	Vodivá vrstva dvouelektrodového senzoru s půlkruhovou elektrodou	21
6.2	Funkční vrstva dvouelektrodového senzoru s půlkruhovou elektrodou	21
6.3	Návrh dvouelektrodového senzoru s půlkruhovou elektrodou	22
6.4	Vodivá vrstva dvouelektrodového senzoru s kruhovými elektrodami	22
6.5	Funkční vrstva dvouelektrodového senzoru s kruhovými elektrodami	23
6.6	Návrh dvouelektrodového senzoru s kruhovými elektrodami	23
7.1	Čištění starého fotorezistu ze síta	26
7.2	Síto v ultrazvukové čističce	26
7.3	Pracovna pro nanesení fotorezistu na síto	27
7.4	Vysušená vodivá vrstva na substrátech	28
7.5	Natisknutá izolační vrstva na substrátu	28
7.6	Čistící hadřík s glycerolem	29
8.1	Vyvedené elektrody z přístroje AUTOLAB PGSTAT302N od firmy Metrohm	30
8.2	Měření prováděno v roztoku fosfátového pufru a peroxidu vodíku	31
8.3	Přiblížené měření prováděno v roztoku fosfátového pufru a peroxidu vodíku	31
8.4	Měření prováděno v roztoku fosfátového pufru	32
8.5	Cyklická voltametrie uhlíkové elektrody a uhlíkové elektrody s pruskou modří v roztoku peroxidu vodíku[14]	33
8.6	Měření ferro-ferri kyanidu na uhlíkové vrstvě	34
8.7	Referenční graf cyklické voltametrie ferro-ferri kyanidu [15]	34
8.8	Měření ethanolu prováděno na senzoru s funkční vrstvou z pruské modří v pořadí pufr-oxidáza-ethanol	35
8.9	Měření ethanolu prováděno na senzoru s funkční vrstvou z pruské modří v pořadí pufr-ethanol-oxidáza	35
8.10	Porovnání dvou postupů nanesení roztoků alkohol oxidázy a ethanolu	36
8.11	Cyklický voltamogram závislosti koncentrace ethanolu a proudu[20]	37
8.12	Měření ethanolu prováděno na senzoru s funkční vrstvou z uhlíku v pořadí pufr-oxidáza-ethanol	37
8.12	Porovnání křivek detekce ethanolu na uhlíkové vrstvě na vrstvě s obsahem pruské modří	38
8.13	Pruská modř na senzoru s kruhovými elektrodami	38
8.14	Poničená vodivá vrstva na senzoru s půlkruhovou elektrodou	39

SEZNAM TABULEK

7.1	Parametry stříbrné pasty Ferro 9913[16]	24
7.2	Parametry uhlíkové pasty NCZ-SPI-101[17].....	24
7.3	Parametry polymerní dielektrické pasty 902497-250G[18].....	25

1. ÚVOD

Senzory mají široké uplatnění v celé řadě aplikací, mezi které patří elektrochemická detekce látek v roztocích. Tyto senzory nazýváme chemické a často se využívají v elektroanalytické chemii. Při voltametrickém měření se obvykle využívají tříelektrodové systémy tvořené pracovní, referenční a pomocnou elektrodou.

Tyto snímače můžeme vyrobit i s tlustou vrstvou. Nedosahujeme sice tak miniaturních rozměrů jako u tenké vrstvy, ale stále je hojně využívána v sensorové technice, kde je hlavní důraz kladen na tepelnou a chemickou odolnost a časovou stabilitu těchto vrstev. Tyto senzory se také používají k detekci anorganických a organických látek. Elektrody vyrobené z pasty na bázi uhlíku se používají především pro detekci biologických látek. Tyto pasty se dále modifikují vhodně zvoleným materiálem, kvůli dosažení přesnějšího měření dané veličiny. Mezi tyto materiály patří například nanotrubičky nebo pruská modř.

Bakalářská práce se zabývá návrhem elektrochemických senzorů s tištěnými pracovními elektrodami a problematikou spojenou s návrhem senzoru využívajícího tlustovrstvé technologie. Cílem práce je navrhnout, zpracovat a optimalizovat výrobu senzoru, pro měření ethanolu a peroxidu v daném roztoku.

2. SENZORY

Senzor je zařízení, které detekuje fyzikální, chemickou nebo biologickou vstupní proměnnou a převádí ji podle definovaného principu na výstupní proměnnou, často elektricky kvantitativní[1]

Citlivá část snímače, kterou nazýváme převodník nebo snímač, sleduje stav sledované veličiny. Výstupem je změna měřené veličiny, která je převáděna a dále zpracovávána vyhodnocovacím obvodem snímače. Podobně mohou být kvantitativně naměřené výstupní informace elektrického signálu stále zpracovávány jinými obvody. Cílem je, aby snímač poskytoval informace o měřené veličině přímo, nejlépe v potřebných jednotkách a fungoval bez potřeby uživatele.[1].

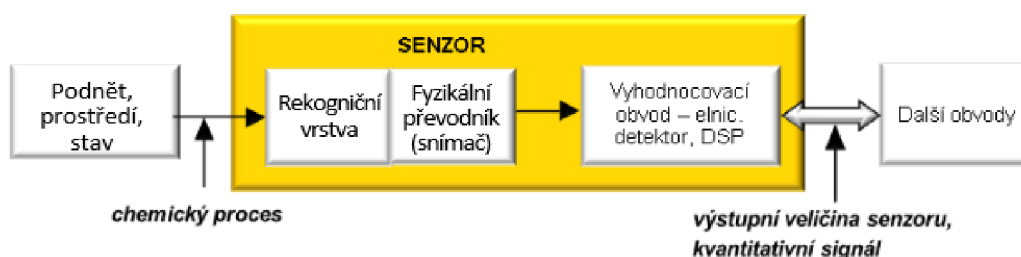
Konstrukce snímačů se liší složitostí. Výstupní proměnné snímače jsou často neelektrické a v případě složitějších snímačů mohou být převedeny na jiné neelektrické proměnné pomocí převodníků. Výstupní signál převodníku je typicky zesílen analogovým zesilovačem, aby byl vhodný pro další zpracování. Zesilovač zajišťuje vzdálenost mezi zesilovačem a snímačem nebo signál a šum způsobený vnějšími podněty, jako jsou elektrická a magnetická pole, a vystavení zemním smyčkám. Pro tyto efekty jsou navrženy speciální zesilovače, které realizují frekvenční omezení signálu, modulaci signálu s následnou synchronní demodulací nebo digitální zpracování signál[1]

Zpracování signálu probíhá pomocí analogových obvodů nebo je signál převeden na digitální a zpracovává jej číslicová technika. Výhodou převodu neelektrických veličin na elektrické je právě následná možnost číslicového zpracování (sčítání, odčítání, násobení, dělení, integrování atd.) a signálových operací (kalibrace, číslicová a analogová filtrace, kmitočtová analýza, atd.) Další výhodou je větší přesnost a citlivost, možnost dálkového měření a rychlost měření. Digitální signál je zpracován pomocí číslicového systému nebo jiného komunikačního rozhraní[1]

2.1 Chemické senzory

Přítomnost chemických prvků charakterizuje příznivý vliv určitého prostředí jak na samotného člověka, tak na různé procesy probíhající na naší planetě (od ekologických po průmyslové), proto je důležité abychom sledovali škodlivé i žádané prvky.

K fyzikálnímu převodníku, který je odporový, kapacitní nebo piezoelektrický je nutná rekogniční část, která umožňuje převod chemické veličiny na fyzikální. Rekogniční vrstva obvykle bývá citlivá vrstva nebo membrána, která bývá selektivní.



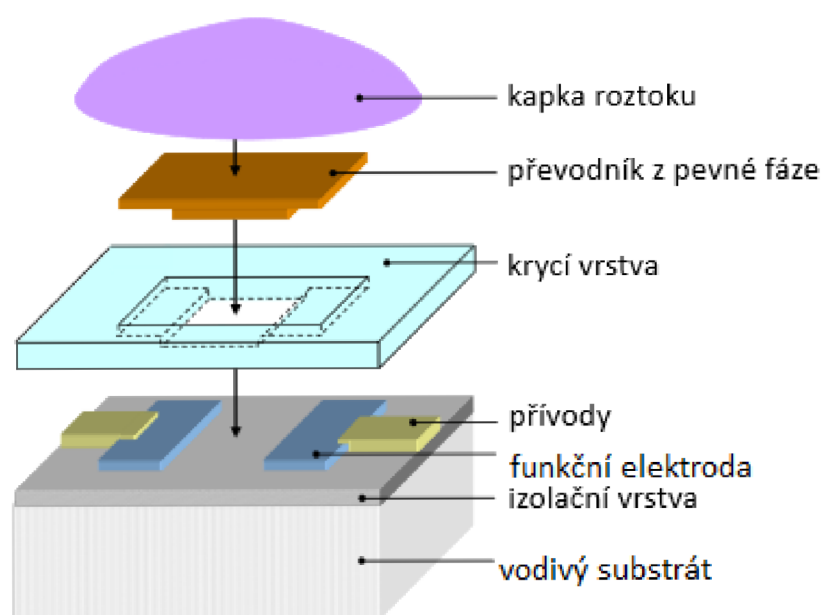
Obrázek 2.1 Blokové uspořádání chemického senzoru [1]

Oblast chemických senzorů je velmi rozsáhlá a je tedy vhodné je rozdělit podle způsobu převodu snímané veličiny na elektrochemické, gravimetrické, teplotní, optické nebo fluorescenční. Elektrochemické senzory mají jako základ elektrochemický převodník, což je fyzikální převodník. Můžeme tedy rekogniční část úplně vypustit – jde o výjimku mezi chemickými senzory, která nám usnadňuje převod.

Převodník je složen z elektrod, mezi nimiž je elektrolyt. Elektrolyt může být v pevném nebo kapalném skupenství, a ve styku s elektrodou převádí neelektrickou veličinu na elektrickou. Tento signál zpracováváme metodou měření, která určuje počet potřebných elektrod, jejich druh, citlivost a měřené parametry.

Každý převodník obsahuje 2 až 4 elektrody na substrátu. Je-li substrát z vodivého materiálu, je zapotřebí nejdříve vytvořit na jeho povrchu nevodivou vrstvu např. pomocí oxidace. Elektrody mají vývody, které nám propojují elektrodu a elektronický detektor.

Tyto vývody musí mít co nejmenší termoelektrické napětí, a proto se používají ušlechtilé kovy jako zlato, stříbro nebo platina. Bude-li tento snímač bude pracovat v kapalinách, je nutné vytvořit krycí vrstvu, která ponechá odkryté pouze elektrody, aby mohli být v kontaktu s roztokem.

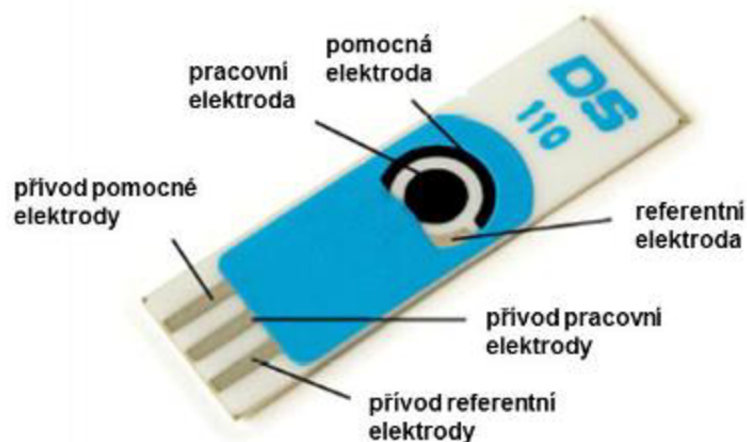


Obrázek 2.2 Struktura chemické senzoru kapalných roztoků [1]

3. ELEKTRODOVÝ SYSTÉM

V elektrochemických rozborech se při voltametrických měřeních využívá elektrochemický článek, tzv. voltametrický článek. Tento systém může být dvou – nebo tříelektrodový. Ve dvouelektrodových systémech se používají pracovní a referenční elektrody, které jsou obvykle spojeny solným můstkem s analyzovaným roztokem. Přidáme-li třetí (pomocnou) elektrodu, dostaneme tříelektrodový systém. Napětí zdroje pracovní a referenční elektrody se měří voltmetrem, proud článkem se měří ampérmetrem. Referenční elektroda není polarizovatelná a její potenciál je konstantní[3]

U dvouelektrodového systému není potenciál přesně znám, protože se část napětí ztratí na odporu analyzovaného vzorku. V praxi se proto častěji využívá tříelektrodové zapojení. Proud prochází mezi pomocnou a pracovní elektrodou a potenciál se měří mezi měřicí a srovnávací elektrodou za bezproudového stavu. Jako zdroj napětí se používá potenciostat, který udržuje potenciál pracovní elektrody na požadované hodnotě. Potenciostat neustále srovnává nastavený potenciál s aktuálně změřeným potenciálem a úbytek napětí na odporu roztoku ihned vyrovnává změnou napětí na pomocné elektrodě.[3]



Obrázek 3.1 Tlustovrstvý tříelektrodový senzor od firmy Dropsens[3]

3.1 Referenční elektroda

Referenční elektroda slouží jako srovnávací bod při měření, respektive nastavuje se na ní potenciál pracovních elektrod. Potenciál je přesně definovaný a nejlépe časově stály. V případě tříelektrodeho senzoru přes ni neprotéká žádný proud. V praxi se využívají argentchloridové elektrody, kalomelová nebo platina se stříbrem.[3][4][5]

3.2 Pracovní (funkční) elektroda

Pracovní elektroda slouží k samotnému měření – Elektroda je polarizovatelná, a stabilní kvůli velkému potenciálovému rozsahu. Z těchto důvodů se využívají ušlechtilé kovy jako zlato, stříbro nebo platina, skelný uhlík, grafit, vodivé polymery a soli. Záleží na využití. Velmi důležitá je úprava povrchu elektrody, která může velmi ovlivnit vlastnosti a výsledky. [3][4][5]

-

3.3 Pomocná elektroda

Pomocné elektrody se vyskytují pouze u tříelektrodeho systému, kde slouží k odvodu proudu z referenční elektrody a tím ji stabilizuje pro měření potenciálu. Je důležité, aby elektroda měla dostatečnou plochu a aby byla elektrochemicky neaktivní. Z těchto důvodů se nejčastěji využívá platina, zlato nebo uhlík. [3][4][5]

-

3.4 Modifikace povrchu elektrody

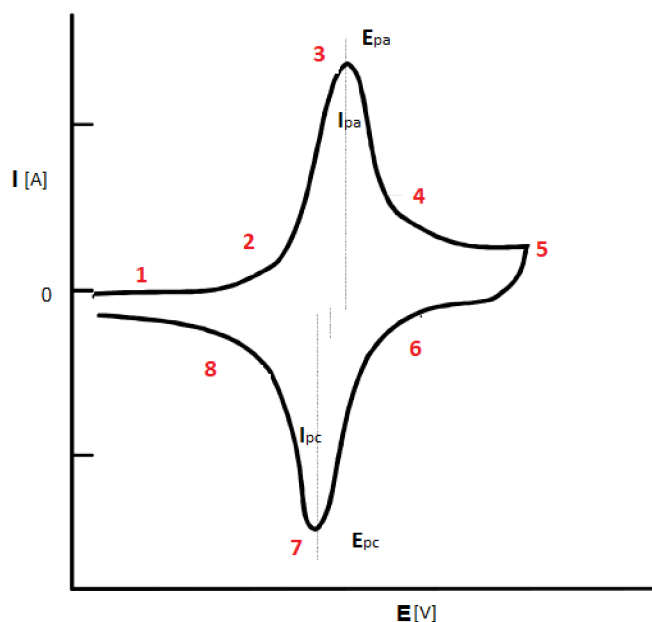
Pokud chceme na elektrochemický senzor modifikovat elektrodu, můžeme to udělat buďto přímo, kdy látku přimícháme rovnou do pasty, nebo můžeme látku zachytit v matici z vodivých a redoxních polymerů

4. VOLTAMETRIE

Voltametrie patří k jedné z nejpoužívanějších technik v elektrochemii. Principem je měření intenzity elektrického proudu pracovní elektrodě, na které se nachází měřený roztok, který se nám mění v závislosti na elektrickém napětí, vnášeném z vnějšího zdroje. Vzniklá křivka se nazývá voltamogram.

4.1 Cyklická voltametrie

Tato metoda je obvykle využívána pro optimalizace elektrod. Průběh potenciálu v čase má tvar trojúhelníku. Napětí lineárně roste z počáteční záporné hodnoty ke kladné, následuje přímý běh (forward scan) až do zlomového bodu (switch) a poté zpětný běh (reverse scan). Důležitým parametrem je rychlost změny potenciálu (reverse scan). [5][6]



Obrázek 4.1 Ukázka voltamogramu [5]

Na obrázku 4.1 je ukázkový voltamogram zobrazující závislost potenciálu a proudu. Děje popisují čísla[5]:

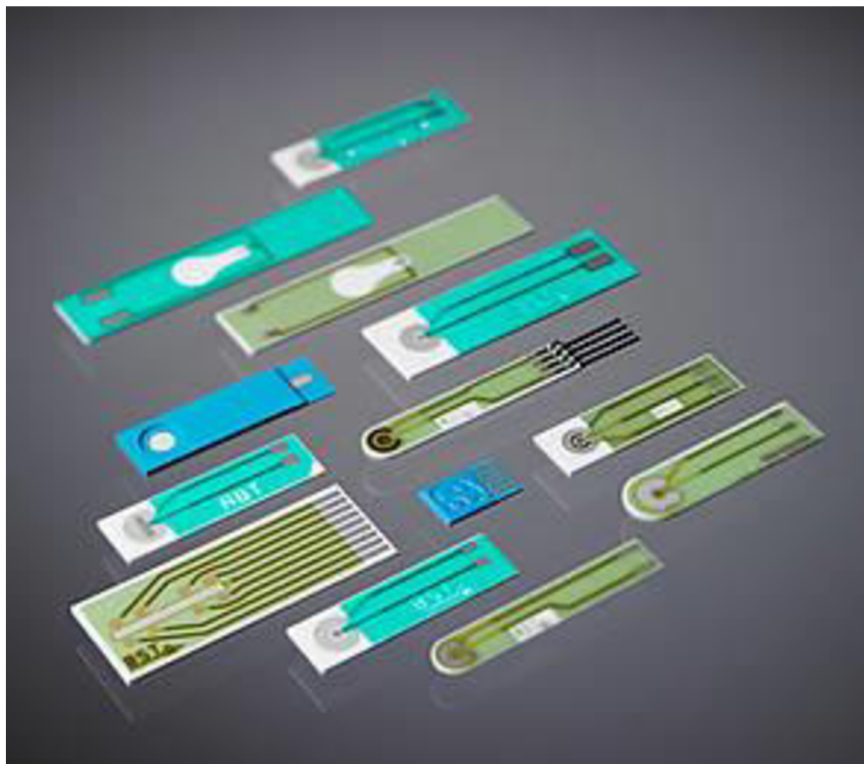
1. Neprobíhá žádný děj (volí se tak, aby neprobíhal žádný redoxní děj)
2. Začátek oxidačního děje – nárůst proudu
3. Maximální proud I_{pa} pro napětí E_{pa}
4. Pokles proudu – málo látky na redukci
5. Mění se směr potenciálu
6. Nárůst potenciálu působící oxidaci, růst záporného proudu
7. Maximální proud I_{pc} pro napětí E_{pc}
8. Pokles anodického proudu ideálně do výchozího stavu

5. TLUSTOVRSTVÁ TECHNOLOGIE

Tlustovrstvá technologie je efektivní metoda pro výrobu biosenzorů, která využívá nanášení past nebo inkoustů obsahujících aktivní materiály na substráty pomocí tiskových technik, jako je sítotisk. Tento proces zahrnuje přípravu pasty, tisk, sušení a kalcinaci, což vede k vytvoření robustních a vodivých vrstev. Tato technologie nabízí výhody, jako je nízká cena, flexibilita při volbě substrátů (např. sklo, keramika, plasty), a možnost hromadné produkce.[7]

Elektrochemické biosenzory vyrobené tlustovrstvou technologií využívají tiskové elektrody, které mohou být vyrobeny z materiálů jako uhlík, zlato nebo stříbro. Bioreceptory, jako enzymy nebo protilátky, jsou imobilizovány na těchto elektrodách, což umožňuje specifickou detekci analytů. Tlustovrstvé technologie jsou využívány i při výrobě optických biosenzorů, kde se tisknou optické prvky obsahující fluorescenční nebo chemiluminiscenční značky.[7]

Praktické aplikace zahrnují glukometry pro měření glukózy v krvi, senzory pro detekci těžkých kovů ve vodě a biosenzory pro identifikaci patogenů v klinických a environmentálních vzorcích. Tlustovrstvá technologie tedy poskytuje cenově dostupné a flexibilní řešení pro výrobu různých typů biosenzorů s širokým spektrem použití.[7]



Obrázek 5.1 Ukázka různých typů tlustovrstvých biosenzorů [8]

5.1 Substráty využívané v TLV

Substráty můžeme rozdělit podle dvou hlavních typů TLV technologie[1]:

- Cermetová TLV technologie (CTF) – Používají se skla na anorganické bázi, suroviny složené z keramiky a mají vysokoteplotní vypalovací proces (500 °C–1000 °C)
- Polymerní TLV technologie (PTF) – Založena na polymerech a jejich sloučeninách s nízkou vytvrzovací teplotou (100 °C–200 °C)

Pro CTF tedy jako substráty využíváme keramiku, sklo, nerezová ocel a pro PTF využíváme substráty na polymerní bázi nebo FR4[1].

5.2 Složení past využívaný v TLV

Materiály, které se využívají pro TLV jsou k dispozici ve formě past. Tyto pasty mají 3 hlavní složky[1]:

- Funkční složka – Prášek, který je tvořen ušlechtilými kovy, kovovými oxidy nebo keramikou a sklem v dielektrických a skelných pastách
- Tavnivová složka – Tvoří vazbu mezi funkční složkou a substrátem při výpalu za využití nízkotavných skel s teplotou měknutí kolem 600°C.
- Nosič – Dodává pastě tixotropní vlastnosti, které jsou důležité pro sítotisk (Rozpouštědla, epoxidy)

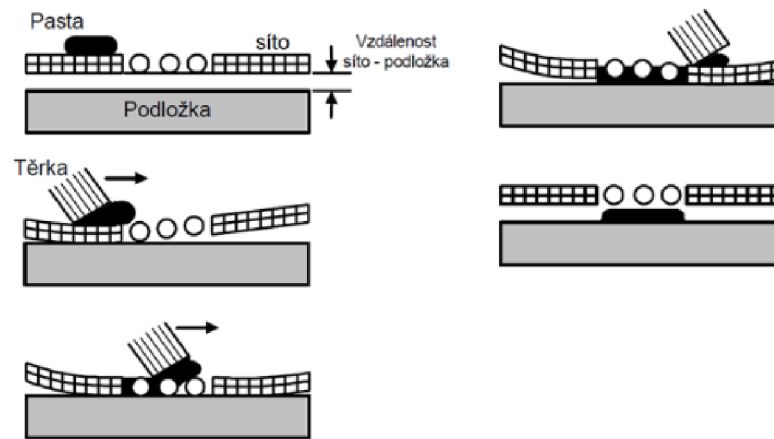
5.3 Rozdělení past využívaný v TLV

Podle funkce vrstvy dělíme pasty: [1]:

- Vodivé pasty – Jsou to pasty, jejichž vrstva se stane vodivou až po vytvrzení a její vodivou složkou jsou prášky ušlechtilých kovů (Ag, Au, Pt, Pd).
- Odporové pasty – Funkční složkou těchto past jsou oxidy vzácných kovů (RuO_2 , $\text{Bi}_2\text{Ru}_2\text{O}_7$) nebo uhlík.
- Dielektrické pasty – Funkční složkou dielektrický je nejčastěji BaTiO_3 a tyto pasty se používají pro výrobu TLV kondenzátorů
- Izolační pasty – Tyto pasty nemají funkční složku a jejich hlavní funkce je izolace vodivých drah a ochrana před působením vnějších vlivů

5.4 Technologie nanesení pasty

U TLV máme několik možností nanesení pasty na substrát, a to dispensní tisk, šablonotisk a nejvíc využívaný sítotisk. Sítotisková šablona je tkanina v kovovém rámu, která nám udává výsledný obrazec vytvořený na substrátu. Výroba takového síta začíná s napnutím síťoviny na rám. Síťovina je vyrobena ze syntetických vláken a musí být odolná vůči oděru. Dále se na síto nanese světlocitlivá emulze na kterou se osvitem okopíruje tiskový motiv z předlohy. Poté se na síto z horní strany nanese pasta a třetkou, která při svém pohybu prohýbá síto přetáhne přes síto, která natiskne na substrát daný motiv.[9]



Obrázek 5.2 Princip sítotisku[9]

5.5 Vytvrzení TLV

Po nanesení pasty se pasta nechává vysušit v teplotách mezi 50-200°C, aby se z pasty odpařili zbytky kapalin. Díky tomuto tvrzení se poté pasta zafixuje na substrátu a je připravená na další práci. U některých past je tohle posledním krokem ve výrobě, ale jiné pasty je potřeba ještě dotvrdit buďto v přepalovací peci nebo UV světlem.

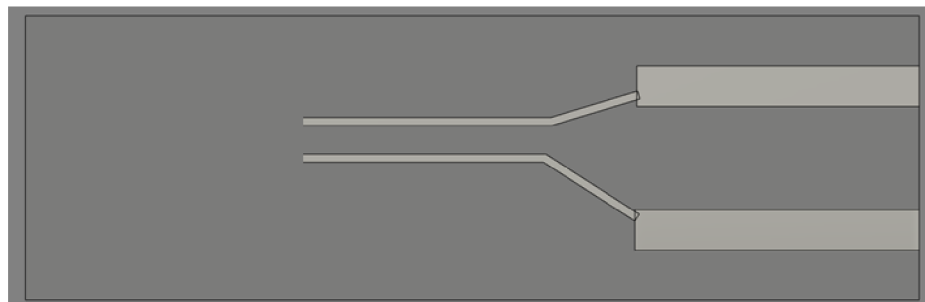
6. NÁVRHY SENZORŮ

Návrhy senzorů byly zpracovány v programu Autocad od firmy Autodesk. Elektrody byly navrženy podle konzultace s vedoucím a podle konzultace s panem Mgr. Karlem Lacinou, Ph.D. Elektrody jsou biamperometrickém setupu, což znamená, že obě elektrody jsou ze stejného materiálu a fungují jako funkční elektrody v různém čase cyklické voltametrie.

6.1 Dvouelektrodový senzor s půlkruhovou elektrodou.

6.1.1 Vodivá vrstva

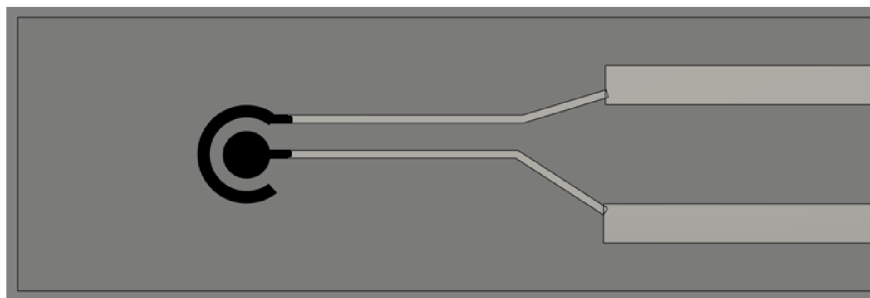
Při návrhu dvouelektrodového senzoru s půlkruhovou elektrodou bylo nutné zajistit, aby vzdálenost kontaktů byla od sebe maximálně 2.54 mm a navržený půlkruh musel mít danou plochu stejně velkou jako kruh uvnitř. Vývody od elektrod jsou stejně široké jako půlkruhová elektroda Tento návrh byl inspirován senzory Dropsens [4]



Obrázek 6.1 Vodivá vrstva dvouelektrodového senzoru s půlkruhovou elektrodou

6.1.2 Funkční vrstva

Na vodivou vrstvu byla poté nanášena funkční vrstva, která měla přesah 1 mm po stranách a měla přesah se stříbrnou vrstvou zhruba 1mm. Přesah byl zvolen mimo stříbrnou elektrodu, aby nedošlo k prosáknutí měřené látky na stříbrnou vrstvu.



Obrázek 6.2 Funkční vrstva dvouelektrodového senzoru s půlkruhovou elektrodou

6.1.3 Izolační vrstva

Izolační vrstvou se poté překryla vodivá vrstva a zůstali odkryty jenom kontakty a elektrody s funkční vrstvou.



Obrázek 6.3 Návrh dvouelektrodového senzor s půlkruhovou elektrodou

6.2 Dvouelektrodový senzor s kruhovými elektrodami

6.2.1 Vodivá vrstva

Při návrhu dvouelektrodového senzoru s kruhovými elektrodami bylo nutné zajistit, aby vzdálenost kontaktů byla od sebe maximálně 2.54 mm.



Obrázek 6.4 Vodivá vrstva dvouelektrodového senzor s kruhovými elektrodami

6.2.2 Funkční vrstva

Na vodivou vrstvu byla poté nanášena funkční vrstva, která měla přesah 1 mm po stranách a měla přesah se stříbrnou vrstvou zhruba 1mm. Přesah byl zvolen mimo stříbrnou elektrodu, aby nedošlo k prosáknutí měřené látky na stříbrnou vrstvu.



Obrázek 6.5 Funkční vrstva dvouelektrodeového senzoru s kruhovými elektrodami

6.2.3 Izolační vrstva

Izolační vrstvou se poté překryla vodivá vrstva a zůstali odkryty jenom kontakty a elektrody s funkční vrstvou.



Obrázek 6.6 Návrh dvouelektrodeového senzoru s kruhovými elektrodami

7. VÝROBA ELEKTROD

V této části je popsána samotná výroba tlustovrstvý senzorů a použité pasty.

7.1 Použité materiály

7.1.1 Použitý substrát

Od začátku byla práce směřována k polymerním pastám a polymerním substrátům. Po srovnání a konzultaci s vedoucím jsme se rozhodli, že jako substrát použijeme polykarbonát kvůli jeho ceně a dostupnosti.

7.1.2 Vodivá vrstva

Jako vodivou vrstvu jsme zvolili stříbnou pastu 9913 od firmy Ferro a to kvůli její polymerní struktuře a dostupnosti.

Tabulka 7.1 Parametry stříbné pasty Ferro 9913[16]

Viskozita při 25°C [Pas]	225±25
Sušení při teplotě 125°C	10-15 minut
Rezistivita [mΩ/□]	≤ 3

7.1.3 Funkční vrstva

Jako materiál pro funkční vrstvy byly použity 2 pasty a to uhlíková pasta NCZ-SPI-101 od firmy Nanochemazone a uhlíková pasta s obsahem Pruské modři. Pruská modř se používá pro detekci peroxidu vodíku.

Tabulka 7.2 Parametry uhlíkové pasty NCZ-SPI-101[17]

Viskozita při 25°C [Pas]	5.8
Sušení při teplotě 100°C	10 minut
Rezistivita [mΩ/□]	10

7.1.4 Krycí vrstva

Jako krycí vrstvu jsme použili polymerní dielektrickou pastu 902497-250G od firmy Sigma-Aldrich

Tabulka 7.3 Parametry polymerní dielektrické pasty 902497-250G[18]

Viskozita při 25°C [Pas]	12.0–16.0
Sušení při teplotě 125°C	10-15 minut

7.2 Sítotisk

Jako první bylo třeba očistit a přichystat síta. Celkově bylo použito 6 sít: 2 pro vodivou vrstvu, 2 pro funkční vrstvu a 2 pro krycí vrstvu. Ze sít se pomocí ředidla určeného na fotosensitivní film musel smýt starý fotorezist a poté se síta dala do ultrazvukové čističky.

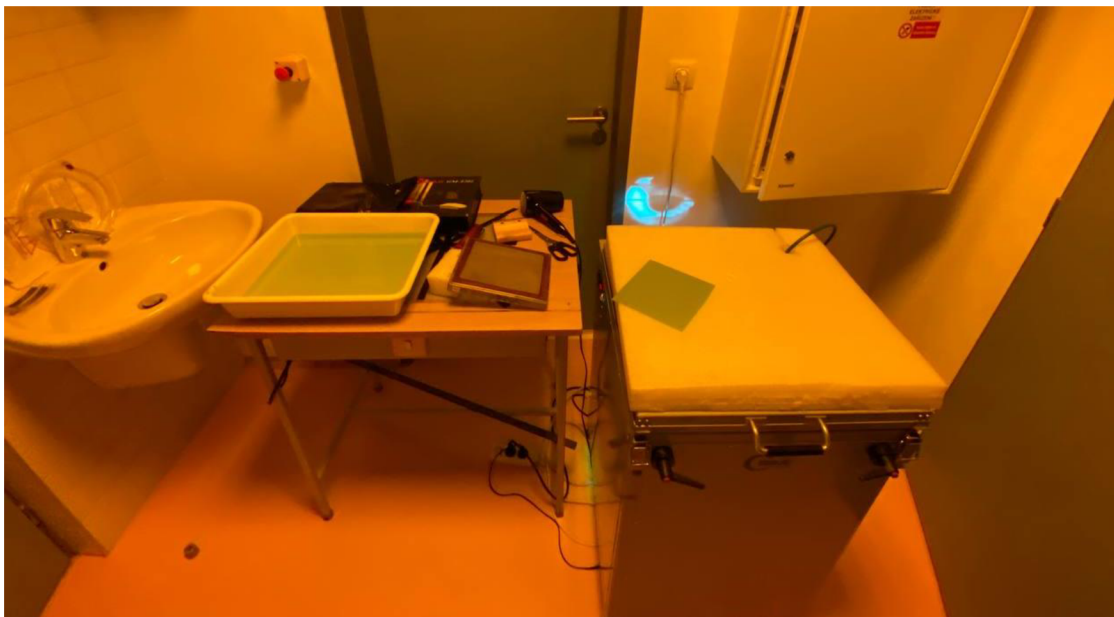


Obrázek 7.1 Čištění starého fotorezistu ze síta



Obrázek 7.2 Síto v ultrazvukové čističce

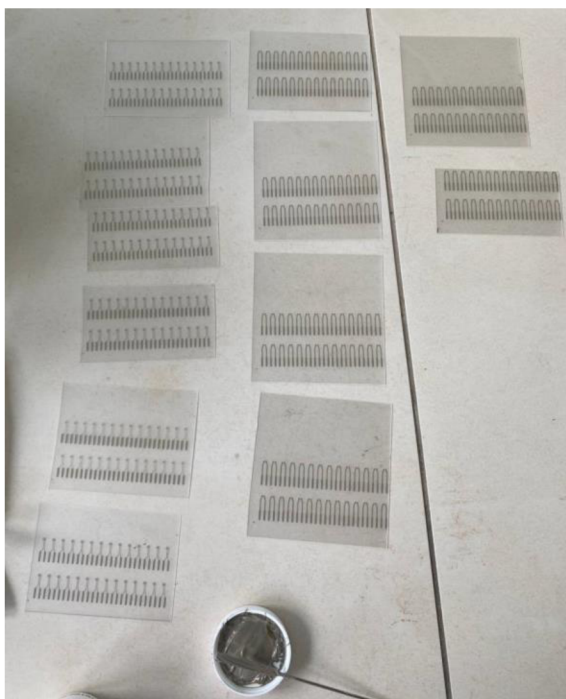
Po očištění sít jsme si nachystali filmové motivy z návrhu a fotorezisty. Motivы jsme na síto přenášeli osvitem filmu na fotorezist. Po osvětlení jsme film sejmuli a očistili fotorezist od neosvětlených částí.



Obrázek 7.3 Pracovna pro nanesení fotorezistu na síto

Po nachystání všech sít jsme si nachystali pasty a substráty. Pasty jsme důkladně promíchali a substráty očistili, abychom měli homogenní vrstvu bez nečistot. Pro každou funkční vrstvu jsme tiskli 2 substráty, tedy 2 uhlíkové s půlkruhovou elektrodou, 2 půlkruhové elektrody s pruskou modří, 2 uhlíkové s kruhovými elektrodami, 2 kruhové elektrody s pruskou modří.

Před samotným tiskem jsme museli důkladně nastavit sítotiskové zařízení (odtřh těžky, přítlačná síla) a zajistit substrát, aby se při tisku nepohyboval. Po nastavení se již přešlo na samotný tisk a jako první se tiskla stříbrná vodivá vrstva. Po natisknutí osmi substrátů se dali vysušit do sušičky na 30 minut při 125°C.



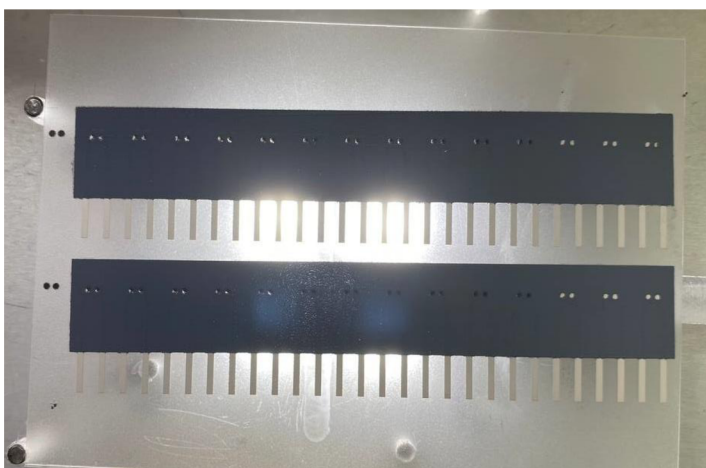
Obrázek 7.4 Vysušená vodivá vrstva na substrátech



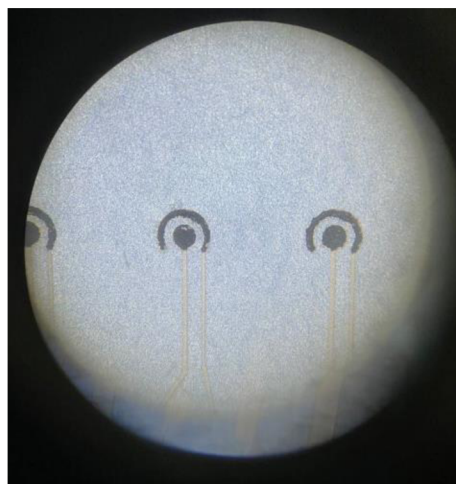
Obrázek 7.8 Způsob nanášení pasty

Po vysušení se přešlo na nanášení funkčních vrstev. Tato vrstva se srovnávala se stříbrnou vrstvou pomocí sesazovacích značek, avšak ty nebyly vždycky viditelné a u pár substrátů se tato vrstva nepovedla natisknout přesně. Tyto vrstvy se poté dali sušit na 30 minut při 80°C.

Jako poslední se tiskla izolační vrstva, která překryla všechno kromě kontaktů a elektrod s funkčními pastami. Tato pasta se sušila na 30 minut při 80°C.



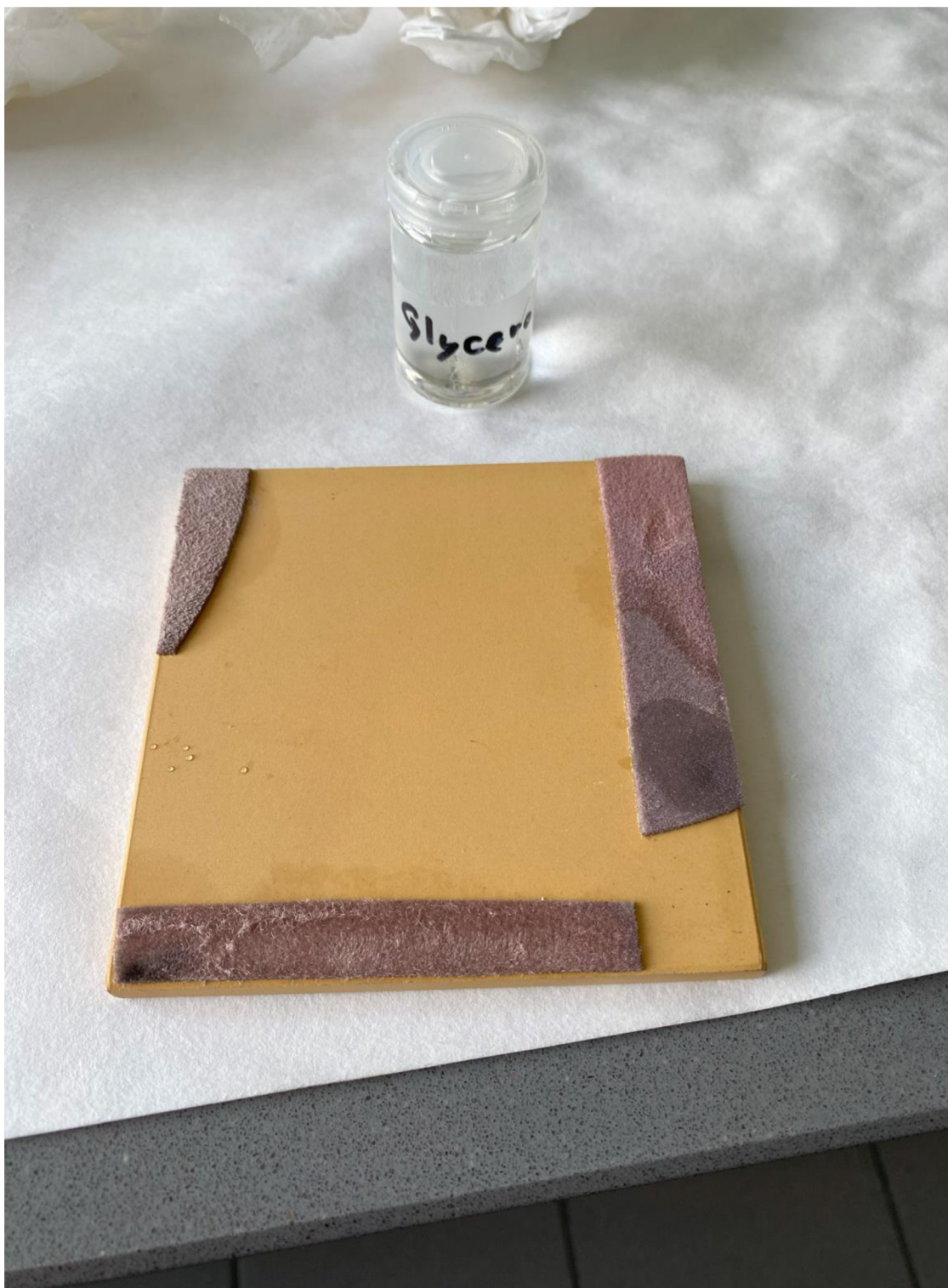
Obrázek 7.5 Natisknutá izolační vrstva na substrátu



Obrázek 7.8 Natisknutá uhlíková vrstva

7.3 Čištění senzoru

Před měřením byly ještě senzory očištěny a to za použití glycerolu naneseném na leštící hadřík MicroCloth od firmy Buehler.



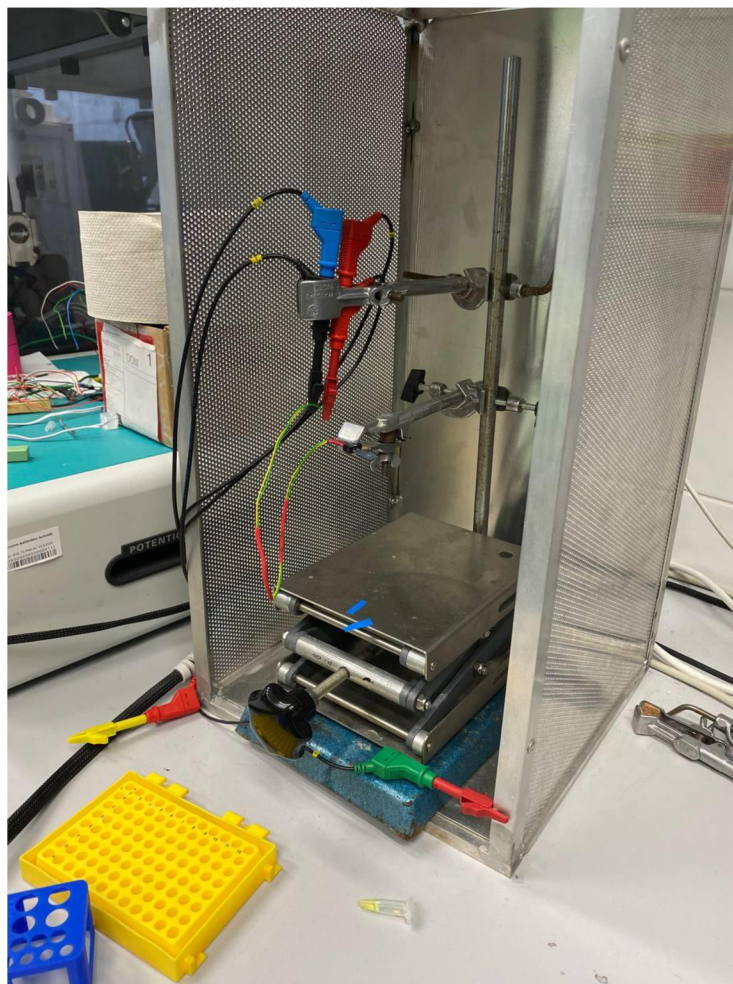
Obrázek 7.6 Čistící hadřík s glycerolem

8. VÝSLEDKY A DISKUZE

8.1 Příprava měření

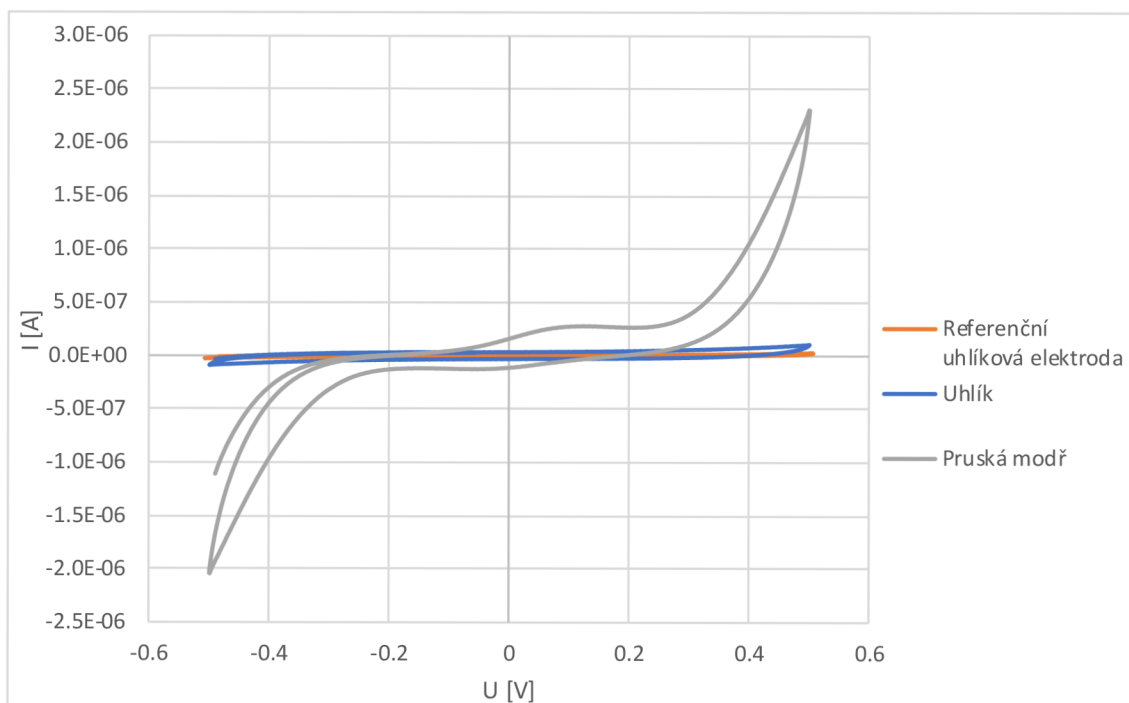
Měření bylo provedeno ve výzkumném centru CEITEC na území Masarykovy Univerzity za odborného dohledu pana doktora Laciny. Jako měřicí přístroj bylo použito zařízení AUTOLAB PGSTAT302N od firmy Metrohm, jenž vyrábí senzory značky Dropsens. [4].

Měření bylo prováděno v několika roztocích a to fosfátový pufr (10 mM fosfátového pufru a 139 mM NaCl) do kterého se následně přidával peroxid vodíku v koncentraci 22 mM a jako další roztok byl použit 1mM Ferro-ferri kyanidu Jako finální roztok se použil 10l fosfátového pufru, do kterého jsme přidali 1 μ l AOX a poté postupně přidávali po 2 μ l CH_3CH_2OH a po každém přidání ethanol jsme sledovali změnu grafu.

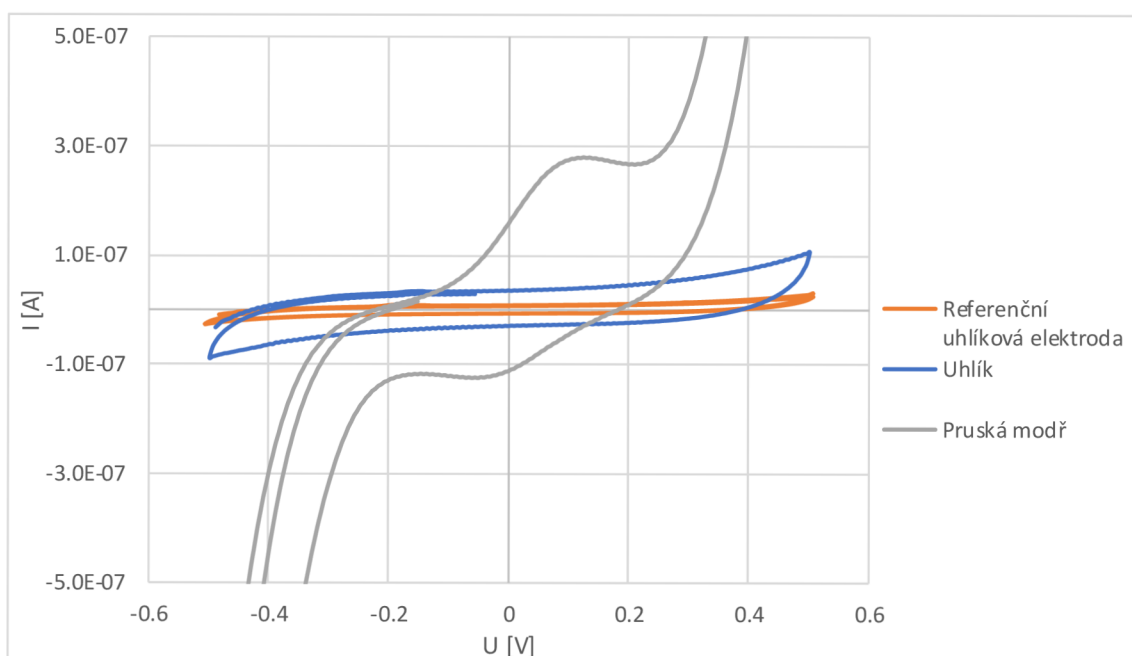


Obrázek 8.1 Vyvedené elektrody z přístroje AUTOLAB PGSTAT302N od firmy Metrohm

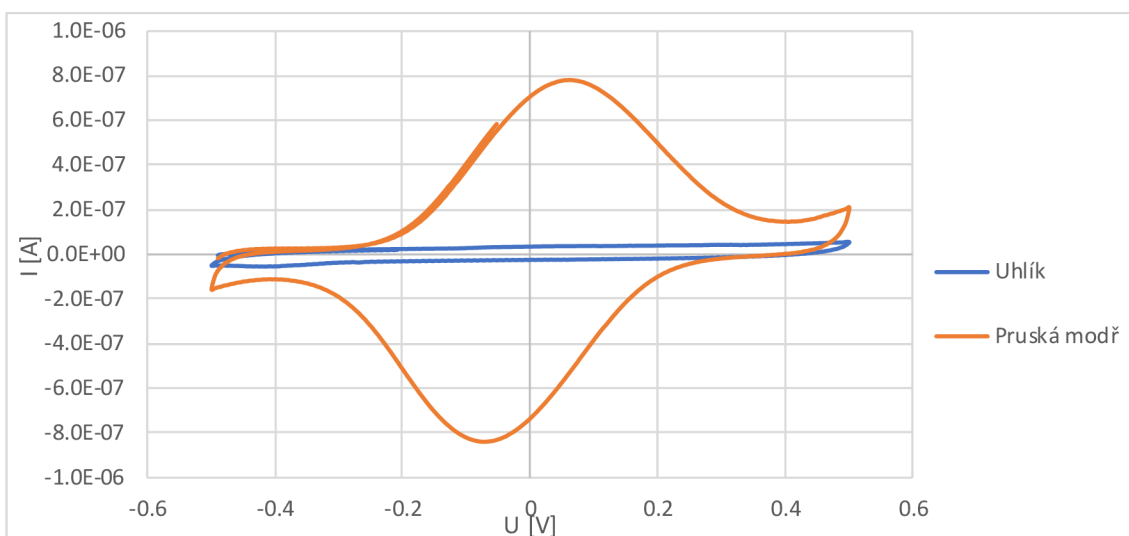
8.2 Měření peroxidu vodíku



Obrázek 8.2 Měření prováděno v roztoku fosfátového pufru a peroxidu vodíku



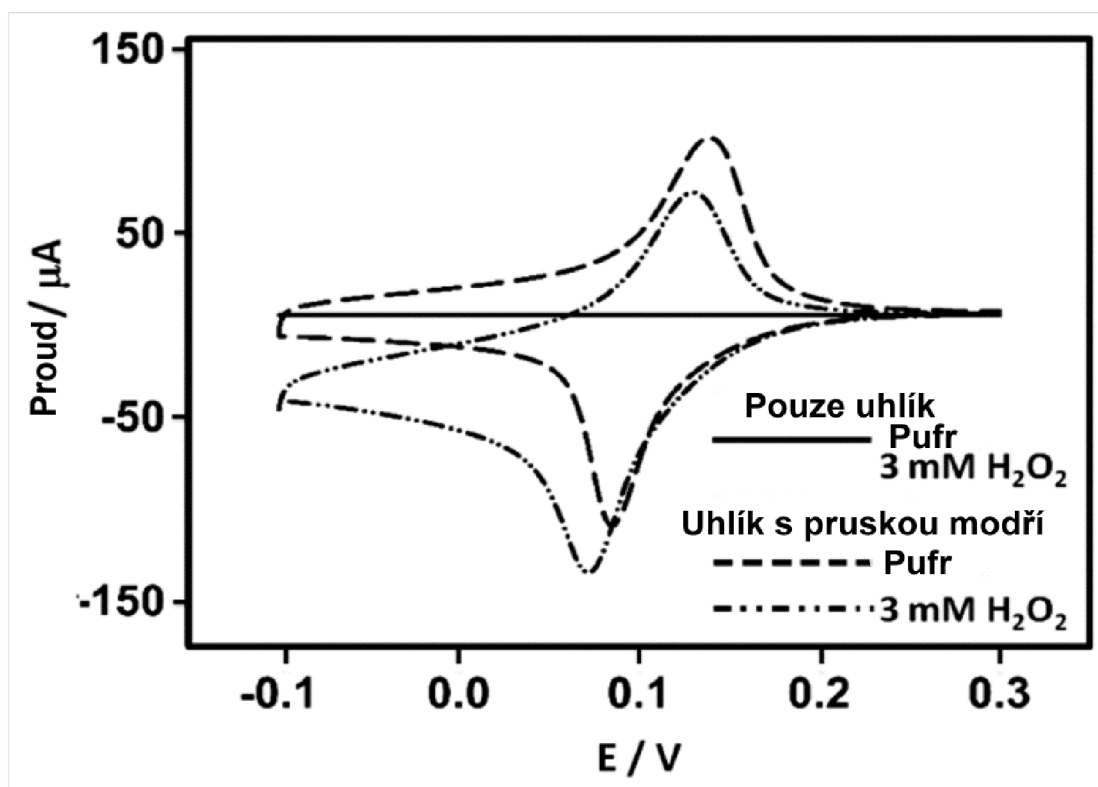
Obrázek 8.3 Přibližné měření prováděno v roztoku fosfátového pufru a peroxidu vodíku



Obrázek 8.4 Měření prováděno v roztoku fosfátového pufru

Na obrázku 8.4 můžeme poté vidět porovnání obou senzorů a jejich různé chování ve fosfátovém pufru. Obě křivky mají naprosto odlišné tvary, ze kterých již můžeme usoudit, že každá slouží k měření jiných veličin. Uhlíková vrstva budou sloužit k běžnému měření a ke kontrolním měření, kdežto vrstva s pruskou modří nám poté slouží k detekci peroxidu vodíku

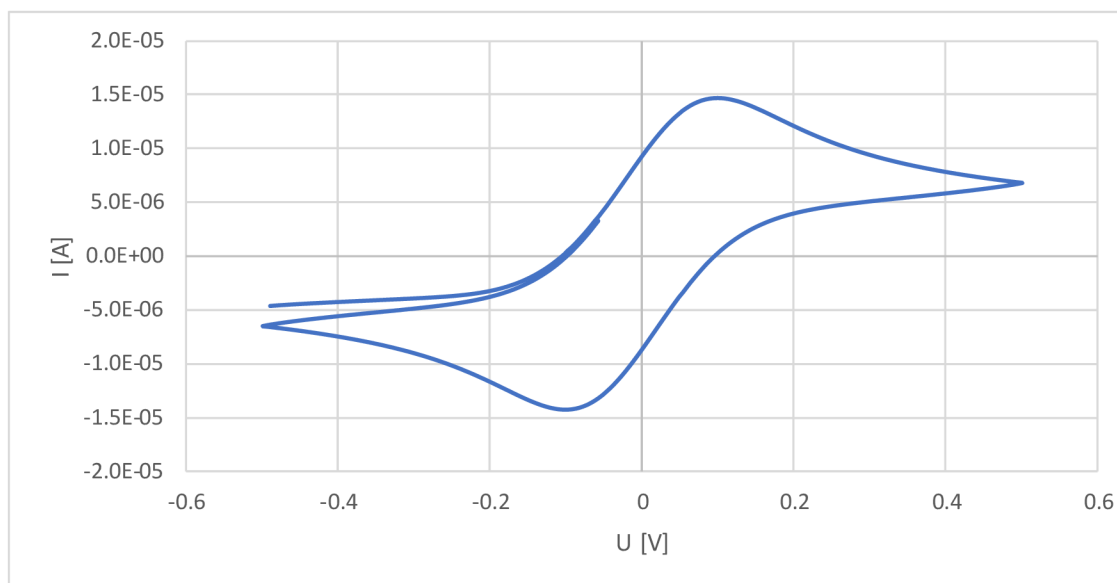
Z obrázku 8.3 můžeme určit, jak se dané funkční vrstvy chovají v roztoku a peroxidu vodíku. Během této reakce dochází k redukci peroxidu vodíku na vodu. Zde si můžeme potvrdit to, že u obou uhlíkových elektrod se nám tvar mění pouze v oblastech, kde jsme použili největší potenciály, u vrstvy s pruskou modří můžeme vidět zajímavější změnu křivky. Na obrázku 8.2 můžeme vidět jak se nám křivka v porovnání s obrázkem 8.4 zúžila, ale zároveň její konce se nám znatelně zvedly. Díky rozdílu těchto konců od původní křivky jsme do určité míry schopní množství peroxidu vodíku v pufru.



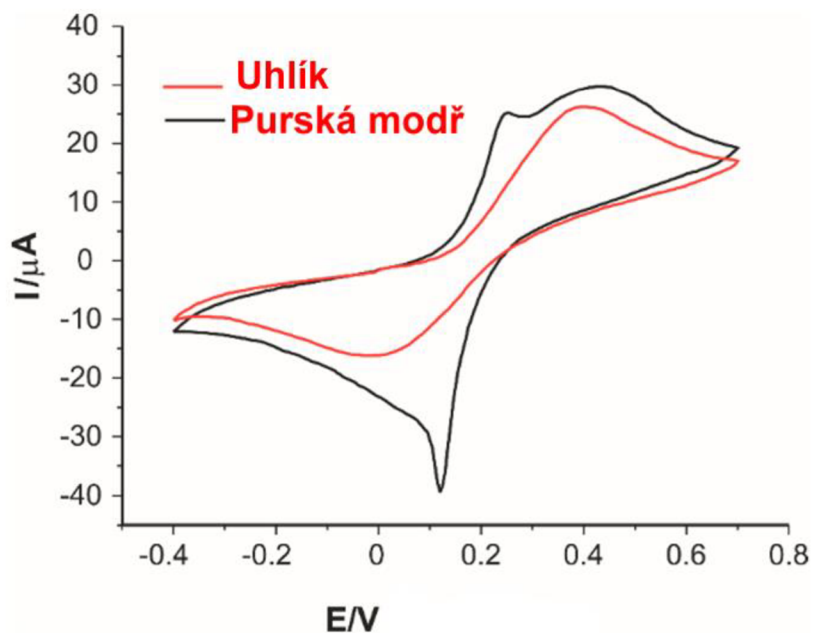
Obrázek 8.5 Cyklická voltametrie uhlíkové elektrody a uhlíkové elektrody s pruskou modří v roztoku peroxidu vodíku[14]

Na obrázku 8.5 poté vidíme referenční graf vyrobených senzorů, jednoho čistě s uhlíkovou elektrodou a druhého s uhlíkovou elektrodou, do které byla přimíchána pruská modř. Opět vidíme, že samotná uhlíková elektroda nemá žádnou reakci, ale jakmile k elektrodě přidáme pruskou modř tak již vidíme reakci. Tento graf je s použitím pouze 3mM peroxidu vodíku, ale vidíme podobu v daném průběhu.

8.3 Měření ferro-ferri kyanidu



Obrázek 8.6 Měření ferro-ferri kyanidu na uhlíkové vrstvě

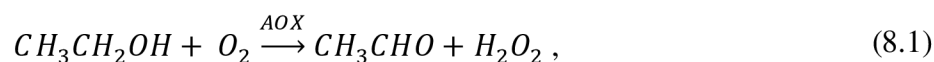


Obrázek 8.7 Referenční graf cyklické voltametrie ferro-ferri kyanidu [15]

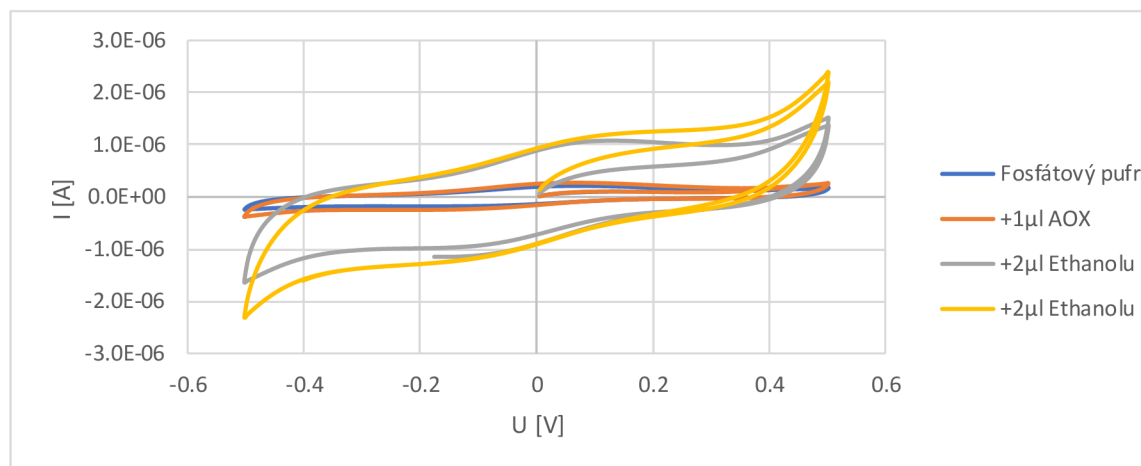
U měření Ferro-ferri kyanidu opět vidíme podobný průběh jako byl naměřený na vyrobených senzorech s porovnatelnou přesností. V křivce můžeme vidět jak se nám postupně roztok redukuje a poté oxiduje. Tato redoxní reakce nám poté mění tvar křivky oproti měření, kde jsme použili pouze fosfátový pufr.

8.4 Měření ethanolu

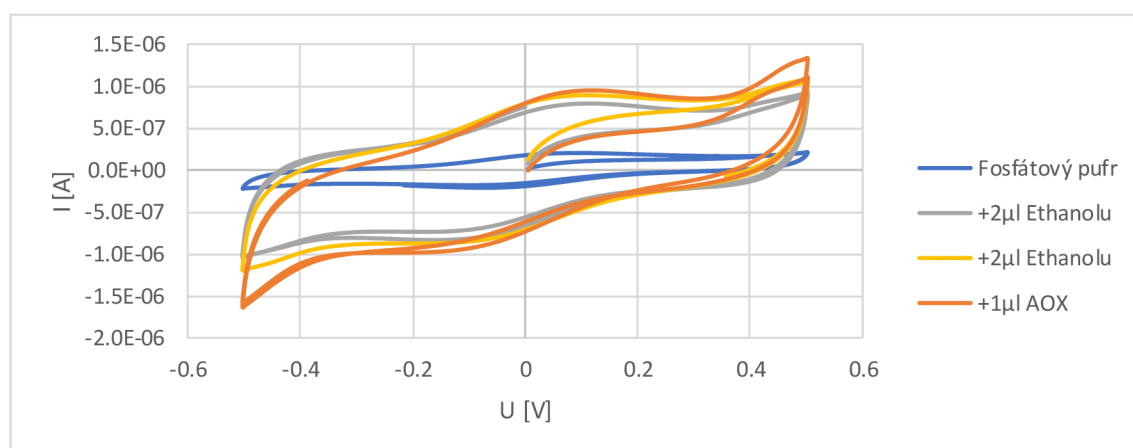
Princip oxidázových biosenzorů je založen na oxidaci substrátu za současné redukce kyslíku na peroxid vodíku v přítomnosti enzymu oxidázy (např. Alkohol oxidáza – AOX). V případě ethanolu se jedná o katalyzovanou oxidaci za přítomnosti kyslíku na acetaldehyd a peroxid vodíku jak je vidět v rovnici (8.1).[19]



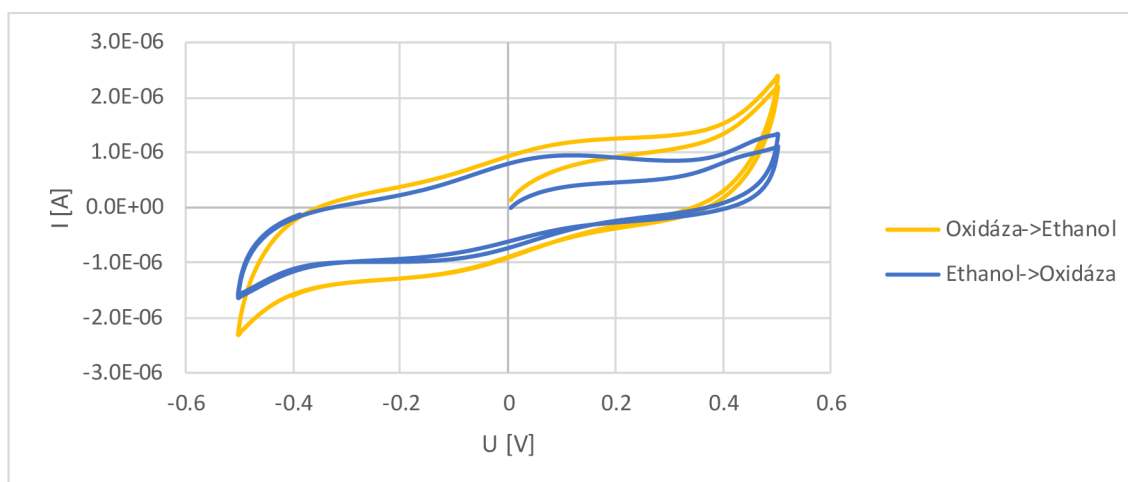
Při měření jsme vyzkoušeli 2 různé postupy nanesení roztoků na senzor. Při první metodě jsme začínali s fosfátovým pufr, do kterého jsme poté přidali ethanol a jako poslední jsme přidali alkohol oxidázu. Pro druhou metodu jsme zvolili opačný postup. Opět jsme začali s fosfátovým pufr, do kterého jsme jako první přidali alkoholovou oxidázu a poté přidávali ethanol. Po každém přidání byl roztok pořádně promíchán.



Obrázek 8.8 Měření ethanolu prováděno na senzoru s funkční vrstvou z pruské modři v pořadí pufr-oxidáza-ethanol



Obrázek 8.9 Měření ethanolu prováděno na senzoru s funkční vrstvou z pruské modři v pořadí pufr-ethanol-oxidáza

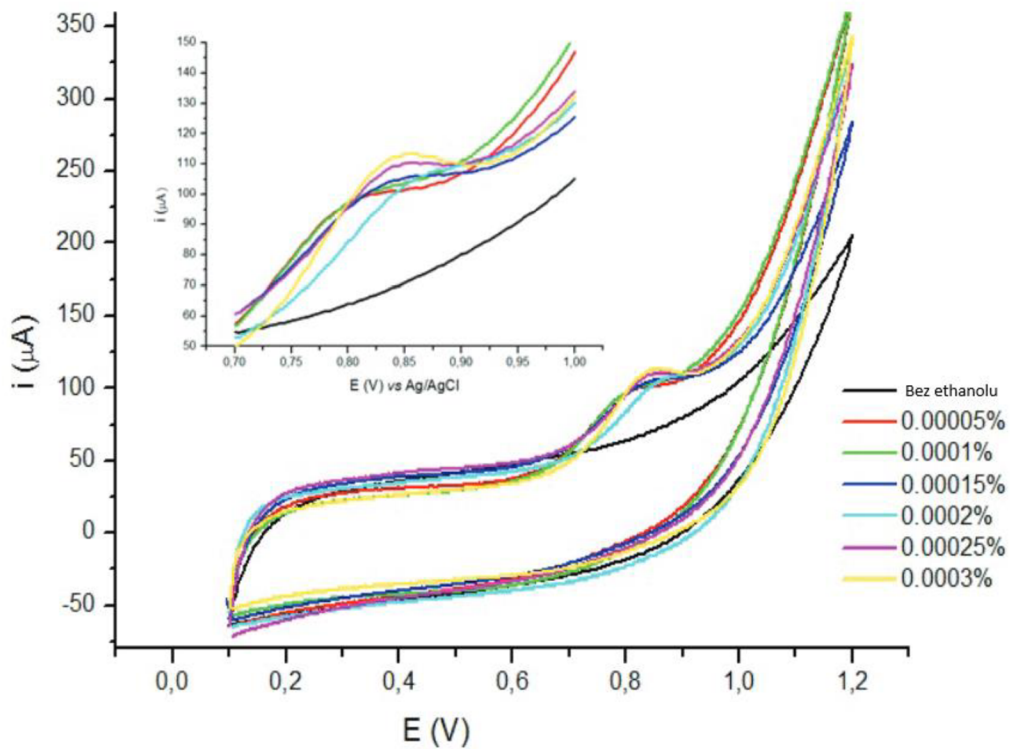


Obrázek 8.10 Porovnání dvou postupů nanesení roztoků alkohol oxidázy a ethanolu

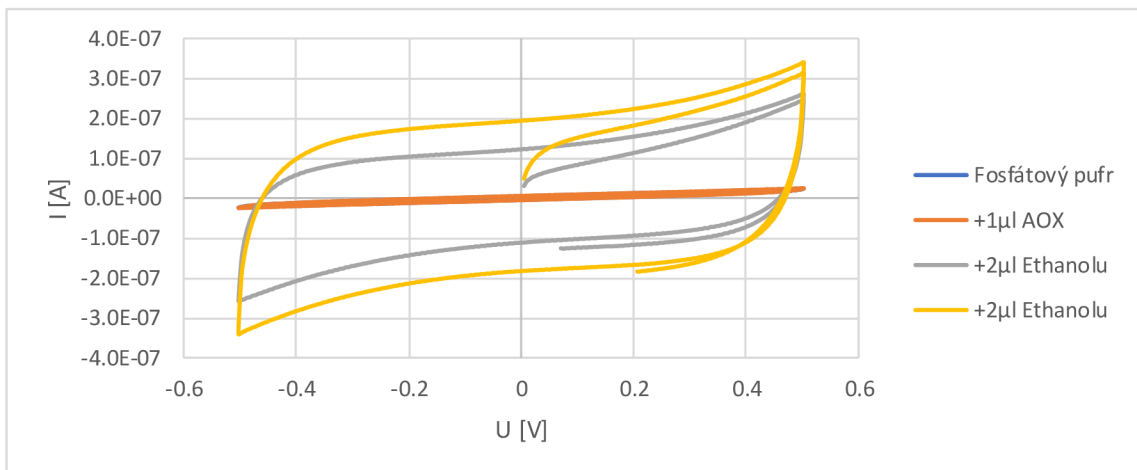
Z obrázku 8.8 můžeme vidět, jak se nám postupně měnila křivka. Na začátku v roztoku pufru se nám křivka chovala, stejně jako u předchozího měření čistě ve fosfátovém pufru. Tato křivka se nám příliš nezměnila ani po přidání oxidázy, avšak když jsme do roztoku přidali ethanol, tak se nám křivka rozšířila a po krajích se nám vytvořila špička. S přidáním dalších 2 μ l ethanol se nám křivka ještě rozšířila a špička ještě zvětšila. Právě rozdíly těchto špiček od původního roztoku nám ukazují množství ethanolu v roztoku.

V obrázku 8.9 můžeme vidět, že nám senzor do nějaké úrovně reaguje i s ethanolem, avšak tato křivka se nám téměř nezmění po přidání oxidázy na rozdíl od prvního postupu, kde jsme prvně dali oxidázu.

Porovnání obou postupů máme potom na obrázku 8.13, kde můžeme vidět, že se nám oxidace ethanolu projevila daleko více a rozdíl je celkem markantní. Z toho lze usoudit, že metoda, kde se prvně do pufru dá alkohol oxidáza je lepší pro detekci ethanolu.

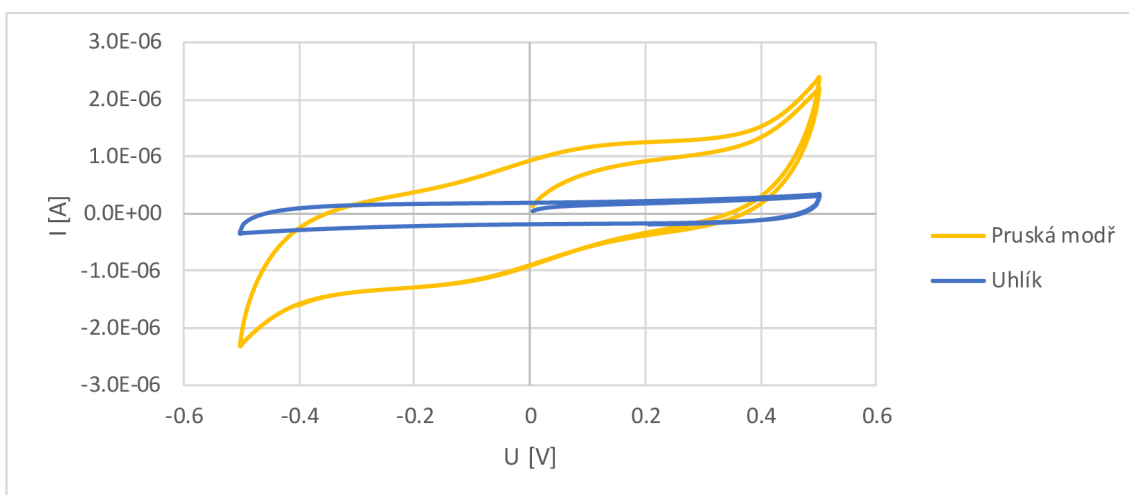


Obrázek 8.11 Cyklický voltamogram závislosti koncentrace ethanolu a proudu[20]



Obrázek 8.12 Měření ethanolu prováděno na senzoru s funkční vrstvou z uhlíku v pořadí pufr-oxidáza-ethanol

Z obrázku 8.13 můžeme vidět, že křivka se nám chová velmi podobně jako u senzoru s pruskou modří, avšak reakce na peroxid vodíku je menší jako u předchozích grafů.

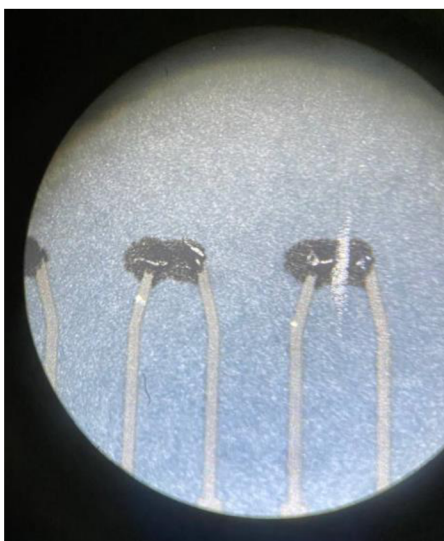


Obrázek 8.13 Porovnání křivek detekce ethanolu na uhlíkové vrstvě na vrstvě s obsahem pruské modři

Z předešlých měření jsme zjistili, že pro měření peroxidu vodíku se nám jako lepší jeví pruská modř. Na obrázku 8.13 můžeme vidět, že sice křivka s čistým uhlíkem se nám jeví jako přesnější, ale to je způsobeno tím, že uhlíková vrstva má daleko menší reakci na peroxid vodíku. Proto je lepší použít funkční vrstvu s pruskou modří, jejíž reakce na peroxid byla daleko znatelnější.

8.5 Problémové faktory při výrobě elektrod

Při finálních kontrolách natisknutých a vysušených senzorů jsme zaznamenali pár problémových faktorů. Jako první problém jsme zaznamenali, že tixotropní vlastnosti pruské modři zapříčinili rozlití pasty přes obě elektrody a tím pádem je vyzkratovala.

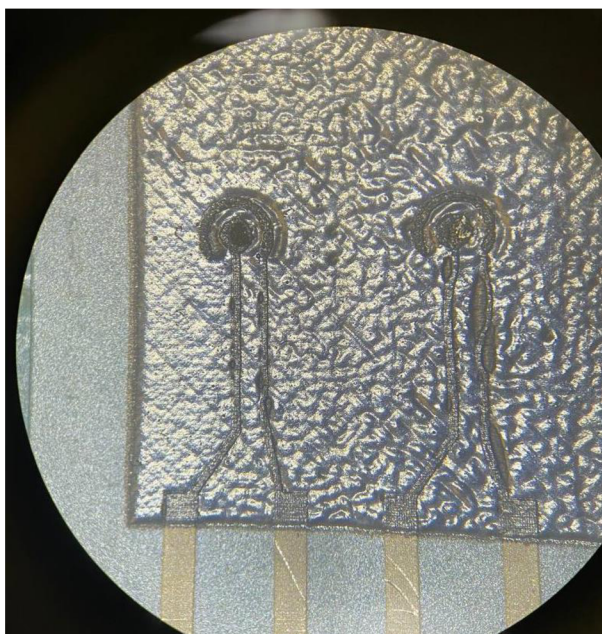


Obrázek 8.14 Pruská modř na senzoru s kruhovými elektrodami

Takto natisknuté elektrody se nedali použít, a i při pokusu vrstvu modři mezi elektrodami očistit jsme se nedostali k výsledku, který by byl vyhovující.

Jako další problémová část se ukázala technologie tisku funkční a vodivé pasty přes sebe. Po vysušení jde vidět, jak přes funkční vrstvu prosakuje stříbrná vrstva, což zapříčinilo oxidaci stříbra a při měření jde vidět, jak tato oxidace narušila přesnost měření. Tento jev můžeme vidět na obrázku 8.4. Tomuto jevu se dá zabránit tím, že samotné odkryté elektrody budou pouze z funkční vrstvy a překrytí funkční a vodivé vrstvy nastane pod krycí vrstvou

Jako další kritický jev se ukázalo vysušení past, a to hlavně stříbrné a krycí pro senzory s půlkruhovou elektrodou. Při této kombinaci se nám stříbrná a krycí vrstva difundovali do sebe a díky úzké přívodní elektrodě se tyto cesty poškodili a zničili.



Obrázek 8.15 Poničená vodivá vrstva na senzoru s půlkruhovou elektrodou

Tomuto jevu se dá zabránit tím, že vodivé cesty budou širší a správným natisknutím a vysušením obou past.

9. ZÁVĚR

Tato práce pojednává o tlustovrstvé technologii a její využití pro výrobu elektrochemických senzorů, které slouží na měření ethanolu v krvi. V teoretické části se pojednává o teorii senzorů, samotné tlustovrstvé technologii, která se při výrobě elektrochemický senzorů hojně využívá a větší část je zaměřena přímo na elektrochemické senzory a jejich využití v reálném životě.

V návrhové části se práce zabývá správným nastavením a správným sestrojením senzorů. Při návrhu byla dodržena návrhářská pravidla pro tvoření motivu. V výrobní části se práce zabývá samotným zhotovením senzorů a technologií sítotisku tlustých vrstev na flexibilní substrát. V této kapitole byl vysvětlen postup od čištění síta až po samotné vysoušení hotového senzoru.

V poslední části byly zhotovené senzory porovnány s již používanými senzory a byly diskutované problémy v návrhu a při samotném tisku. Senzory se podařilo navrhnout a vyrobit dostatečně kvalitně na to, aby se dané měření dalo porovnávat s komerčně dostupnými alternativami i přesto, že se senzory tiskly na polykarbonát, a nikoliv na keramiku, na kterou se v převážné většině tisknou. Také se nám v porovnání grafů ukazuje výhoda biamperimetrického setupu, kdy se nám grafy sice pohybují po osách, ale pohybují se souměrně a samotné měření je tedy méně závislé na různých podmínkách pro různé elektrody. Při měření ethanolu jsme došli k tomu, že aditivum pruské modři do uhlíkové pasty je zásadní pro měření ethanolu, díky její schopnosti detekovat vodík. K samotné detekci je ale nutné ještě senzor modifikovat alkohol oxidázou, která nám zoxiduje ethanol na vodík. Senzory jako takové byly schopné detekovat různé množství ethanolu a je tedy možné s nimi dále pracovat. Jako poslední se práce zabývá problémy, které mohou vzniknout při samotném tisku, ale také rovnou při návrhu senzoru. Tlustovrstvé senzory na ohebném polykarbonátovém substrátu jsou velmi moderní a díky jejich ceně a jednoduchosti se dá představit budoucnost, kde takové senzory má každý doma a může si provádět základní měření doma s nějakým přibližným vyhodnocením.

LITERATURA

- [1] HUBÁLEK, J.; DRBOHLAVOVÁ, J.; PRÁŠEK, J.; BUŠINOVÁ, P.; BENDOVÁ, M. Mikrosenzory a mikromechanické systémy. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012
- [2] Druhy senzorů. In: *Smlease Design* [online]. [cit. 2022-12-15]. Dostupné z: <https://www.smlease.com/entries/automation/what-are-different-types-of-sensors-and-their-applications>
- [3] HUBÁLEK, Jaromír, Jana DRBOHLAVOVÁ a Zdenka FOHLEROVÁ. *Elektronika a biosenzory* [online]. Brno, 2015 [cit. 2022-12-15]. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/priloha_fs.php?dpid=117199&skupina=dokument_priloha. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ.
- [4] Tlustovrstvý tříelektrodový systém. *Metrohm DropSens* [online]. [cit. 2022-12-14]. Dostupné z: <http://www.dropsens.com/en/home.htm>
- [5] SKLÁDAL, P. Biosensory. Brno: Přírodovědecká fakulta Masarykovy univerzity, 2002
- [6] VYCHODILOVÁ, Z. Vývoj elektrochemické metody pro analýzu PCR ampliconů vybraných genomových sekvencí. Brno: Přírodovědecká fakulta Masarykovy univerzity, 2011
- [7] “ Ve 200 slovech popiš využití tlustovrstvé technologie pro výrobu biosenzorů.” navazující prompt k uvedení zdrojů. ChatGPT, verze z 13. 2., OpenAI, 9. 3. 2023, chat.openai.com/chat.
- [8] *Bio Sensor Technology Accessories*. Online. Bio Sensor Technology. Dostupné z: <http://www.bst-biosensor.de/en/products/accessories/>. [cit. 2024-01-22].
- [9] SOUKUP, Luděk. *TLUSTÉ VRSTVY – TISK, VYTVRZENÍ, MĚŘENÍ* [online]. In: . [cit. 2022-12-16]. Dostupné z: <https://adoc.pub/tluste-vrstvy-tisk-vytvrzeni-meni.html>
- [10] Biosensor application of screen-printed carbon electrodes modified with nanomaterials and a conducting polymer: Ethanol biosensors based on alcohol dehydrogenase [online]. [cit. 2022-12-16]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925400516310267#bib0080>
- [11] Electrooxidation of NADH on Modified Screen-Printed Electrodes: Effects of Conducting Polymer and Nanomaterials [online]. [cit. 2022-12-16]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001346861500612X>
- [12] *Comparison of commercial-available graphite inks used to fabricate amperometric screen printed electrodes for biosensors* [online]. [cit. 2022-12-16]. Dostupné z: https://www.oamk.fi/kirjasto/elektroniset_aineistot/julle/Nissinen_Comparison.pdf
- [13] *SunChemical Gwent C209I208D1 Carbon Graphite Ink* [online]. [cit. 2022-12-16]. Dostupné z:

- <https://www.matweb.com/search/datasheettext.aspx?matguid=158e82d78b3f4e55a437a9c176ca6998>
- [14] Cinti, S.; Arduini, F.; Moscone, D.; Palleschi, G.; Killard, A.J. Development of a Hydrogen Peroxide Sensor Based on Screen-Printed Electrodes Modified with Inkjet-Printed Prussian Blue Nanoparticles. *Sensors* **2014**, *14*, 14222-14234. <https://doi.org/10.3390/s140814222>
- [15] Gunache, R.O.; Apetrei, C. Determination of Diosmin in Pharmaceutical Products with Chemically Modified Voltammetric Sensors. *Int. J. Mol. Sci.* **2021**, *22*, 7315. <https://doi.org/10.3390/ijms22147315>
- [16] *CERMET SILVER CONDUCTOR 9913*. Online. CERMET SILVER CONDUCTOR 9913. Dostupné z: http://www.feixintrading.com/sites/default/files/products/pdf_files/9913.pdf. [cit. 2024-05-29].
- [17] NANOCHEMAZONE. *Carbon Screen Print Ink*. Online. Dostupné z: <https://www.nanochemazone.com/product/carbon-screen-print-ink/>. [cit. 2024-05-29].
- [18] SIGMA-ALDRICH. *Polymer dielectric grey for screen printing*. Online. Dostupné z: <https://www.sigmaaldrich.com/CZ/en/product/aldrich/902497>. [cit. 2024-05-29].
- [19] KUBESA, Ondřej. *Sledování stability enzymů a enzymových směsí pro stanovení alkoholu a glycerolu ve víně*. Online. Bakalárska práca. Brno: Masarykova univerzita, Faculty of Science. 2010. Dostupné z: <https://theses.cz/id/lj7ly1/>. [cit. 2024-05-29].
- [20] Sensitive and stable ethanol biosensor development based on *Acetobacter acetii* biofilm for halal detection of food and beverages. Online. 2019, roč. 7, č. 6, s. 40-47. ISSN 24557005. Dostupné z: <https://doi.org/10.7324/JABB.2019.70607>. [cit. 2024-05-29].

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky:

FEKT	Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
VUT	Vysoké učení technické v Brně
NADH	Nikotinamidadeninindinukleotid
TLV	Tlustovrstvá technologie
HIO	Hybridní integrované obvody
CTF	Cermetová tlustovrstvá technologie
PTF	Polymerová tlustovrstvá technologie
PBS	Fosfátový pufr
NaCl	Kuchyňská sůl
H ₂ O ₂	Peroxid vodíku
AOX	Alkohol oxidáza
<i>CH₃CH₂OH</i>	Ethanol