

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta chemická

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Brno, 2019

Bc. Klára Foldynová



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA CHEMICKÁ

FACULTY OF CHEMISTRY

## ÚSTAV FYZIKÁLNÍ A SPOTŘEBNÍ CHEMIE

INSTITUTE OF PHYSICAL AND APPLIED CHEMISTRY

# STUDIUM VLIVU DIELEKTRIKA NA OPTOELEKTRONICKÉ VLASTNOSTI ELEKTROLUMINISCENČNÍCH ZAŘÍZENÍ

STUDY OF THE INFLUENCE OF THE DIELECTRICS ON THE OPTOELECTRONIC PROPERTIES OF  
ELECTROLUMINESCENT DEVICES

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Klára Foldynová

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Mgr. Martin Vala, Ph.D.

BRNO 2019

## Zadání diplomové práce

Číslo práce: FCH-DIP1362/2018  
Ústav: Ústav fyzikální a spotřební chemie  
Studentka: **Bc. Klára Foldynová**  
Studijní program: Spotřební chemie  
Studijní obor: Spotřební chemie  
Vedoucí práce: **doc. Mgr. Martin Vala, Ph.D.**  
Akademický rok: 2018/19

### Název diplomové práce:

Studium vlivu dielektrika na optoelektronické vlastnosti elektroluminiscenčních zařízení

### Zadání diplomové práce:

Práce se zaměří na studium možností ovlivnění optoelektronických vlastností elektroluminiscenčních zařízení. Studované zařízení pracují na principu elektroluminiscence buzené střídavým elektrickým polem a jsou velmi citlivá na dielektrické vlastnosti použitých materiálů. Cílem práce bude zjistit, jak se změna dielektrických vlastností na elektroluminiscenci projevuje. Sledována bude spektrální odezva, svítivost, barevnost a závislost těchto veličin na budícím napětí a frekvenci. Zjištěné výsledky bude možné aplikovat při optimalizaci složení dielektrické a aktivní vrstvy těchto zařízení.

### Termín odevzdání diplomové práce: 10.5.2019

Diplomová práce se odevzdává v děkanem stanoveném počtu exemplářů na sekretariát ústavu. Toto zadání je součástí diplomové práce.

-----  
Bc. Klára Foldynová  
student(ka)

-----  
doc. Mgr. Martin Vala, Ph.D.  
vedoucí práce

-----  
prof. Ing. Miloslav Pekař, CSc.  
vedoucí ústavu

V Brně dne 31.1.2019

-----  
prof. Ing. Martin Weiter, Ph.D.  
děkan

## **ABSTRAKT**

Tato diplomová práce se zabývá studiem možností ovlivnění optoelektrických vlastností tištěných světlo emitujících panelů, které pracují na principu elektroluminiscence buzené střídavým elektrickým polem. Cílem práce bude sledovat vliv dielektrických vlastností pojiva elektroluminiscenčního fosforu na výslednou elektroluminiscenci. V teoretické práci jsou popsány principy elektroluminiscence, vhodné materiály, metody charakterizace a přípravy panelů pomocí tiskových technik.

Experimentální část zahrnuje elektrickou charakterizaci vybraných pojiv pro zjištění jejich dielektrických konstant. Následně byly formulovány tiskové pasty v různém hmotnostním poměru pojiva a elektroluminiscenčního fosforu a byly připraveny modelové světlo emitující panely. Pomocí optoelektrické charakterizace byla zjišťována změna intenzity ozáření. Bylo zjištěno, že dielektrické vlastnosti pojiva výslednou intenzitu ozáření významně ovlivňují. Bylo prokázáno, že při použití pojiva s velkou dielektrickou konstantou, je možné dosáhnout stejné intenzity ozáření pro menší množství fosforu, než v případě pojiv s menší dielektrickou konstantou. Získané poznatky mohou být využity pro zlepšení svítivosti elektroluminiscenčních panelů.

## **ABSTRACT**

This diploma thesis is studying the possibilities of influencing the optoelectric properties of printed light emitting panels, which work on the principle of electroluminescence excited by alternating electric field. The aim of this work is to monitor the influence of dielectric properties of electroluminescent phosphor binder on the targeted electroluminescence. In the theoretical part of this thesis, there are described principles of electroluminescence, suitable materials methods of characterization and preparation of panels using printing techniques.

Experiment part contains electrical characterization of selected binders to determine their dielectric constants. Subsequently, printing pastes were formulated in different weight ratios of binder electroluminescent phosphor and model light-emitting panels were prepared. Optoelectric characterization was used to determine the change in irradiance. It was found that the dielectric properties of the binder significantly affect the resulting irradiance. It has same irradiance for a smaller amount of phosphor than with the binder with a low dielectric constant. The finding of this work can be used to improve the luminosity at the electroluminescent panels.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

ACEL, elektroluminiscence, ZnS, dielektrická konstanta, pojivo, sítotisk, tištěná elektronika, materiálový tisk

## **KEYWORDS**

ACEL, electroluminescence, ZnS, dielectric constant, binder, screen printing, printed electronics, material printing

FOLDYNOVÁ, K. *Studium vlivu dielektrika na optoelektronické vlastnosti elektroluminiscenčních zařízení*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2019. 50 s. Vedoucí diplomové práce doc. Mgr. Martin Vala, Ph.D..

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracovala samostatně a že všechny použité literární zdroje jsem správně a úplně citovala. Diplomová práce je z hlediska obsahu majetkem Fakulty chemické VUT v Brně a může být využita ke komerčním účelům jen se souhlasem vedoucího diplomové práce a děkana FCH VUT.

.....  
podpis studenta

### *Poděkování*

*Ráda bych tímto poděkovala vedoucímu diplomové práce doc. Mgr. Martinu Valovi, Ph.D. za čas, cenné poznámky, možnost častých osobních konzultací a zároveň za velkou trpělivost při závěrečném zpracování. Dále bych chtěla poděkovat Ing. Michalovi Hrabalovi za pomoc při práci v laboratoři a zároveň za rady při sepisování práce. Dále bych ráda poděkovala také Ing. J. Pospíšilovi, Ph.D. při měření vzorků na impedanční spektroskopii.*

## Obsah

1	Úvod .....	7
2	Teoretická část.....	8
	2.1 Elektroluminiscence .....	8
	2.2 Struktura elektroluminiscenčního panelu .....	9
	2.3 Luminofory.....	10
	2.4 Dielektrikum.....	12
	2.5 Elektrody .....	13
	2.6 Pojivo částic fosforu.....	13
	2.7 Materiálový tisk.....	17
	2.8 Impedanční spektroskopie .....	18
	2.9 Měření elektroluminiscenčních charakteristik .....	19
3	Experimentální část .....	22
	3.1 Použité materiály .....	22
	3.2 Přístroje a zařízení .....	22
4	Výsledky a diskuze.....	24
	4.1 Příprava vrstev.....	24
	4.2 Dielektrická charakterizace .....	27
	4.3 Příprava elektroluminiscenčního panelu .....	32
	4.4 Optoelektrická charakterizace panelu.....	33
5	Závěr.....	38
6	Použitá literatura .....	39
7	Seznam zkratk a symbolů .....	42
8	Příloha .....	44

# 1 ÚVOD

Luminiscenční jevy fascinovaly lidstvo již od nejstarších dob. Polární záře, luminiscenční dřevo, zářivé ryby jsou případy přirozeně se vyskytující luminiscence. První umělý fosfor (materiál vykazující luminiscenci) pochází z roku 1603, kde byl použit přírodní minerál baryt ( $\text{BaSO}_4$ ). Ve snaze vytvořit zlato, byl po zahřátí získán trvalý luminiscenční materiál BaS. V několika následujících století vědci syntetizovali a zkoumali i celou řadu dalších luminiscenčních materiálů. Luminiscenční ZnS, který je hlavním předmětem elektroluminiscenčního zařízení studovaného v této práci se stal jedním z nejdůležitějších materiálů [1].

Elektroluminiscence je luminiscence, při které dochází k přeměně elektrické energie na světlo při průchodu proudu vhodným materiálem. Elektroluminiscence buzená střídavým proudem (Alternating Current ElectroLuminiscence) v práškových vrstvách fosforu byla objevena již v roce 1936 při studování slitin kovu. Nízký světelný výkon a omezená životnost těchto prvních systémů zabránily širokému využití těchto zařízení [2], [3].

V průběhu let byly popsány a zkoumány další elektroluminiscenční techniky, hlavně DC-prášková elektroluminiscence buzená jednosměrným proudem. Tyto zařízení mají složitou přípravu jednotlivých vrstev, na rozdíl od jednoduchých struktur ACEL, která jsou připravována jednoduchými technikami. Dalšími technikami jsou DCEL s tenkými vrstvami ZnS nebo ACEL s naprášením nebo odpařením tenkou vrstvou ZnS (TFACEL, Thin Film Alternating Current ElectroLuminiscence). Technika TFACEL je založena na tenkých polovodivých a dielektrických vrstvách. Komerčně nejúspěšnější se stal TFACEL zejména pro pixelová alfanumerická zařízení pro podsvícení displejů [2]. Technika TFACEL je náročnější na přípravu zařízení, jelikož se přikládá na světelný zdroj vysoké elektrické pole. Na svítivé účely se zaměřením na vysokou efektivitu a uspokojivé barevné možnosti nebyla ani jedna z těchto technik vhodná.

Proto se v práci zabýváme technikou ACEL, tedy práškovou elektroluminiscencí, která má mnohem jednodušší strukturu na přípravu pomocí jednoduchých tiskových technik. Je vhodnou na přípravu plochých a flexibilních světelných zdrojů. Tyto panely našly uplatnění v mnoha aplikacích, ale stále je potřeba vylepšit strategii na zlepšení jejich svítivosti. Elektroluminiscenční panely s použitím luminiscenčních materiálu, jsou téměř výhradně založeny na ZnS v pojivu. Proto v této práci zkoumáme vliv dielektrických vlastností pojiva elektroluminiscenčního fosforu na bázi ZnS na výslednou intenzitu ozáření světlo emitujících panelů.

V práci byly zjišťovány elektrické vlastnosti vybraných pojiv, pro která byla určena dielektrická konstanta. Příprava součástek pro určení dielektrických vlastností a měření na impedanční spektroskopii, je popsána v kapitole 4.1 a 4.2. Následně byly formulovány tiskové pasty v různém hmotnostním poměru vybraných pojiv a luminiscenčního fosforu a byly připraveny modelové elektroluminiscenční panely. (kapitola 4.3). V kapitole 4.4 jsou diskutovány vyzařovací charakteristiky připravených panelů a dále zde byl studován vliv emisních spekter na přiloženém napětí a frekvenci.



## 2 TEORETICKÁ ČÁST

### 2.1 Elektroluminiscence

Elektroluminiscence je luminiscence, při které dochází k přeměně elektrické energie na světlo při průchodu proudu vhodným materiálem. Jednou z technologií využívající tento jev je elektroluminiscence buzená střídavým elektrickým proudem ve vrstvách tvořených částicemi luminoforu, tzv. Powder ACEL (Alternating Current ElectroLuminiscence). V současné době je ACEL jedinou technologií na výrobu velkoplošných strukturovaných a barevných světlených zařízení pomocí jednoduchých tiskových technik. Substráty pro tisk mohou být pružné polymery nebo sklo, takže mohou být připraveny ve velkém množství tvarů [2].

ACEL zařízení mohou pracovat v širokém rozmezí teplot a jsou poměrně lehké (typicky  $0,05 \text{ g/cm}^2$ ), mají malý objem (jsou tvořeny tenkými vrstvami) a celý světelný zdroj (panel) lze připravit na flexibilní substrát. EL panel poskytuje konstantní emisi světla nezávislou na pozorovacím úhlu a není citlivý na mechanické otřesy [4].

Pro zlepšení účinnosti a jasů zařízení, je pozornost věnována zejména vrstvě fosforu. V minulosti byl studován vliv zlepšení krystalinity částic fosforu, zvýšení koncentrace dopantů zodpovědných za emisi světla ve viditelné oblasti, zlepšení kvality rozhraní mezi izolantem a fosforem a použití modifikovaných směsí fosfor-dopant [5].

Vzhledem k nízkému jasů a krátké živostnosti jsou aplikační možnosti omezeny. ACEL zařízení se používají jako podsvícení displejů nebo pro aplikace, které vyžadují nízký jas, jako jsou noční světla a podsvícení LCD klávesnic. Jediným rysem u ACEL je jejich konstrukce, která poskytuje velkou všestrannost. EL panely mohou být ohýbatelné, skládané, různě perforované při zachování jejich funkčnosti apod. [6].

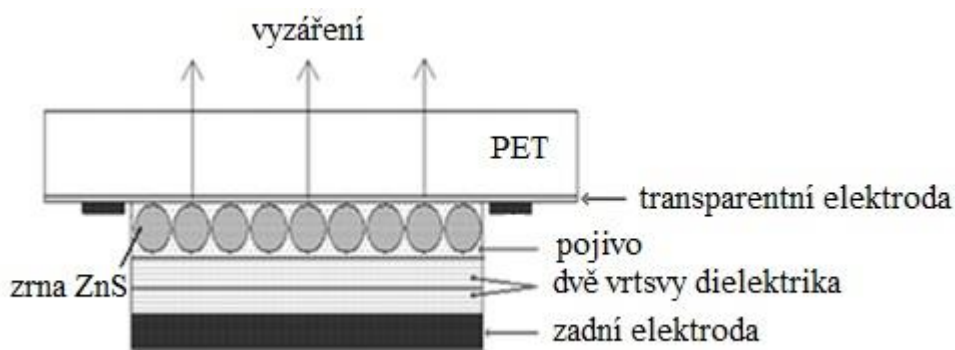
Práškové elektroluminiscenční panely se využívají v mnoha zařízeních, ale je mnoho aspektů, které brání v jejich širšímu rozvoji a využití:

- Absolutní jas je poměrně nízký, jelikož zařízení, které musí být čitelné na slunci vyžaduje vysoký jas.
- Živostnost zařízení se s narůstajícím napětím snižuje. Zařízení s nízkou svítivostí tak může vydržet až tisíc hodin, ale tato živostnost klesá při zvýšeném jasů. V současné době lze dosáhnout živostností přibližně 2500 hodin s počáteční svítivostí  $100 \text{ cd/m}^2$  [6]. Bylo prokázáno, že degradace vzrůstá při vyšších provozních teplotách a luminiscence téměř klesá na nulu, když zařízení pracuje při  $-67 \text{ }^\circ\text{C}$  [8]. Zahřátí degradovaného zařízení na  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  vede k částečnému obnovení elektroluminiscence [9].
- Stabilita i živostnost zařízení je závislá na zapouzdření vrstev. Jelikož jsou materiály citlivé na vlhkost, měly by být chráněny před vnějšími vlivy okolí. Nejprve byly vrstvy enakapsulovány jako celek, ale v poslední době byla provedena mikroenkapsulace, přičemž částice fosforu jsou potaženy individuálně. Avšak tento druh procesu výrazně zvyšuje náklady na materiál [1].

## 2.2 Struktura elektroluminiscenčního panelu

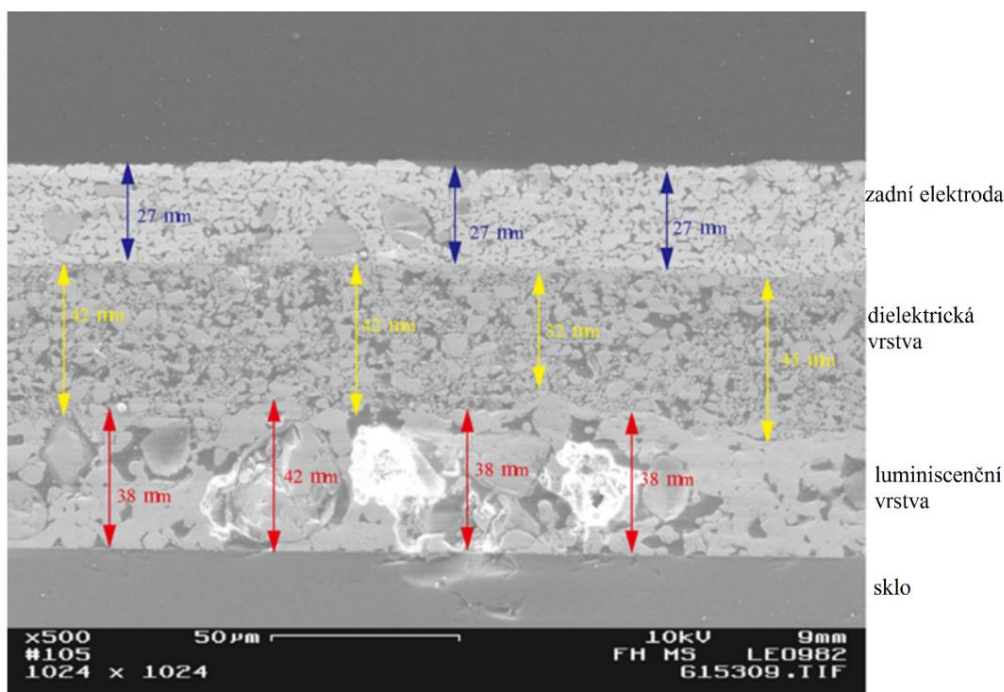
Struktura ACEL panelu je velmi jednoduchá, což je výhodou při přípravě. Na Obr. 1 můžeme vidět všechny části zařízení. Přední transparentní elektroda bývá většinou vyráběna z polymerního materiálu nebo skla, které jsou pokryté ITO elektrodou (cínem dopovaný oxid india). ITO jako jediná vrstva není tištěná, ale naprašována. ITO elektroda může být nahrazena vodivým transparentním polymerem (např. PEDOT:PSS). Další vrstvou zodpovědnou za barevnou emisi světla je luminiscenční vrstva, na kterou je natištěna vrstva dielektrika, která slouží jako izolant. Poslední částí je spodní elektroda, stříbrná nebo uhlíková elektroda, která není transparentní [1], [2].

Vnitřní luminiscenční vrstva je tvořena částicemi ZnS, které jsou spojeny nevodivým pojivem. Jednotlivá zrna ZnS jsou od sebe izolována, a proto v aktivní vrstvě neprochází proud. Elektroluminiscenční efekty v ACEL zařízení se odehrávají uvnitř jednotlivých zrn [2].



Obr. 1: Schéma AC elektroluminiscenčního panelu [6]

Obr. 2 ukazuje mikroskopickou strukturu příčného řezu panelu se stříbrnou zadní elektrodou, dielektrickou vrstvou a luminiscenční vrstvou, ve které jsou vidět jednotlivá zrna ZnS zapuštěná v pojivu. Dielektrická vrstva je hrubší než obvyklých 20  $\mu\text{m}$ , ale její granulovaná struktura je dobře zobrazená. Na obrázku je vidět, že luminiscenční částice jsou stejné velké jako emitující vrstva a hustota částic je malá a nepravidelná. Tloušťka luminiscenční vrstvy tedy nemůže být zmenšena, a tedy limituje celkovou tloušťku systému. Průhlednost s takovými velkými rozptýlenými částicemi nebude možná (pokud je to žádoucí) [2].

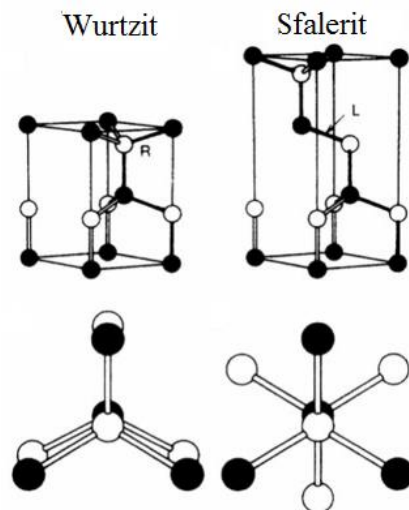


Obr. 2: Mikroskopická struktura průřezu ACEL zařízení zhotovena elektronovým mikroskopem [2]

### 2.3 Luminofory

ZnS je jedním z prvních objevených polovodičů a přitom vykazuje pozoruhodnou variabilitu základních vlastností a je vhodný pro různorodé aplikace, včetně světelných diod na bázi elektroluminiscence, senzory, lasery, atd. [10].

ZnS má dva běžně dostupné alotropy, které jsou chemicky stabilní. Jedna polymorfní forma je sfalerit (kubická nízkoteplotní forma) a druhou je wurtzit (hexagonální vysokoteplotní forma). Sfalerit je stabilní při nízkých teplotách, zatímco druhá polymorfní forma je stabilní i při 1296 K [11]. Na Obr. 3 můžeme vidět různé pohledy na obě struktury. Sfalerit se skládá z tetrahedrálně koordinovaných atomů zinku a síry podle vzorce ABCABC, zatímco wurtzit má shodné stavební bloky ve struktuře podle vzorce ABABAB. Nepatrný rozdíl ve struktuře vede k velkým rozdílům ve vlastnostech těchto materiálů [10]. Rozdíl je například v rozsahu zakázaného pásu, kde sfalerit má menší zakázaný pás ( $\sim 3,72$  eV) než wurtzit ( $\sim 3,77$  eV) [12], [13]. Šířka zakázaného pásu souvisí s energií absorbovanou/vyzářenou při elektronovém přechodu a určuje elektronové a optické vlastnosti materiálu.

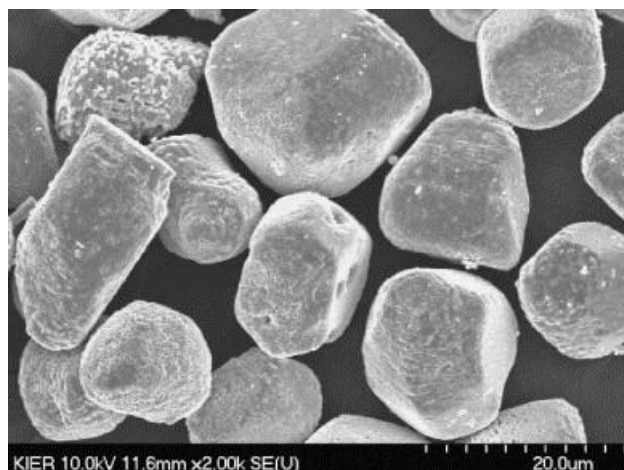


Obr. 3: Pohled na struktury ZnS [10]

### Barevné formy ZnS

Světlo se v ACEL zařízeních generuje, když je na vrstvu částic aplikováno střídavé napětí. Při nabíjení panelu se v mikrostruktuře sulfidu zinečnatého, které obsahuje dopant vytvoří dvojice elektron-díra a následně dojde k zářivé rekombinaci. Emitovaný foton má energii, která je charakteristická pro typ dopantu, který se vyskytuje ve struktuře ZnS. Např. v případě ZnS:Cu, Cl, kde je v krystalické struktuře sraženina mědi, které fungují jako koncentrátory elektrického pole, kde dojde k vytvoření páru elektron-díra a následně k jejich rekombinaci. Pro zlepšení účinnosti a jasu bylo zkoušeno několik přístupů. Mezi ně patří i zvýšení koncentrace dopantu. Ke zvýšení intenzity záření dochází s větším množstvím Cu v hostitelské mřížce ZnS (1,2 hm% Cu<sup>2+</sup> na 1,6 hm% Cu<sup>2+</sup>) [5].

Barva emitovaného záření je řízena přidáním různých druhů luminiscenčních center. Kombinace Cu a Cl dává buď modrou 460 nm nebo zelenou emisi 510 nm v závislosti na množství Cl. Kombinace Cu a Al (ZnS:Cu, Al) emituje zelené světlo při vlnové délce 550 nm a přídavek Mn k Cu a Cl dává žluté světlo při 590 nm. Na Obr. 4 můžeme vidět SEM snímek vzorku částic ZnS s různými koncentracemi Mn a Cu. Ostatní dopované částice používané v ACEL vykazují podobnou morfologii [13].



Obr. 4: Elektronová mikrofotografie ZnS:Mn, Cu, Cl [13]

Luminiscence ZnS vzniká především v důsledku defektů, vedoucích ke vzniku luminiscenčních center nebo nečistot, která jsou v materiálu přítomny. Různé ionty přechodných prvků ( $\text{Cu}^+$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Ag}^+$ ) v ZnS, které jsou zodpovědné za luminiscenci při určitých vlnových délkách. Obecně se dá říci, že zelená luminiscence je dosažena dopováním iontů  $\text{Cu}^+$  a  $\text{Al}^{3+}$  [5].

Světelné zdroje na principu ACEL lze použít jako dekorativní osvětlení, ale pro tyto aplikace je zapotřebí vyvinout i bílé emitující zařízení. Pro tyto účely je nutné, aby vznikla zařízení s dostatečnou emisí v modré, zelené a červené spektrální oblasti. Jednou z možností je vytvořit zařízení založené na míchání fosforů na bázi ZnS, ale bylo i demonstrováno elektroluminiscenční zařízení vyrobené s použitím jediného SrR:Ce, Eu, K fosforu [13].

## 2.4 Dielektrikum

Dielektrická vrstva slouží jednak jako ochrana proti zkratu, tak zároveň jako bílý reflektor koncentrující světelný výstup na přední straně zařízení. Aby nedošlo k oslabení elektrického pole v místě emitujících částic, tak tato vrstva musí být co nejtenčí a musí mít vysokou hodnotu relativní permitivity. Pro aplikaci dielektrika v ACEL musí být prášek zpracovaný do tisknutelné pasty, která poskytuje jednoduše připravitelné vrstvy bez nutnosti dalšího tepelného opracování [2].

Jako dielektrikum se v ACEL nejčastěji používá  $\text{BaTiO}_3$  (titaničitan barnatý), materiál s velmi vysokou hodnotou relativní permitivity. Materiál je dostupný v různých kvalitách. Typické velikosti částic jsou řádově 200 – 1000 nm. Dielektrické vlastnosti  $\text{BaTiO}_3$  závisí na metodě přípravy, zpracování a výsledné morfologii, jelikož dochází ke změnám v krystalové struktuře při 270 K a 180 K [2].

Nejběžnější je použití dielektrika jako samostatné (tištěné) vrstvy, ale ACEL lze připravit také pouze s jednou vrstvou obsahující dielektrikum společně s aktivní vrstvou ZnS. Výhodou je, že jednovrstevná struktura zahrnuje pouze jednostupňový tisk. Zatímco dvouvrstevná struktura má dvoustupňový proces tisku, a to tisk vrstvy aktivního materiálu a vrstvy dielektrika [14]. Jednovrstevné je možné připravit pouze za předpokladu, že kombinace materiálů má vhodné dielektrické vlastnosti a částice fosforu musí být co nejmenší. Dále mohou být použity např. feromagnetické nanočástice  $\text{BaTiO}_3$  nebo jako matrice pojivo s velkou hodnotou relativní permitivity. Dále nesmí být narušena ochrana fosforu proti vlhkosti.

Alternativou k  $\text{BaTiO}_3$  je použití polymerních pojiv s vysokými hodnotami relativní permitivity. Vhodným pojivem je např. polyvinylidendifluorid (PVDF), který lze modifikovat na tisknutelnou formu. V kompozitech s anorganickými částicemi je hodnota relativní permitivity 50 při pokojové teplotě [2].

Pro zvýšení intenzity elektroluminiscence pro zařízení je důležité množství použitého pojiva, krystalinita a velikost částic fosforu. Bylo zjištěno, že např. intenzita záření fosforu s velikostí částic 25  $\mu\text{m}$  vykazuje vyšší intenzitu ve srovnání s částicemi o velikosti 20  $\mu\text{m}$  [5].

## 2.5 Elektrody

Jelikož zadní elektroda nemusí být transparentní, používají se kovové nebo uhlíkové prášky natisknuté na vrstvu dielektrika. Mezi elektrody, které jsou nejběžnější patří stříbrné a uhlíkové. Další alternativou může být i hliníková pasta, která se obtížně zpracovává při nízkých teplotách. Stříbrná elektroda vykazuje vysokou vodivost, ale je drahá, zatímco uhlíková elektroda je levná, ale má nízkou vodivost. Při použití pevného kovu jako zadní elektroda, zařízení ztrácí pružnost a ohebnost. V komerčních aplikacích se používají pouze stříbrné nebo uhlíkové elektrody, které jsou dostačující pro použití na malých plochách [2].

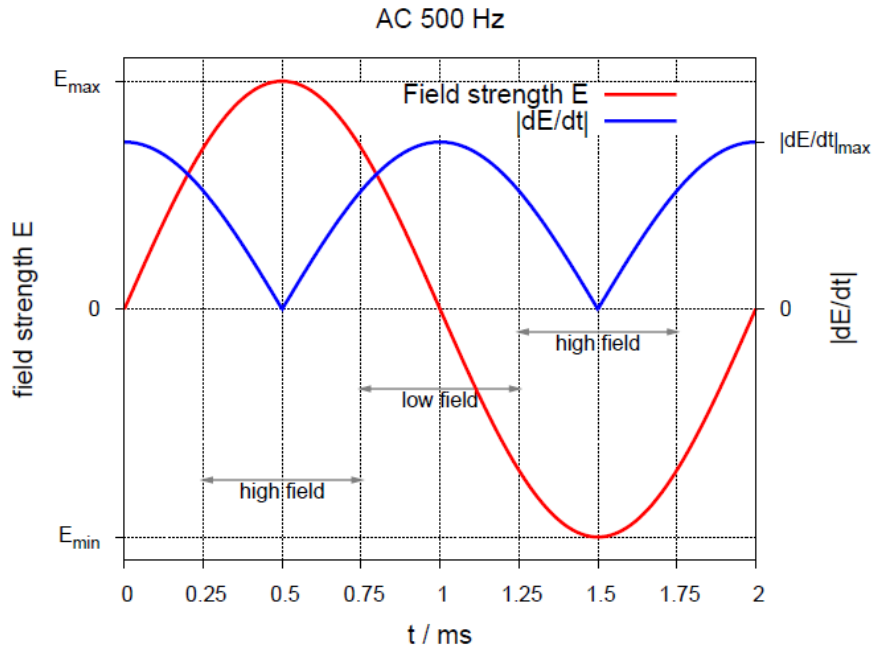
Zatímco zadní elektroda nemusí být transparentní, přední elektroda musí být průhledná, aby docházelo k emisi záření. Mezi používané přední elektrody se řadí ITO elektroda, která je poměrně drahá a používá se ve velkoplošných a dotykových obrazovkách. Pasty s nano-ITO částicemi mohou být použity pro výrobu postranně strukturovaných předních elektrod tiskovými technikami, a to může výrazně snížit spotřebu [2].

Další alternativou jsou vodivé polymery jako PEDOT:PSS, který je snadno použitelný a vykazuje vysokou vodivost. PEDOT:PSS lze použít na středně velkých plochách [2]. Další možností je elektroda tvořena stříbrnými nanodrátky (Ag nanowire, Ag NW), která je transparentnější než elektroda ITO v ultrafialové i viditelné oblasti. Při 505 nm je propustnost Ag nanowire větší (87 %) než ITO elektrody (70 %) a zároveň je flexibilnější. Propustnost Ag NW elektrody se snižuje ke kratším vlnovým délkám, ale stále je větší než 70 % při 400 nm. Nicméně intenzita záření ACEL buzená napětím v rozmezí 20 až 500 V za konstantní frekvence 400 Hz byla nižší u zařízení s Ag NW elektrodou, než u ITO elektrody. Obě elektrody však vykazují stejnou spektrální odchylku při konstantním napětí 200 V [15].

## 2.6 Pojivo částic fosforu

Pro rozvoj a zdokonalování elektroluminiscenčních zdrojů světla s vysokým jasnem je třeba použít materiál s vhodnou dielektrickou konstantou. Bylo experimentálně zjištěno, že se zvyšující se hodnotou dielektrické konstanty pojiva vede k zesílení vnitřního pole na zrnech elektroluminoforu a tím dochází k jasnější luminiscenci. Jas také závisí na frekvenčním rozsahu napětí aplikovaného na elektroluminiscenční panel [16].

Ve většině případů se budící napětí ve vrstvě ACEL mění s frekvencí mezi 50 až 1000 Hz. Na Obr. 5 můžeme vidět časové úseky amplitudy při excitačních podmínkách 500 Hz. Vysoké a nízké pole, definují intervaly, ve kterých je možná buď excitace nebo emise. Obecně platí při vyšší frekvenci, že křivka má ostřejší vzestup a pokles. Tyto rychlé změny vedou ke zvýšení světelného výkonu, ale také k rychlejšímu znehodnocení. Délka časových úseku je dostatečně dlouhá, aby mohlo dojít k luminiscenci v délce nanosekund [2].



Obr. 5: Časové úseky amplitudy při excitačních podmínkách 500 Hz [2]

Emise světla je tvořena v oblasti blízké povrchu částic a je koncentrována na malých bodech. Počet těchto bodů se zvětšuje se zvyšujícím se napětím (vloženým elektrickým polem). Lze říci, že elektrony a díry jsou odděleny při nejvyšší intenzitě elektrického pole blízko povrchu a následně rekombinují při změně polarity. Takový mechanismus vyžaduje přítomnost poruch v krystalu, protože tyto poruchy usnadňují separaci nosičů náboje přiloženého pole nejen na povrchu, ale také v objemu krystalu. Ideální krystal ZnS by potřeboval mnohem vyšší intenzitu pole pro generování nosičů náboje v elektrickém poli, než je tomu u reálného ACEL zařízení. Dalším možným zdrojem nedokonalosti jsou neúplné přechody sfalerit-wurtzit vzniklými opakovanými cykly ohřevu a chlazením nad teplotou přechodu [2].

Celková tloušťka fosforu a dielektrické vrstvy je obvykle kolem 50  $\mu\text{m}$ . Taková konstrukce je vložena mezi přední a zadní elektrodu a na takové zařízení je vloženo relativně vysoké napětí (řádově stovek voltů). Na zařízení je aplikováno elektrické pole s velkou intenzitou  $E$  (řádově  $10^7 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$ ). Intenzita homogenního elektrického pole s ohledem na vzdálenost elektrod se vypočítá podle Rovnice (1).

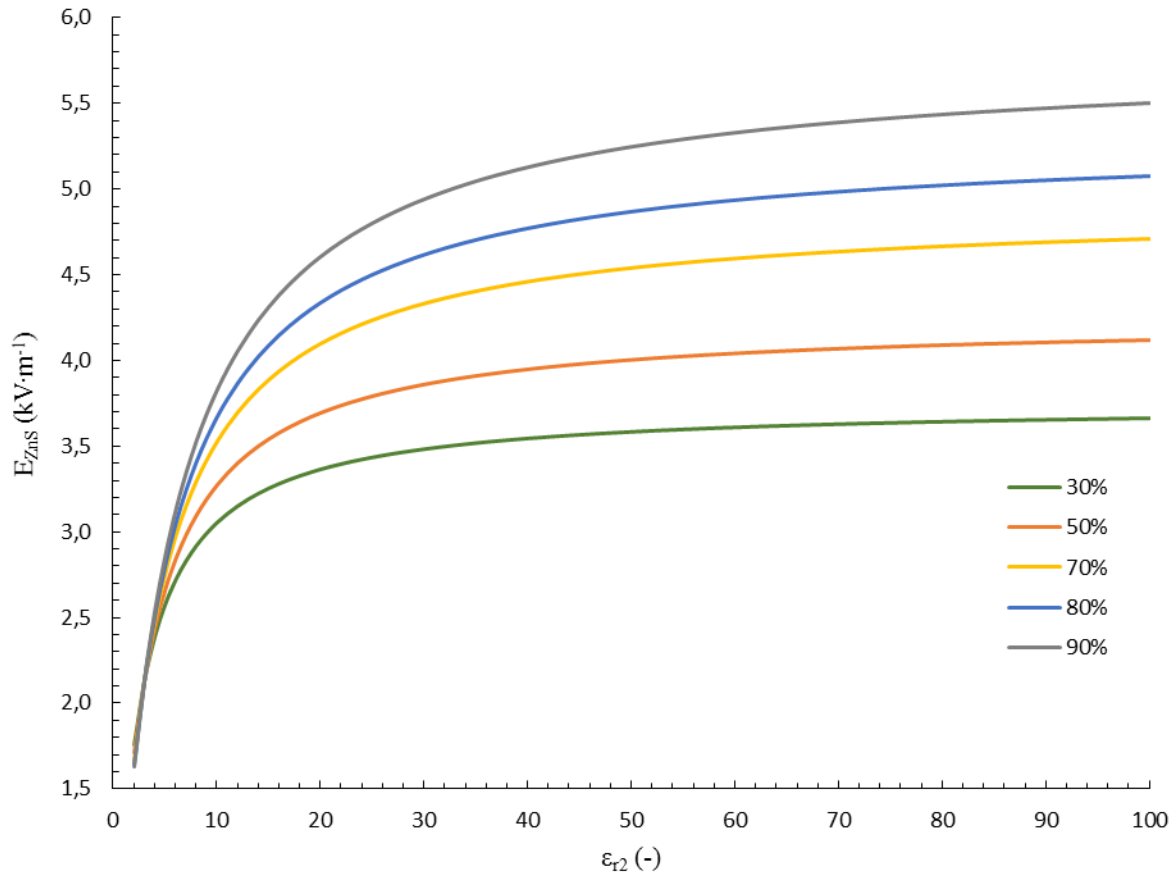
$$E_m = \frac{U}{d} \quad (1)$$

Kde  $E_m$  je velikost intenzity elektrického pole ( $\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$ ),  $U$  je napětí (V) a  $d$  je vzdálenost mezi elektrodami (m).

Pro elektroluminiscenci avšak není důležitá síla pole v celém zařízení, ale převážně na jednotlivých zrnech ZnS. S pojivem o vysoké dielektrické konstantě může být vnější pole zakoncentrováno do částic ZnS. Výsledná lokální intenzita  $E_{\text{ZnS}}$  může být vypočtena pro zrna ZnS s relativní dielektrickou konstantou  $\epsilon_{r1}$  a pojivem s dielektrickou konstantou  $\epsilon_{r2}$  (viz Rovnice (2)) [2].

$$E_{ZnS} = E_m \left[ \frac{3\epsilon_{r2}}{2\epsilon_{r2} + \epsilon_{r1} - \phi(\epsilon_{r1} + \epsilon_{r2})} \right] \quad (2)$$

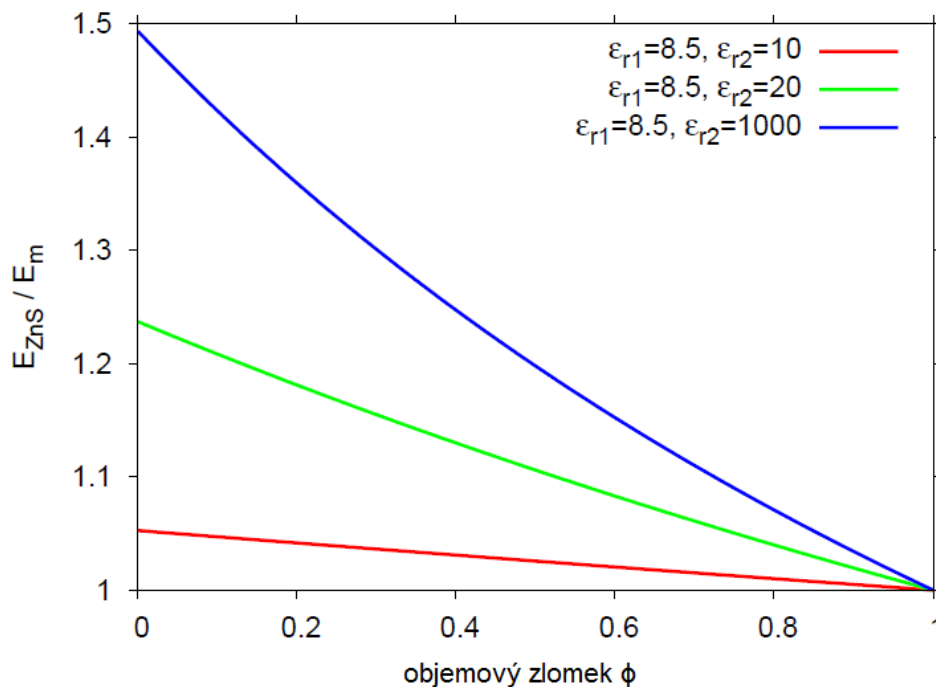
Závislost výsledné intenzity  $E_{ZnS}$  na dielektrické konstantě pojiva je zobrazena na Obr. 6. Je zde patrné, že vyšší dielektrická konstanta vede k většímu lokálnímu poli na částic ZnS a tedy k účinnější elektroluminiscenci. Se vzrůstajícím množstvím fosforu v pojivu dochází dále k zesílení vnitřního elektrického pole, přičemž tento efekt je více méně patrný pro pojivo s vysokou dielektrickou konstantou.



Obr. 6: Závislost výsledné intenzity  $E_{ZnS}$  na dielektrické konstantě pojiva

Obr. 7 ukazuje, jak se mění lokální intenzita pole v závislosti na měnící se dielektrické konstantě pojiva. S typickou tloušťkou aktivní vrstvy (méně než 50  $\mu\text{m}$ ) a vloženém napětí (více než 100 V) je síla elektrického pole řádkově  $10^7 \text{ Vm}^{-1}$ . Pro více vrstevnaté zařízení platí, že vrstva dielektrika by měla mít co možná největší dielektrickou konstantu, aby soustředila pole na luminiscenční vrstvu [2].

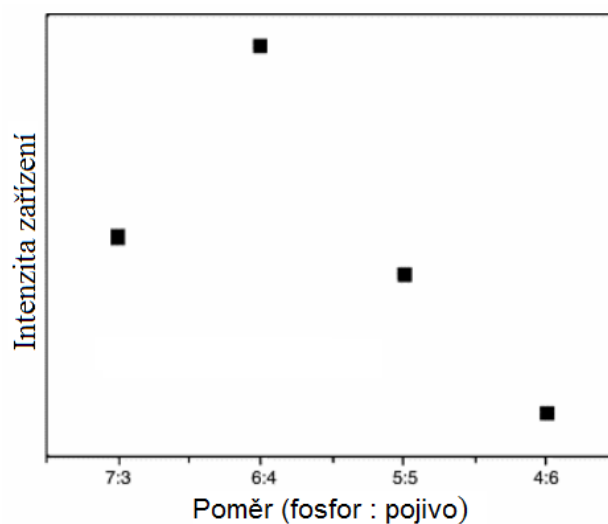




Obr. 7: Závislost intenzity elektrického pole na objemový zlomek luminiscenční částice [2]

Aktivní vrstva v elektroluminiscenčním zařízení je vyrobena za použití syntetického prášku ZnS a pojiva (např. kyanová pryskyřice). Další vrstva v EL zařízení, která může ovlivnit účinnost zařízení je dielektrická vrstva BaTiO<sub>3</sub>. Tloušťky dielektrické vrstvy a fosforu jsou rozhodujícími faktory. Tenká vrstva ZnS vede k vyšší intenzitě luminiscence, zatímco větší tloušťka dielektrické vrstvy napomáhá ke stabilitě zařízení při vyšších napětí a frekvenci [5].

Vhodná koncentrace pojiva v aktivní vrstvě také podporuje účinnost zařízení. Na Obr. 8 je znázorněno chování EL zařízení s ohledem na různé zařízení s různým poměrem fosforu a pojiva. Intenzita se zvyšuje při zvyšujícím se množství pojiva (maximální intenzita byla pozorována při poměru 6 : 4). při dalším zvyšování množství pojiva a současným snižováním množství fosforu, kde převažovalo množství pojiva, docházelo ke snižování intenzity [5].



Obr. 8: Vliv koncentrace pojiva na intenzitu zařízení [5]

## 2.7 Materiálový tisk

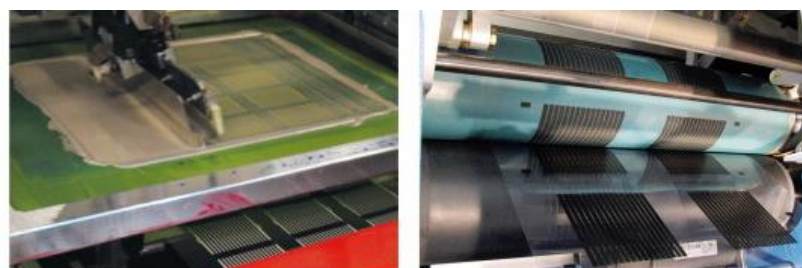
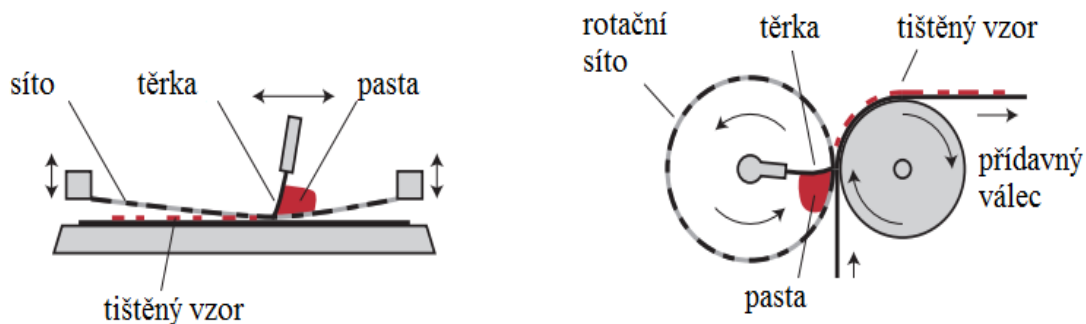
Materiálový tisk je kontaktní metoda nanášení inkoustu, který umožňuje přenést obraz nebo motiv z pevné tiskové formy na substrát. Výjimkou je proces digitálního inkoustového tisku, který je bezkontaktní. Metody tisku umožňují vytvoření dvourozměrných vzorů v širokém rozsahu tloušťek, rozlišení a rychlostí [17].

Tištěnou elektroniku lze připravovat na různých tiskových podkladech s použitím různých tiskových technik. Lze použít papír, tkaninu, sklo, kov, ale i plastové substráty, které umožňují vytvářet elastickou a transparentní elektroniku. Mezi tisknutelná zařízení, která jsou tištěna patří snímače, sensorové systémy, kondenzátory, tranzistory, fotovoltaické články, elektroluminiscenční panely. Při tisku se používají následující techniky: sítotisk, inkjet, rotační hlubotisk, flexotisk, ofsetový tisk a tampónový tisk. Sítotisk, jako nejstarší používaná technika pro tisk elektroniky je také nejlevnější, nejjednodušší a nejflexibilnější tiskovou technikou. Lze tedy říci, že nejvhodnější technikou pro přípravu elektroluminiscenčních panelů se jeví sítotisk [18].

Sítotisk je dvourozměrná technika, což znamená, že lze touto technikou plně vytisknout složité, dobře definovatelné vzory. Princip sítotisku je založen na stlačování inkoustové pasty otevřenými plochami síta na tiskový podklad. Ze všech tiskových technik má sítotisk nejširší rozsah použití podkladů, např. papír, textil, polymery, sklo ale i jiné pevné materiály. Různé vlastnosti těchto materiálů vyžaduje použití různých typů inkoustu, avšak princip tisku zůstává stejný [19].

Sítotisková předloha se skládá z rámu z kovu, dřeva nebo z plastu, na který je napnutá síťovina (přírodní, umělé hedvábí, kovová vlákna). Vzor na síťovině je definován neprůchodnými místy, která nepropustí tisknutelnou pastu na substrát. Přes tisknutelná místa v síti je protlačován inkoust pomocí pružné těrky. Inkoust je mechanicky vytlačován na substrát otevřeným obrazem [19].

Rozdělujeme dvě základní sítotiskové techniky – plošný a rotační sítotisk (Obr. 9). Existují rozdíly ve fungování těchto dvou technik. Výhody plošného sítotisku jsou, že síta jsou levné a je možné v případě potřeby provést úpravy mezi jednotlivými výtisky. Pro vývojové a laboratorní práce je to velký přínos. Z hlediska výroby je možné tisknout na velmi velké plochy (10 m<sup>2</sup>). Rotační sítotisk se liší tím, že je inkoust uvnitř rotujícího válce s pevnou vnitřní stěnou a inkoust je méně vystaven okolí. Síta u rotačního tisku jsou v porovnání s plošným sítotiskem drahá, ale co se týče rychlosti je rotační tisk rychlejší. Vzhledem k vysokým nákladům, obtížnějšímu nastavení a časově náročným čisticím postupům není rotační tisk vhodný pro laboratorní práci jako plošný tisk, který je vhodný pro tisk předních a zadních elektrod pro polymerní solární články ale také při tisku aktivních vrstev ACEL [20].



Obr. 9: Princip plošného (vlevo) a rotačního (vpravo) sítotisku [20]

## 2.8 Impedanční spektroskopie

Impedanční spektroskopie je založena na interakci vnějšího elektrického pole s elektrickými dipólovými momenty měřeného vzorku. Zabývá se studiem frekvenční odezvy střídavého elektrického proudu a popisuje dielektrické vlastnosti materiálu jako funkcí frekvence. Frekvenční měření se často využívá k charakterizaci elektrického chování systémů, kde je systém ovlivněn řadou úzce spojených procesů. Impedanční spektroskopii lze charakterizovat jako měření jedné nebo více impedančních funkcí (impedance, admitance, modulární funkce, dielektrická permitivita). Důležitým popisem pro tyto soustavy se stalo Cole-Coleovo vyjádření reálné a imaginární permitivity pro dielektrický systém v komplexní rovině (Cole-Cole diagram) [21], [22].

Frekvenční měření (přímé měření impedance) spočívá v aplikaci jedno frekvenčního napětí (harmonický zdroj napětí o frekvenci  $\omega$  a amplitudě  $U_0$ ) a amplitudy  $I_0$  a fázového posuvu proudu  $\phi$  [21]. Při aplikaci střídavého elektrického pole dochází k přeorientování dipólu v materiálu. Platí, že pokud měříme fázový posuv  $0^\circ$  jedná se o zařízení odporového charakteru, pro kapacitní charakter je fázový posuv  $-90^\circ$  a pro indukční charakter je fázový posuv  $+90^\circ$  [23].

Hodnotu relativní permitivity materiálu při aplikaci sinusového napětí lze určit z následující Rovnice (3).

$$\varepsilon_r = \frac{C \cdot d}{\varepsilon_0 \cdot A} \quad (3)$$

kde  $\varepsilon_0$  představuje permitivitu vakua,  $d$  je tloušťka materiálu,  $A$  je plocha elektrod plošného kondenzátoru a  $C$  představuje naměřenou kapacitu součástky.

## 2.9 Měření elektroluminiscenčních charakteristik

Světlo vyzařované panelem musí být popsáno z hlediska jeho zpracování pozorovatelem. Existují dva odlišné způsoby, jak charakterizovat emitované světlo. Radiometrie se zabývá měřením a charakterizací elektromagnetického záření v oblasti ultrafialového až infračerveného záření, včetně viditelného. Radiometrické veličiny jako jsou zářivá energie, tok zářivé energie, zář, dávka ozáření, intenzita toku ozáření (zářivost) a intenzita ozáření. Radiometrické veličiny jsou definovány jako základní jednotky energie, času a délky. Tento přístup má však malý význam pro popis světla, jak je vnímá lidské oko. Například ultrafialové a infračervené záření nezpůsobuje žádnou zářivou odezvu oka bez ohledu na to, kolik energie obsahuje. Proto byly definovány další jednotky, fotometrické jednotky, které zohledňují odezvu standartního pozorovatele směrem k optickému signálu.

V práci bylo použito měření elektroluminiscenčních charakteristik pomocí radiometrické veličiny intenzity ozáření (irradiance), resp. hustota toku záření. Ozáření je diferenciální podíl světelného nebo jiného elektromagnetického záření dopadající na jednotkovou plochu libovolné orientace. Ozáření se typicky vyjadřuje v jednotkách  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ .

$$E_e = \frac{d\Phi_e}{dA} \quad (4)$$

Dále v práci vyjadřujeme ozáření pomocí spektrální ozáření, která udává intenzitu ozáření při určité vlnové délce. Jednotka se vyjadřuje v  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{nm}^{-1}$ .

$$E_{e\lambda} = \frac{E_e}{d\lambda} \quad (5)$$

Pro měření ozáření malých světelných zdrojů se používá optické vlákno, které je umístěné kolmo ke zdroji záření. Optické vlákno je opatřeno kosinovým korektorem snímající záření pod úhlem  $180^\circ$  [24], [25]. Přehled dalších radiometrických a fotometrických veličin a jejich jednotky jsou znázorněny v Tab. 1 a Tab. 2.

Tab. 1: Přehled radiometrických a fotometrických veličin a jejich definice

<b>Radiometrická veličina</b>	<b>Fotometrická veličina</b>	<b>Definice</b>
Zářivá energie	Světelná energie	Forma energie, která se šíří prostorem jako elektromagnetické vlnění.
Zářivý tok	Světelný tok	Šíření zářivé energie prostorem bez ohledu na směr paprsků, charakter zdroje a jeho orientaci (množství zářivé energie nebo světla vztáhnuté na jednotku času).
Zář	Jas	Podíl světelného toku, resp. zářivého toku a průmětu emitující plochy na rovinu kolmou na směr postupu paprsků (záření).
Dávka ozáření	Osvit (expozice)	Množství světla (zářivé energie) zachycené povrchem určitého tělesa bez ohledu na dobu ozáření.
Intenzita toku záření (zářivost)	Intenzita světelného toku (svítivost)	Světelný tok, resp. tok záření, emitovaný bodovým zdrojem do jednotkového prostorového úhlu.
Intenzita ozáření (ozáření)	Intenzita osvětlení (osvětlení)	Světelný tok, resp. zářivý tok dopadající na jednotkovou plochu.

Tab. 2: Přehled radiometrických a fotometrických jednotek

<b>Radiometrická/Fotometrická veličina</b>	<b>Radiometrická jednotka</b>	<b>Fotometrická jednotka</b>
Světelná/Zářivá energie	$W \cdot s = J$	$lm \cdot s$
Světelný tok/Tok zářivé energie	$J \cdot s^{-1} = W$	$lm$
Zář/Jas	$W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$	$lm \cdot sr^{-1} \cdot m^{-2} = nit$
Dávka ozáření/Osvit	$J \cdot m^{-2}$	$lm \cdot s \cdot m^{-2} = lx \cdot s$
Zářivost/Svítivost	$J \cdot s^{-1} \cdot sr^{-1} = W \cdot sr^{-1}$	$lm \cdot sr^{-1} = cd$
Ozáření/Osvětlení	$W \cdot m^{-2}$	$lm \cdot m^{-2} = lx$

## 3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

### 3.1 Použité materiály

Při přípravě kondenzátoru, pro zjištění relativní permitivity bylo použito komerční pojivo (R2070613P2, Gwent Group), silikonový elastomer (0008478895) se síťovacím činidlem, PMMA polymethylmethakrylát a organokřemičité pojivo SiBi (doc. Ing. Petr Dzik Ph.D., FCH) komerční dielektrikum BaTiO<sub>3</sub> (D2070209P6), které bylo nanášeno mezi dvě vodivé stříbrné elektrody (C21310114D3).

Při přípravě elektroluminiscenčního panelu byla využita jako přední transparentní elektroda ITO elektroda (F2071018D1), dielektrikum BaTiO<sub>3</sub>(D2070209P6) a zadní stříbrná elektroda. Při přípravě referenčního panelu byla použita komerční pasta se zelenou emisí (C2070209P5) a další aktivní vrstvy byly smíchány pomocí pojiva a prášku ZnS (M-17710-1), který byl připraven firmou Leuchtstoff Breitung GmbH. Ostatní materiály pro přípravu elektroluminiscenčního panelu byly dodány firmou Gwent Group Advance material systems.

### 3.2 Přístroje a zařízení

#### Mechanický profilometr

Profilové vlastnosti vrstev byly proměřené na mechanickém profilometru BrukerDektakXT s průměrem hrotu 12,5 μm a přitlakem 3 mg. Pomocí ovládacího programu Vision 64 byl vzorek proměřen na několika místech.

#### Impedanční spektroskop

Dielektrická charakterizace byla prováděna pomocí spektroskopického analyzátoru SI 1260 s pomocným modulem Solartron 1296 Dielectric interface (Obr. 10). Měření bylo v rozsahu 1 Hz až 1 MHz. Na vzorek se přiváděl střídavý proud. Měření bylo prováděno pomocí programu Smart.



Obr. 10: Spektroskopický analyzátor (vlevo) s pomocným modulem (vpravo)

## Sítotisk

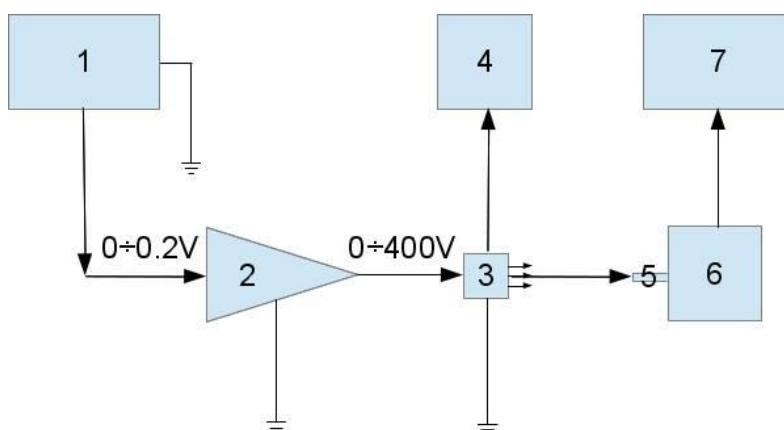
Všechny vrstvy elektroluminiscenčního panelu byly připravovány pomocí sítotisku RokuPrint SD05 (Obr. 11). Bylo použito síto s hustotou vláken 61 vláken na centimetr.



Obr. 11: Sítotisk RokuPrint SD05

## Přístroje pro charakterizaci optoelektrických vlastností

Pro charakterizaci záření emitovaného připravovanými elektroluminiscenčními panely byl použit generátor střídavého napětí (Tetronic AFG 3021 B), elektrický zesilovač a osciloskop (Tetronix TBS 2000) a spektrometr (OCEAN-FX-XR1-ES). Schéma měřící aparatury je znázorněno na Obr. 12. Vzorek byl upevněn na stojánek a nad vzorek byla umístěna sonda s optickým vláknem o průměru 400  $\mu\text{m}$  a kosinovým korektorem tak, aby sonda snímala pod úhlem 180°. Pomocí programu OceanView byla zaznamenána data, která byla následně exportována do Excelu.



Obr. 12: Schéma aparatury (1 – generátor napětí, 2 – elektrický zesilovač, 3 – vzorek, 4 – osciloskop, 5 – optické vlákno, 6 – spektrometr, 7 – počítač)



## 4 VÝSLEDKY A DISKUZE

Tato práce se zabývá vlivem změn dielektrických vlastností pojiva elektroluminiscenčního fosforu na výsledné elektroluminiscenční charakteristiky tištěného zařízení. Pro zjištění vlivu pojiva byla nejdříve nutná příprava modelové součástky v podobě kondenzátoru, která byla podrobena impedanční spektroskopii, pro zjištění hodnoty relativní permitivity pojiva. Kapitoly 4.1 a 4.2 se tedy zabývají přípravou vrstev a jejich následnou elektrickou charakterizací. Při určení dielektrické konstanty pojiva bylo zapotřebí zjistit tloušťku připravené vrstvy pojiva pomocí profilometru a zároveň překryv elektrod. Také bylo důležité eliminovat nežádoucí jevy, jako jsou zkraty způsobené nehomogenitou vrstev. Po zjištění hodnot relativních permitivit, byla vybrána vhodná pojiva, do kterých byl zamíchán luminiscenční fosfor ZnS v různých hmotnostních poměrech. Pomocí takto připravených past byly natištěny elektroluminiscenční panely a následně byly zjištěny jejich optoelektrické vlastnosti. Přípravou panelů a jejich optoelektrickou charakterizací se zabývají kapitoly 4.3 a 4.4.

### 4.1 Příprava vrstev

Součástky pro měření na impedanční spektroskopii byly připravované na sítotiskovém poloautomatu značky RokuPrint. Pro tisk byla použita polyesterová síta, která měla připravena čtvercové vzory o různých rozměrech.

Pro změření relativní permitivity pojiva bylo zapotřebí připravit vzorek jako kondenzátor. Tato součástka se skládá ze dvou vodivých elektrod, v našem případě byly použity stříbrné elektrody, oddělené dielektrikem (vrstva pojiva oddělující přední a zadní elektrodu). Pro tisk byla použita již předem očištěná skleněná sklíčka. Na vysušená sklíčka byla postupně natištěna vrstva stříbrné elektrody, která byla následně umístěna na vyhřívací desku. Došlo k odpaření rozpouštědla a k vytvrzení natištěné vrstvy.

Na připravené natištěné vrstvy elektrody byla dle studovaného materiálu nanášena vrstva pojiva (komerční pojivo, silikon, organokřemičité pojivo, polymethylmethakrylát a BaTiO<sub>3</sub> v pojivu) pomocí těrky. Silikon elastomer byl smíchán se síťovacím činidlem, aby došlo k propojení řetězců a zároveň k vytvrzení vrstvy. Ostatní pojiva byla vysušena na vyhřívací desce bez dalších úprav.

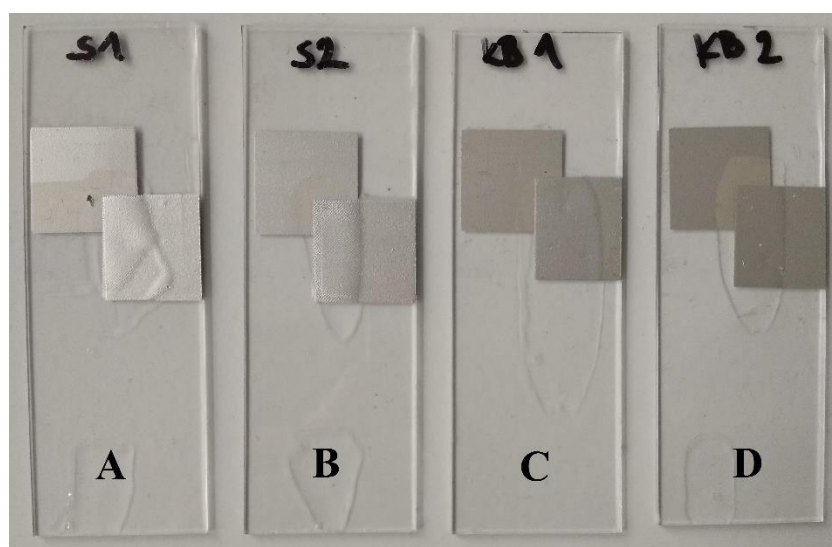
Po nanášení vrstvy pojiva na spodní elektrodu byly vzorky proměřeny na mechanickém profilometru Dexter pro zjištění jejich tloušťky, která je potřebná k výpočtu dielektrické konstanty pojiva (Tab. 3). Každý vzorek byl proměřen na různých místech a stanovena výsledná tloušťka.

Na již proměřený vzorek profilometrem byla natištěna druhá vrstva stříbrné elektrody tak, aby byla mezi překryvem elektrod vrstva pojiva. Takto připravený vzorek byl testován, zda vykazuje charakter kondenzátoru. Finálním krokem bylo proměření plochy plošného kondenzátoru, kde se elektrody překrývají, což je dalším důležitým parametrem k určení relativní permitivity (Tab. 3).

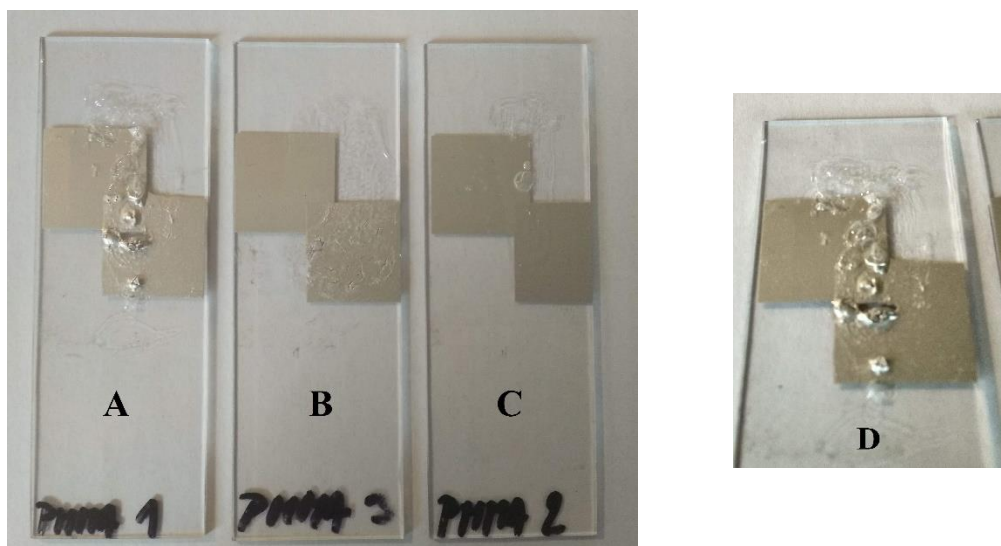
Tab. 3: Studované materiály, jejich tloušťky vrstev a plocha překryvu elektrod

Vzorek	Označení	h [ $\mu\text{m}$ ]	A [ $\text{cm}^2$ ]
Komerční pojivo	KB1	200	0,32
	KB2	702	0,33
Silikon	S1	211	0,28
	S2	188	0,33
Polymethylmethakrylát	PMMA2	20	0,15
Organokřemičité pojivo	SiBi2	45	0,25
Titaničitan barnatý v pojivu	BaTiO <sub>3</sub>	20	0,05

Na Obr. 13 můžeme vidět součástky připravené k měření na impedanční spektroskopii. Při přípravě vrstev s komerčním pojivem se nevyskytl žádný problém, jelikož použité pojivo je dodané stejnou firmou, která vyrábí pasty v různých barevných variantách. Tudiž pojivo, použité k pokusu, má vhodné vlastnosti k úspěšnému tisku. Při práci se silikonem musely být natištěny tři vrstvy stříbrné elektrody, aby součástka byla plně funkční a daly se změřit elektrické vlastnosti materiálu.

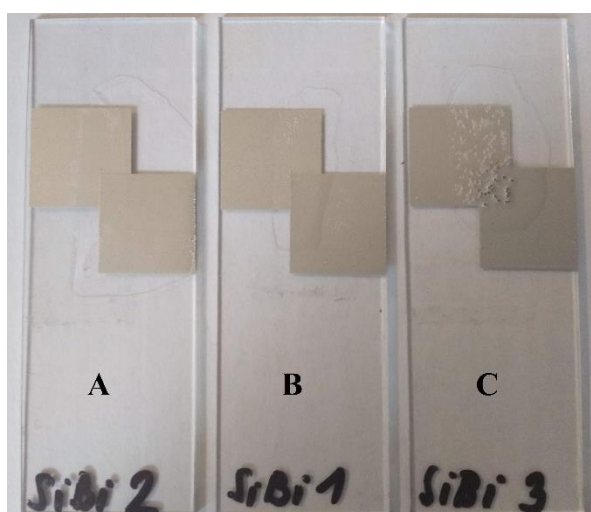


Obr. 13: Vzorky připravené k měření na impedanční spektroskopii (A, B součástky se silikonem, C, D součástky s komerčním pojivem)



Obr. 14: Součástky s pojivem polymethylmethakrylát (A, B součástky, u kterých došlo ke zkratu, C funkční, D přiblížení součástky A)

Aby bylo možné připravit vrstvu s polymethylmethakrylátem, bylo nutné namíchat roztok o vhodné viskozitě, jelikož byl dodán ve formě pevných částic. Bylo tedy zapotřebí PMMA v tuhé formě rozpustit v acetonu při 60 °C. Po rozpuštění bylo potřeba s roztokem rychle pracovat, aby nedošlo k zaschnutí. Po nanesení na sklíčko se spodní elektrodou docházelo k rychlému zasychání. Vrstvy ale nebyly zcela homogenní a tvořily se bublinky (Obr. 14). Po přetisknutí horní elektrodou bylo zapotřebí součástky zkontrolovat multimetrem, zdali nedochází ke zkratu. Jelikož vrstvy nebyly homogenní a obsahovaly defekty, docházelo tak k nefunkčnosti součástky. Pouze u vzorku PMMA 2 došlo k přípravě vrstev bez vad a po kontrole vzorek vykazoval charakter kondenzátoru.



Obr. 15: Součástky s organokřemičitým pojivem (A funkční součástka, B, C zkratové součástky s tvorbou bublinek)

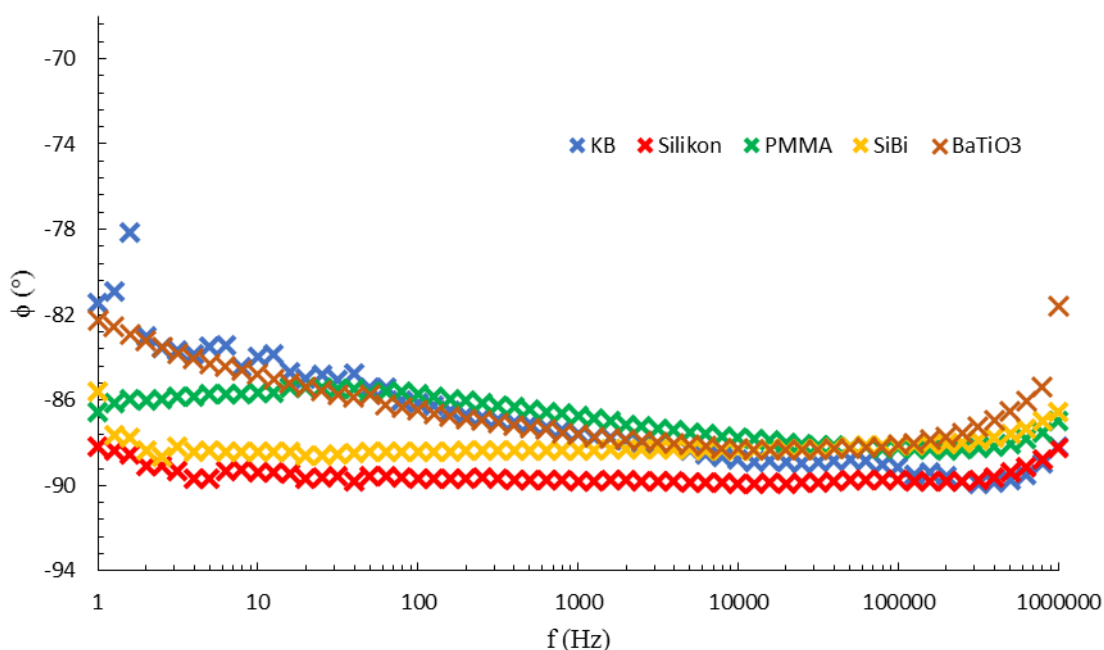
Při práci s pojivem SiBi nebyly problémy při přípravě vrstev, avšak po změření multimetrem docházelo ke zkratu. Lze tedy usoudit, že tento materiál je pórovitý. U vzorku SiBi 3

se při nanášení tvořily bublinky (viz Obr. 15), nebylo tedy možné zjistit přesnou tloušťku vrstvy. Jelikož se pojivo BaTiO<sub>3</sub> (komerční dielektrikum) již používá při tisku dielektrické vrstvy pro elektroluminiscenční zařízení, nevyskytly se komplikace při jeho přípravě.

## 4.2 Dielektrická charakterizace

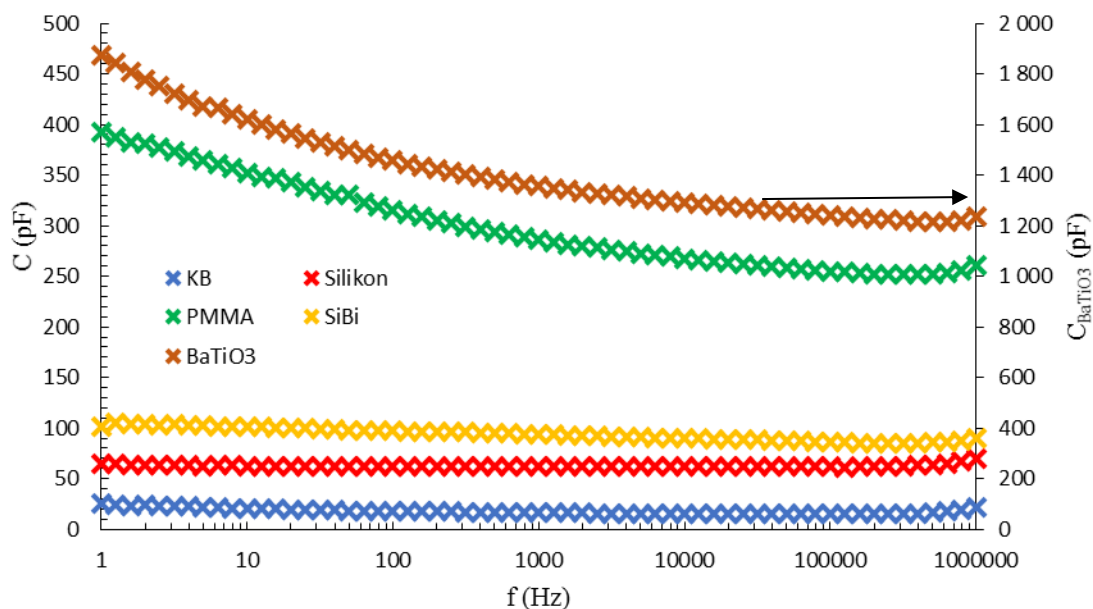
Frekvenční závislosti vzorku byly naměřeny na impedančním analyzátoru pomocí metody impedanční spektroskopie, a to měřením fázového posuvu a kapacity. V rámci měření na daném přístroji si lze nastavit rozsah frekvenčního měření. Náš rozsah měření byl od 1 Hz po 1 MHz.

Jelikož naše připravené součástky mají charakter kondenzátoru, lze předpokládat fázový posuv  $-90^\circ$ . Tento úhel by měl být konstantní v celém rozsahu měření, někdy může nabývat jiných hodnot. Avšak do hodnot  $-40^\circ$  nabývá stále kapacitního charakteru. Kdyby vzorek nabýval hodnot  $0^\circ$ , jednalo by se o rezistor a v případě fázového posuvu  $90^\circ$  by se jednalo o cívku.

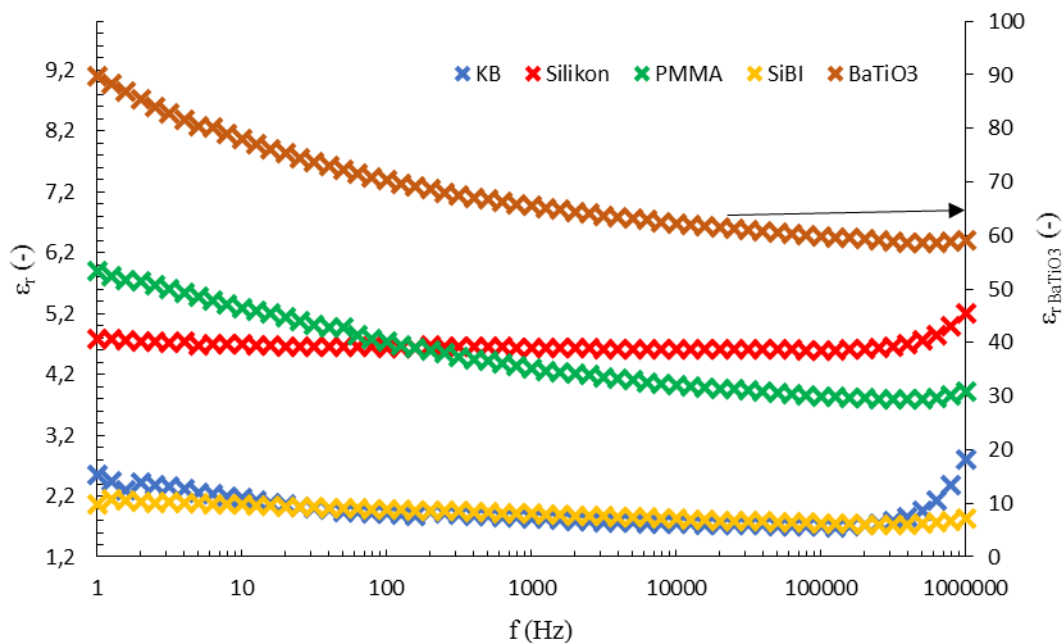


Obr. 16: Naměřený fázový úhel u všech vzorků

U všech studovaných materiálů bylo pozorováno, že se jedná o součástku kapacitního charakteru, kde lze očekávat fázový úhel  $-90^\circ$ . Dle Obr. 16 je patrné, že v krajních hodnotách rozsahu měřených frekvencí se mírně mění z kapacitního na odporový charakter. Ale jedná se jen o malé odchýlení od hodnoty  $-90^\circ$ , lze tedy říci, že jde stále o součástku kapacitního charakteru.



Obr. 17: Závislost naměřené kapacity na frekvenci



Obr. 18: Vypočítané hodnoty relativních permitivit

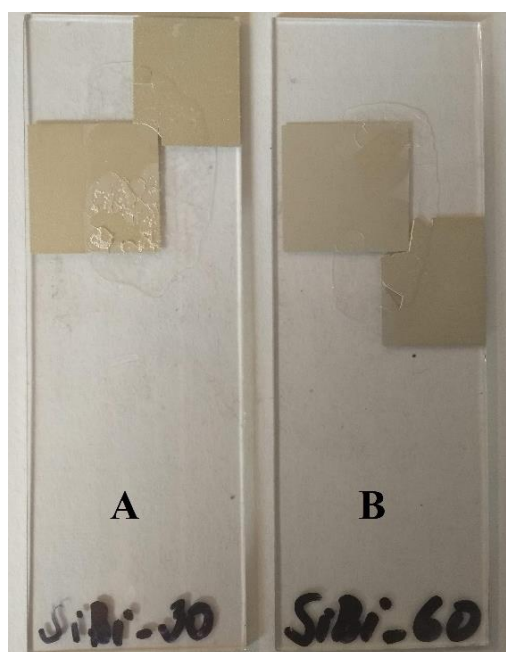
Pro výpočet relativní permitivity byly zjištěné závislosti přepočítány nejprve na kapacitu (Obr. 17) a následně na relativní permitivitu. Na Obr. 18 můžeme vidět vnesené hodnoty relativních permitivit v celém rozsahu měření pro všechna pojiva, která byla vypočítána podle Rovnice (3). Jelikož při dalším použití pojiva v aktivní vrstvě elektroluminiscenčního zařízení, kde bude použit frekvenční rozsah pouze od 200 až 1800 Hz, bude pro další diskusi použita hodnota relativní permitivity zjištěná jako průměr hodnot v určeném rozsahu. Vypočítané hodnoty byly vneseny do Tab. 4

Průměrná relativní permitivita komerčního pojiva byla stanovena na  $1,86 \pm 0,06$  a silikonu činila  $4,65 \pm 0,03$ . U pojiva PMMA byla hodnota stanovena na  $4,4 \pm 0,1$ . U dalšího vzorku s použitým pojivem PMMA došlo ke zkratu. Ke stejným problémům docházelo i u vzorku SiBi, u kterého byla stanovena hodnota relativní permitivity na  $1,92 \pm 0,02$ . U BaTiO<sub>3</sub> v pojivu byla hodnota stanovena a  $66 \pm 1$ .

Tab. 4: Vypočítané hodnoty relativních permitivit

Vzorek	Označení	Relativní permitivita $\epsilon_r$ [-]
Komerční pojivo	KB_1	$1,81 \pm 0,05$
	KB_2	$1,91 \pm 0,02$
Silikon	S_1	$4,67 \pm 0,01$
	S_2	$4,621 \pm 0,009$
Polymethylmethakrylát	PMMA_2	$4,34 \pm 0,1$
Organokřemičité pojivo	SiBi_2	$1,92 \pm 0,02$
Titaničitan barnatý v pojivu	BaTiO <sub>3</sub>	$66 \pm 1$

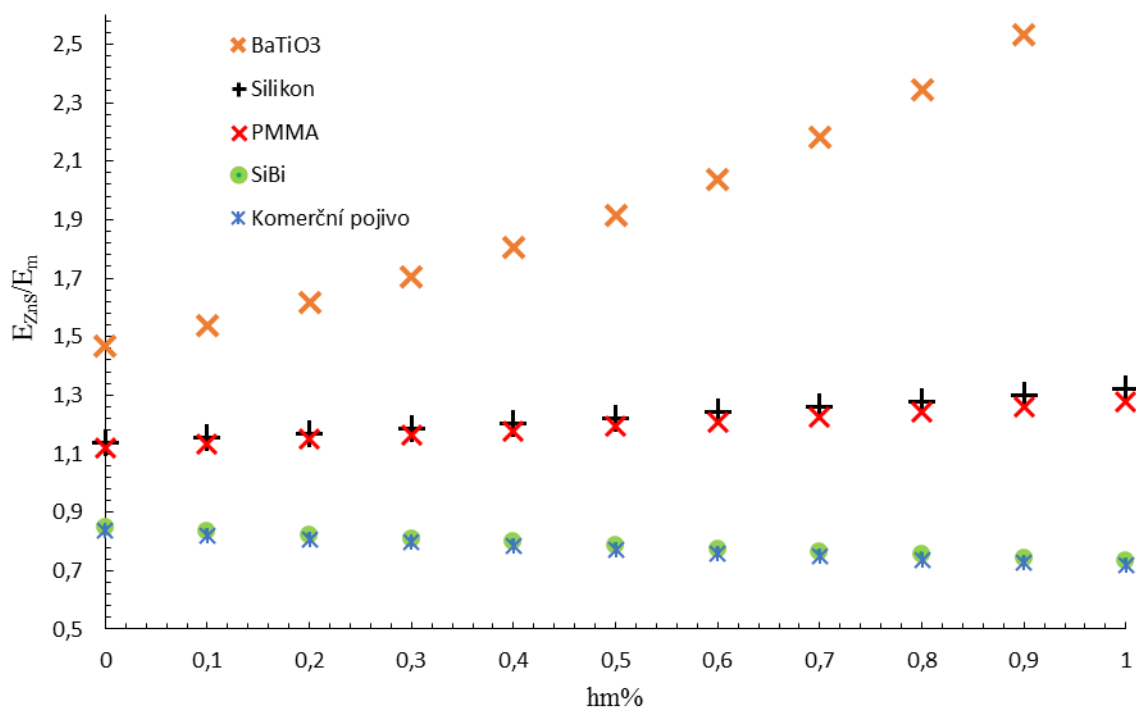
Jelikož dielektrické konstanty komerčního pojiva a SiBi byly velmi podobné, bylo pojivo SiBi vytvrzeno tak, aby došlo k odstranění organické části a došlo k navýšení hodnoty dielektrické konstanty. Vzorky byly ozářeny pod UV zářením po dobu 30 a 60 minut.



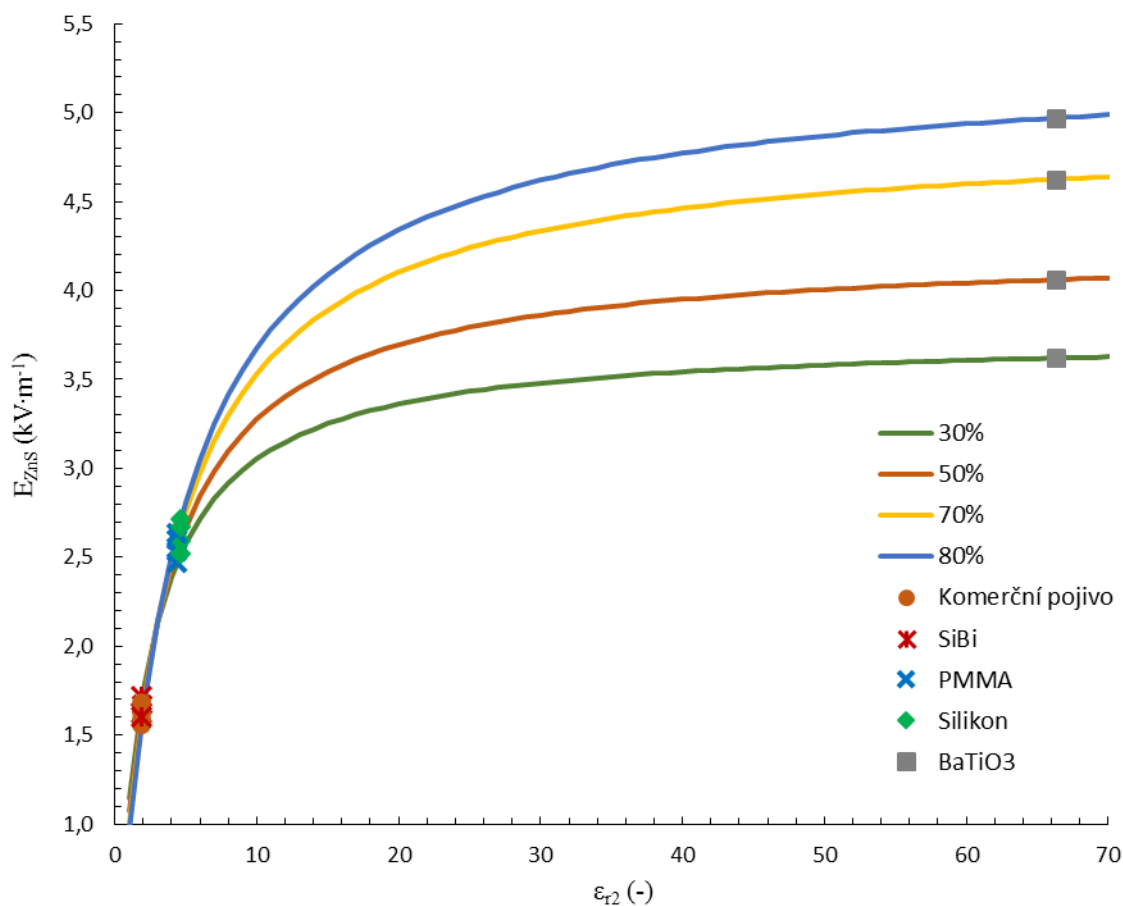
Obr. 19: SiBi opracované pod UV zářením (A – 30 minut a B – 60 minut)

Po opracování vrstvy pojiva SiBi nedošlo k přilnutí vrchní elektrody (Obr. 19). Tedy nebylo možné připravit součástku vhodnou k měření na impedanční spektroskopii.

Pro zjištění vlivu dielektrika na očekávané optoelektrické vlastnosti byly do modelu, popsaného v kapitole 2.6, dosažené hodnoty zjištěných dielektrických konstant pro výpočet elektrického pole. Z vypočtených hodnot byla sestavena závislost poměru intenzit elektrického pole na zrna ZnS a lokálního pole pro různé zastoupení pojiva. Z Obr. 20 je patrné, že u vzorků BaTiO<sub>3</sub>, který má vysokou dielektrickou konstantu, dochází k výraznějšímu vzestupu se stoupajícím zastoupením ZnS v pojivu. Vliv na optoelektrické vlastnosti bude výraznější oproti ostatním pojiv s menší hodnotou dielektrické konstanty. Ze zjištěné závislosti je patrné, že pojiva s nižší hodnotou dielektrické konstanty nemají příliš velký vliv na optoelektrické vlastnosti ACEL zařízení.



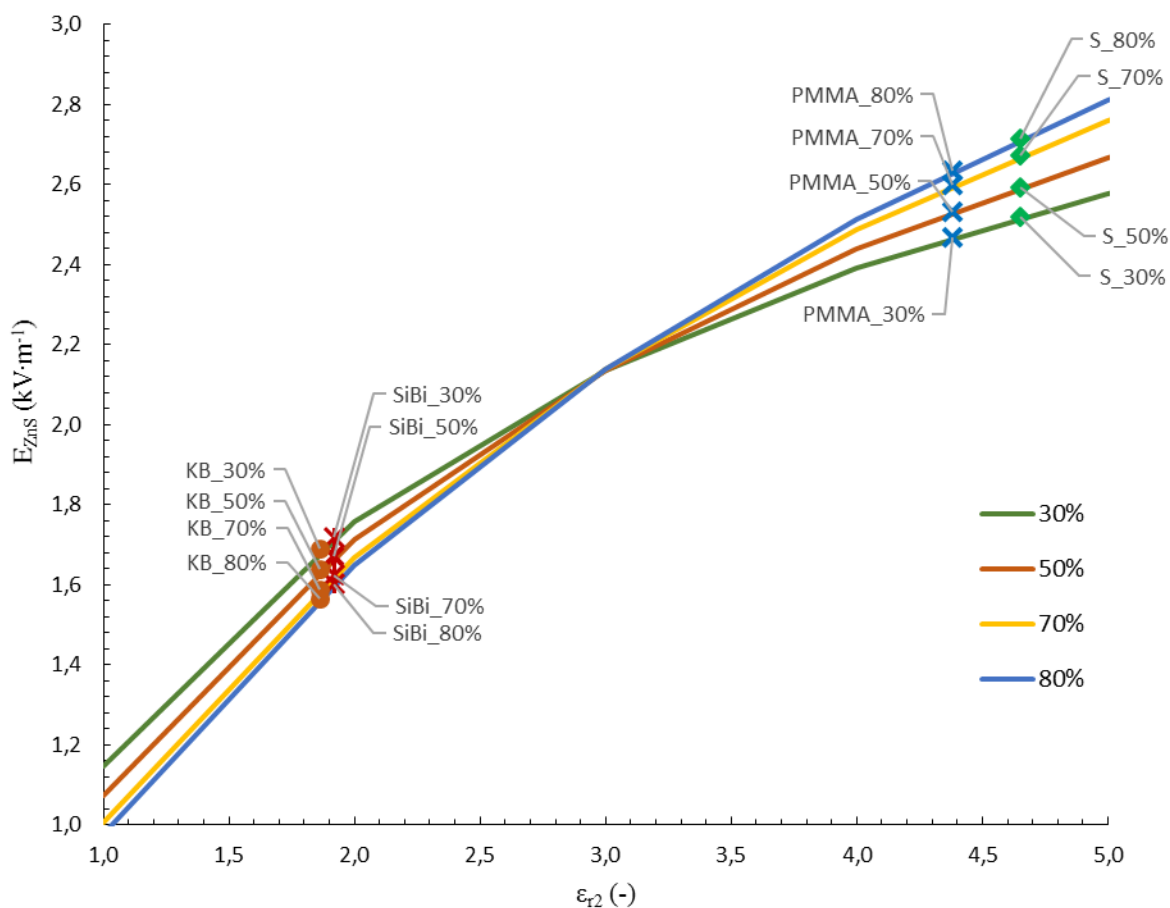
Obr. 20: Závislost poměru intenzity elektrického pole na zrnech ZnS a lokálního elektrického pole na hmotnostním poměru ZnS a pojiva



Obr. 21: Závislost výsledné intenzity  $E_{ZnS}$  na dielektrické konstantě pojiva

Obr. 21 zobrazuje závislost elektrického pole soustředěného na částici ZnS na relativní permitivitě pojiva. Je zde patrné, že při zvýšení relativní permitivity dojde ke zvýšení elektrického pole, a tedy potenciálně k vyšší intenzitě ozáření ACEL panelu. Od určitých hodnot relativní permitivity (cca nad 20) se již intenzita elektrického pole nebude výrazně lišit. Dále je zde patrné, že také záleží na poměru fosforu a pojiva. Pokud je relativní permitivita pojiva větší než ZnS, dochází se zvětšujícím se množstvím fosforu ke zvětšení intenzity elektrického pole, přičemž tento trend je více patrný pro pojiva s vyšší dielektrickou konstantou. Na Obr. 21 a Obr. 22 jsou dále vyneseny body odpovídající studovaným materiálům pojiv a hmotnostním poměrům.





Obr. 22: Závislost výsledné intenzity  $E_{ZnS}$  na dielektrické konstantě pojiva v rozmezí dielektrických konstant 1 až 5

U organokřemičitého pojiva SiBi a komerčního pojiva, kde je zjištěná hodnota relativní permitivity menší než relativní permitivita prášku ZnS, je očekáván poměrně malý vliv koncentrace na elektrické pole. Naopak, pokud je dielektrická konstanta pojiva výrazně větší než konstanta ZnS (jedná se zejména o  $BaTiO_3$ ), tak je elektrické pole na částici výrazně větší.

Čím nižší je zastoupení pojiva v závislosti na vysoké hodnotě dielektrické konstantě, tím se výrazně zvýší hodnota elektrického pole, tudíž dochází k navýšení intenzity záření.

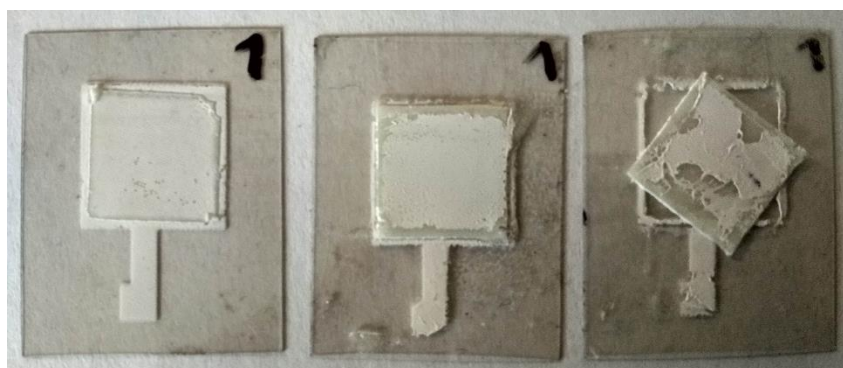
### 4.3 Příprava elektroluminiscenčního panelu

Z charakterizovaných materiálů bylo pro další studii vybráno pouze komerční pojivo, silikon a částice  $BaTiO_3$ . Organokřemičité pojivo nebylo vybráno, jelikož hodnota dielektrické konstanty byla velmi podobná konstantě komerčního pojiva a stejně tomu tak bylo i u silikonu a PMMA. Zároveň práce s PMMA byla mnohem náročnější než se silikonem.

Aby bylo možné sledovat vliv různého pojiva na optoelektrické vlastnosti elektroluminiscenčního panelu, bylo nejprve důležité připravit příslušné panely s použitím vybraných pojiv s různým zastoupením luminiscenčního fosforu. Pro porovnání byl připraven referenční panel z komerčního zeleného inkoustu.

Byly připraveny pasty, kde do vybraných pojiv byl přimícháván v různém poměru (30, 50, 70, 80 hm%) prášek ZnS. Takto připravené pasty byly nanесeny na plastový substrát potažený ITO elektrodou. Další vrstvy elektroluminiscenčního panelu byly připraveny pomocí sítotisku. Na aktivní materiál byly natisknuty dvě vrstvy dielektrika a na závěr stříbrná elektroda. Panely byly vždy připravovány stejným způsobem, a to nanесením aktivní vrstvy na substrát pomocí těrky. Taktéž referenční panel s použitím komerční pasty, která je tisknutelná na sítotisku, byl připraven obdobně.

Při přípravě elektroluminiscenčního panelu s aktivní vrstvou obsahující jako pojivo silikon, docházelo k opakujícím se problémům. Na vytvrzený aktivní materiál bylo zapotřebí natisknout dvě vrstvy dielektrika, ale již první vrstva na aktivní materiál nepřilnula a vyskytly se defekty. Při přetisknutí další vrstvou dielektrika docházelo k odlepení obou vrstev dielektrik nebo přetisknuté dielektrikum nedokázalo překrýt nenatištěná místa při prvním tisku (viz Obr. 23).



Obr. 23: Špatná přilnavost na aktivní vrstvu s pojivem silikonu

Aby dielektrika měla lepší přilnavost k aktivnímu materiálu, bylo vyzkoušeno ošetření vrstvy s použitím povrchového výboje (plazmy). Avšak ani po plazmatické úpravě nebylo možné připravit funkční elektroluminiscenční panel.

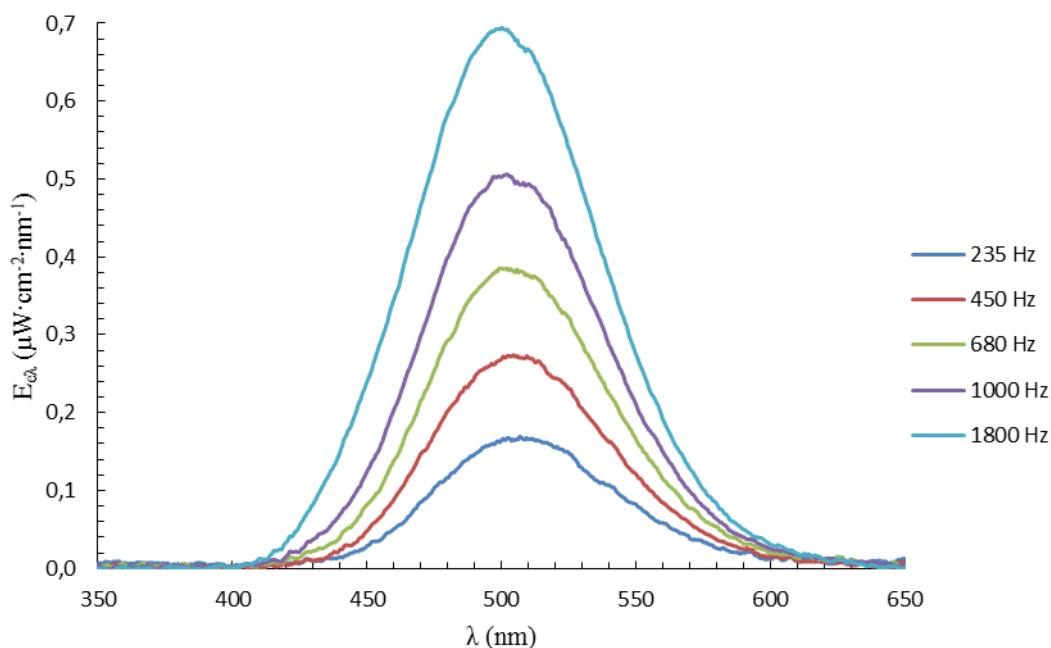
Při použití komerčního pojiva nebyl problém při tisku. Komerční pojivo má již vlastnosti, které jsou určeny pro tisk. Dielektrikum na aktivní vrstvě pevně drželo a nebylo potřeba je dále upravovat. Problémy nebyly ani u částic  $\text{BaTiO}_3$  v pojivu, které se používá jako vrstva dielektrika v zařízení.

#### 4.4 Optoelektrická charakterizace panelu

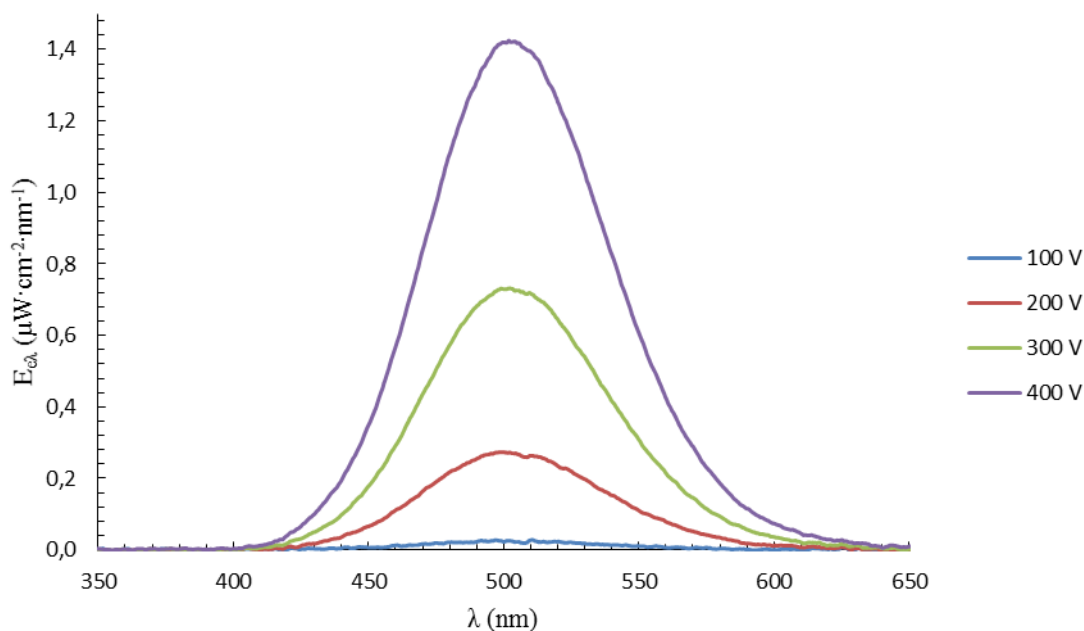
Pro optimální funkci elektroluminiscenčního panelu je nutné, aby elektrické pole, které způsobuje excitaci elektronů, bylo homogenní a aby vykazovalo co největší intenzitu. Intenzita elektrického pole závisí na přiloženém napětí a na vzdálenosti elektrod. Elektrické pole se zvětšuje se zkracováním vzdálenosti elektrod.

Zjištěné optoelektrické charakteristiky nám umožní porovnat vliv různých pojiv na výsledné vyzařovací charakteristiky a určit vhodné parametry při přípravě panelu o určitém množství pojiva a luminiscenčního fosforu.

Pro komerčně dostupný inkoust se zelenou emisí byla změřena závislost spektrální intenzity ozáření na měnící se frekvenci při konstantním napětí 250 V a pro měnící se napětí při konstantní frekvenci 1000 Hz.



Obr. 24: Emisní spektrum referenčního panelu při 250 V



Obr. 25: Emisní spektrum referenčního panelu při 1000 Hz

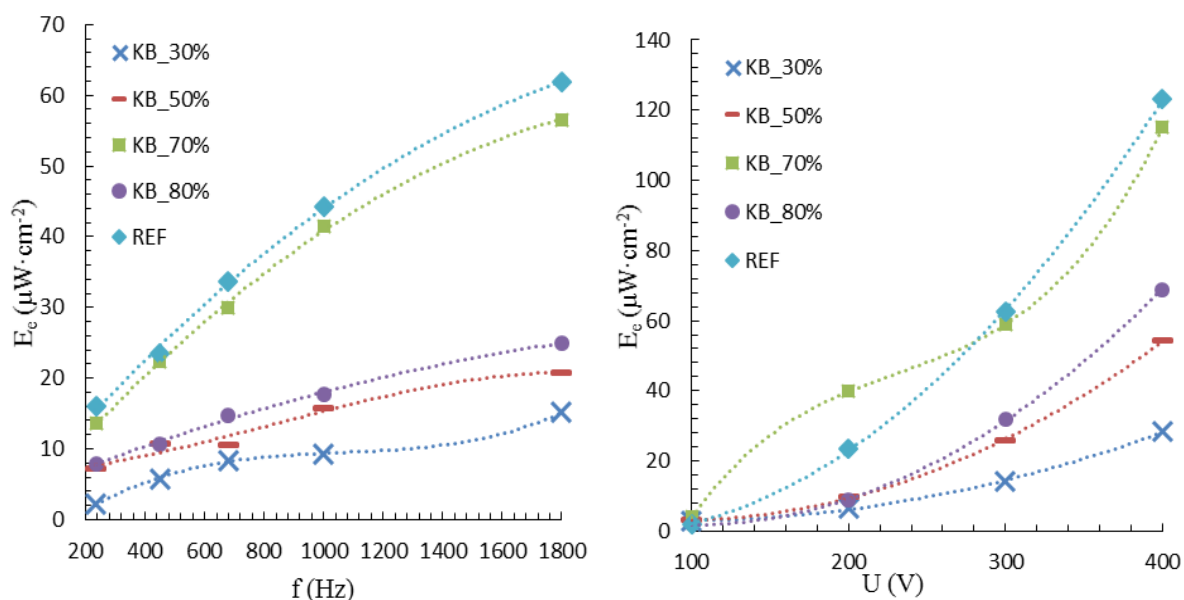
Tyto závislosti vyjadřují Obr. 24 a Obr. 25, na kterých můžeme vidět, že panel vykazuje vzrůstající spektrální ozáření emitovaného záření na měnící se frekvenci a napětí. Závislosti mají stejný trend, avšak při změně frekvence na zařízení dochází také k posunu maxima vyzařovaného záření, tedy dochází ke změně barvy panelu. Zatímco při změně budícího napětí

zařízení je hodnota maxima neměnná, nedochází ke změně vlnové délky vyzařovaného záření. Trend odezvy je obdobný i u ostatních připravených panelů (viz Příloha).

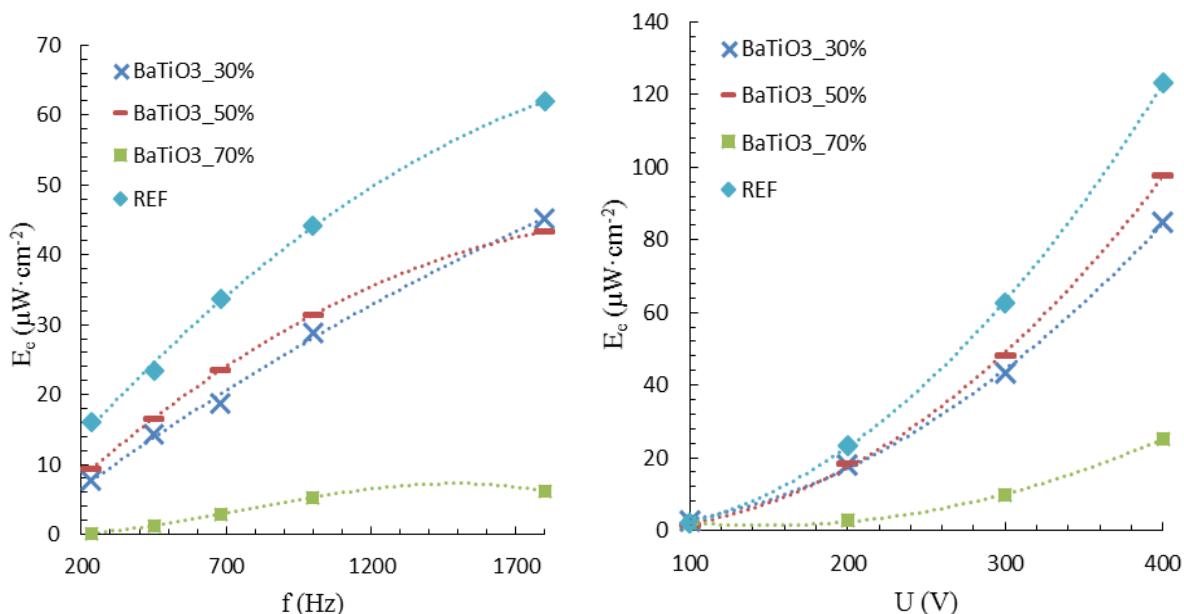
Abychom mohli sledovat vliv relativních permitivit poživ, byl vynesena integrál pod křivkou v závislosti na frekvenci a napětí pro různé poměry ZnS a pojiva (Obr. 26, Obr. 27 – Závislost intenzity ozáření na napětí a frekvenci).

Srovnáme-li intenzity ozáření komerčního pojiva s BaTiO<sub>3</sub> (Obr. 26 vs. Obr. 27) můžeme porovnat výrazně menší intenzitu ozáření u komerčního pojiva, např. u 50 % podílu ZnS je to téměř o polovinu. Tento jev lze odvodit z teoretického základu (viz Rovnice (2)), kde se s narůstající hodnotou dielektrické konstanty zvětšuje intenzita ozáření v důsledku zvětšujícího se elektrického pole na částicích ZnS. Tohoto efektu si můžeme všimnout i u menšího zastoupení zrn ZnS, tedy u komerčního pojiva a BaTiO<sub>3</sub> v pojivu o hmotnostním poměru 30 %. Intenzita ozáření u komerčního pojiva je 10 μW·cm<sup>-2</sup>, zatímco u pojiva obsahující BaTiO<sub>3</sub> je intenzita o polovinu větší. Z hlediska závislosti na napětí je chování obdobné. Se zvětšujícím přídavkem fosforu stoupá intenzita ozáření.

U všech vzorků byl pozorován stejný trend, přičemž všechny vzorky vykazovaly podobné chování v porovnání s referenčním vzorkem. Závislost intenzity ozáření na napětí byly pro vzorky s menším množstvím přidaného prášku ZnS více strmější. Naopak pro vzorky s větším množstvím ZnS byl vzestup menší. Ze všech obrázků je patrné, že dochází ke vzrůstající tendenci při zvětšování hodnot napětí i frekvence.



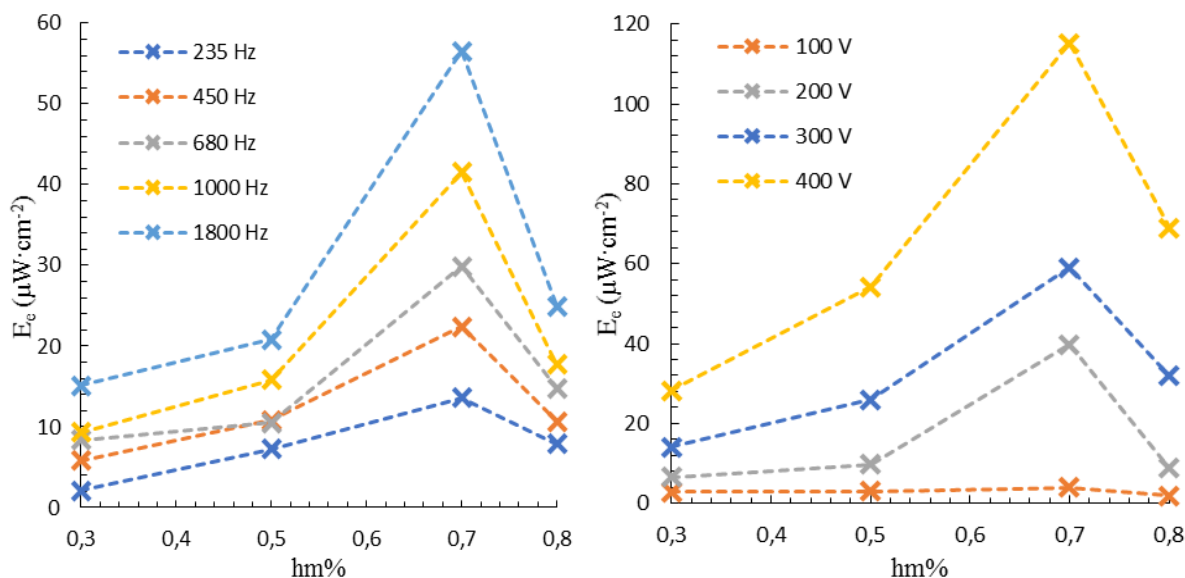
Obr. 26: Závislost intenzity ozáření na frekvenci (vlevo) a napětí (vpravo) pro komerční pojivo ve srovnání s referencí



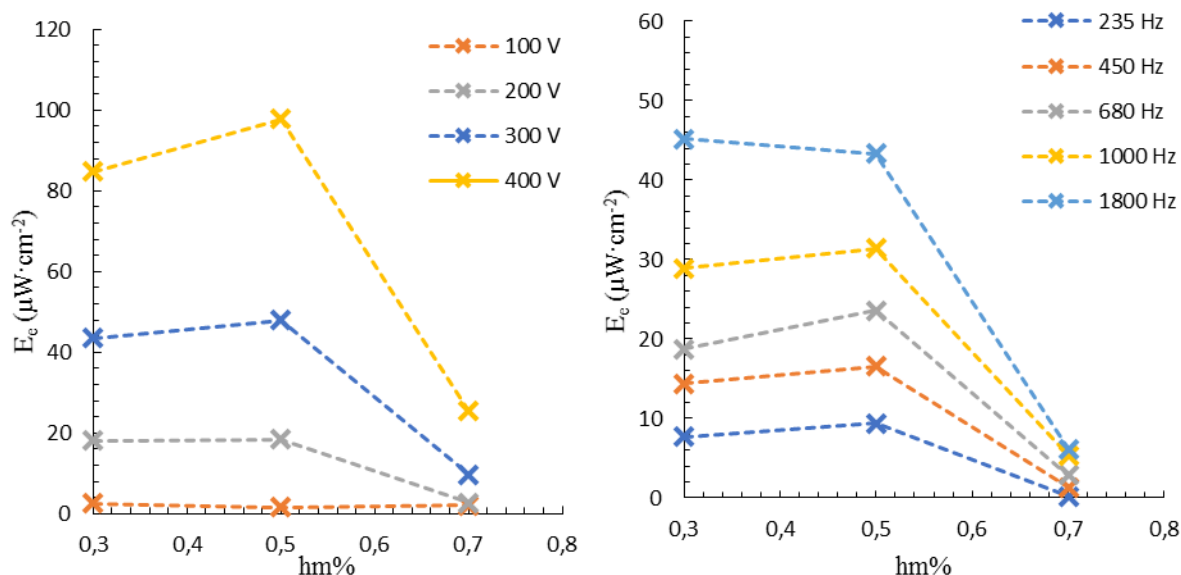
Obr. 27: Závislost intenzity ozáření na frekvenci (vlevo) a napětí (vpravo) pro BaTiO<sub>3</sub> v pojivu ve srovnání s referencí

Ze závislosti na Obr. 26 a Obr. 27 si také povšimnout, že abychom dosáhli podobných hodnot celkové intenzity ozáření, je zapotřebí menší množství fosforu u pojiva obsahující BaTiO<sub>3</sub> než u komerčního pojiva. Toto lze přisoudit různým hodnotám relativní permitivity. S větší hodnotou relativní permitivity je celková intenzita ozáření větší s menším množstvím fosforu v aktivní vrstvě. Zatímco u aktivního materiálu s komerčním pojivem je celková hodnota intenzity větší s vyšším množstvím fosforu.

Z obou dvou obrázků si lze povšimnout, že nejvyšší množství zrn ZnS není vždy úplně nejvýhodnější. U komerčního pojiva je to zastoupení při 80 % ale u BaTiO<sub>3</sub> je to jen 60 %. Dielektrikum BaTiO<sub>3</sub> obsahuje také částice, nebylo tedy možné dále připravit větší zastoupení. U komerčního pojiva s 80 % ZnS a u BaTiO<sub>3</sub> v pojivu s 60 % ZnS byla vrstva zcela nehomogenní. Aby bylo dosaženo větších hodnot intenzity ozáření, musela by být vrstva reologicky upravena. Tento pokles lze tedy přisoudit pravděpodobně špatné homogenitě.



Obr. 28: Závislost intenzity ozáření na hmotnostním poměru s měnící se frekvencí (vlevo) a napětí (vpravo) pro komerční pojivo



Obr. 29: Závislost intenzity ozáření na hmotnostním poměru s měnící se frekvencí (vlevo) a napětí (vpravo) pro BaTiO<sub>3</sub> v pojivu

Vhodné množství ZnS v pojivu nám ukazují Obr. 28, Obr. 29 - Závislost intezity ozáření na hmotnostním poměru. U komerčního pojiva dochází ke vzrůstu intezity, ale po překročení hmotnostního poměru 70 % dojde k výraznému poklesu intezity. Celková účinnost zařízení klesne na hodnotu, která je i u vzorku s poměrem 50 % u BaTiO<sub>3</sub>. Toto již bylo experimentálně ověřeno [5], kde při velkém zastoupení zrn ZnS klesá intezita (viz Obr. 8). Lze tedy u komerčního pojiva určit ideální poměr kolem hodnoty 70 %. U částic BaTiO<sub>3</sub> v pojivu je trend podobný, ideální poměr pro největší intezitu ozáření je ale již v okolí 50 %. Ze závislosti vyplývá, že s rostoucím poměrem roste intezita ozáření, což je v souladu s teorií (viz Obr. 6)

## 5 ZÁVĚR

V této diplomové práci byla vypracována teoretická část, která zahrnuje principy elektroluminiscence, vhodné materiály pro přípravu světlo emitujícího panelu, metody charakterizace a přípravy pomocí tiskových technik a teoretický model popisující vliv dielektrických vlastností pojiva elektroluminiscenčních částic na výslednou svítivost. Na základě získaných poznatků byly připraveny elektroluminiscenční panely v různém hmotnostním poměru pojiva s různou relativní permitivitou a luminiscenčního fosforu pomocí sítotisku, které byly následně charakterizovány.

Aby mohl být sledován vliv výsledné intenzity ozáření na vybraných pojivech bylo zapotřebí nejprve zjistit dielektrické konstanty použitých pojiv. Proto byly připraveny modelové součástky na principu deskového kondenzátoru. Ze závislosti relativní permitivity na frekvenci byly stanoveny relativní permitivity pro použitá pojiva. Jelikož některá pojiva vykazovala podobnou hodnotu, bylo pro další studii vybráno pouze komerční pojivo o dielektrické konstantě 1,86 a částice  $\text{BaTiO}_3$  v pojivu o dielektrické konstantě velmi odlišné a to 66.

Následně byly připraveny modelové elektroluminiscenční panely s použitím studovaných pojiv, do kterých byl vmíchán luminiscenční fosfor  $\text{ZnS}$  s hmotnostními poměry 30 %, 50 %, 70 % a 80 %. U takto připravených panelů byly zjišťovány závislosti intenzity ozáření na měnící se frekvenci (při konstantním napětí 250 V) a napětí (při 1000 Hz). Následně byla změřena emisní spektra pro každý vzorek s různým zastoupením pojiva a fosforu. Všechny tyto hodnoty vykazovaly obdobný trend.

Aby mohl být lépe sledován vliv použitého pojiva, byl vynesena integrál pod křivkou spektrálního ozáření v závislosti na frekvenci a napětí. V porovnání komerčního pojiva a  $\text{BaTiO}_3$  v pojivu byla pozorována intenzita ozáření pro stejné zastoupení fosforu  $\text{ZnS}$ . U dielektrika s částicemi  $\text{BaTiO}_3$  byly pozorovány vyšší intenzity emitovaného záření při menším zastoupením  $\text{ZnS}$ . Tento jev lze přisoudit dielektrické konstantě částic  $\text{BaTiO}_3$ , která je řádově v desítkách. Z tohoto důvodu je u něj pozorován větší vliv elektrického pole, tudíž dochází k vyšší intenzitě ozáření připravených panelů.

Při práci bylo prokázáno, že se zvětšující hodnotou dielektrické konstanty dochází ke zvýšení intenzity ozáření připraveného elektroluminiscenčního panelu. Tento poznatek bude možné využít při návrhu optimalizovaných pojiv pro tato zařízení a tedy při vývoji panelů s větší účinností přeměny elektrické energie na energii světelnou.

## 6 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] SMET, Philippe F., Iwan MOREELS, Zeger HENS a Dirk POELMAN. Luminescence in Sulfides: A Rich History and Bright Future. *Materials*. 2010, **3**(4), 2834-2883. DOI:10.3390/ma3042834. ISSN 1996-1944.
- [2] BREDOL, Michael a Hubert SCHULZE DIECKHOFF. Materials for Powder-Based AC-Electroluminescence. *Materials*. 2010, **3**(2), 1353-1374. DOI: 10.3390/ma3021353. ISSN 1996-1944.
- [3] HOWARD, B. T., H. F. IVEY a W. LEHMANN. Voltage Dependence of Electroluminescent Brightness. *Physical Review*. 1954, **96**(3), 799-800. DOI: 10.1103/PhysRev.96.799. ISSN 0031-899X.
- [4] RACK, P.D., A. NAMAN, P.H. HOLLOWAY, S-S. SUN a R.T. TUENGE. Materials Used in Electroluminescent Displays. *MRS Bulletin*. 1996, **21**(03), 49-58. DOI: 10.1557/S0883769400036137. ISSN 0883-7694.
- [5] SHARMA, Gaytri, Sang Do HAN, Jung Duk KIM, Satyender P. KHATKAR a Young WOO RHEE. Electroluminescent efficiency of alternating current thick film devices using ZnS: Cu,Cl phosphor. *Materials Science and Engineering: B*. 2006, **131**(1-3), 271-276. DOI: 10.1016/j.mseb.2006.03.037. ISSN 09215107.
- [6] KITAI, Adrian. *Luminescent materials and applications*. Hoboken, NJ: John Wiley, c2008. ISBN 978-0-470-05818-3.
- [7] CHEN, Feng a Yingwei XIANG. AC Powder Electroluminescence. *Luminescent Materials and Applications*. Chichester, UK, 2008, 249-268. Wiley Series in Materials for Electronic and Optoelectronic Applications. DOI: 10.1002/9780470985687.ch8. ISBN 9780470985687.
- [8] CHEN, Feng, Adrian H. KITAI a Yingwei XIANG. Temperature-Dependent Degradation of AC Powder EL. *Journal of The Electrochemical Society*. 2009, **156**(7). DOI: 10.1149/1.3131614. ISSN 00134651.
- [9] WARKENTIN, M., F. BRIDGES, S. A. CARTER a M. ANDERSON. Electroluminescence materials ZnS: Cu,Cl and ZnS. *Physical Review B*. 2007, **75**(7). DOI: 10.1103/PhysRevB.75.075301. ISSN 1098-0121.
- [10] FANG, Xiaosheng, Tianyou ZHAI, Ujjal K. GAUTAM, Liang LI, Limin WU, Yoshio BANDO a Dmitri GOLBERG. ZnS nanostructures: From synthesis to applications. *Progress in Materials Science*. 2011, **56**(2), 175-287. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2010.10.001. ISSN 00796425.
- [11] YEH, Chin-Yu, Z. W. LU, S. FROYEN, Alex ZUNGER, Limin WU, Yoshio BANDO a Dmitri GOLBERG. Zinc-blende-wurtzite polytypism in semiconductors: From synthesis to applications. *Physical Review B*. 1992, **46**(16), 10086-10097. DOI: 10.1103/PhysRevB.46.10086. ISSN 0163-1829.



- [12] CHEN, Hongxia, Daning SHI, Jingshan QI, Jianming JIA, Baolin WANG, Yoshio BANDO a Dmitri GOLBERG. The stability and electronic properties of wurtzite and zinc-blende ZnS nanowires: From synthesis to applications. *Physics Letters A*. 2009, **373**(3), 371-375. DOI: 10.1016/j.physleta.2008.11.060. ISSN 03759601.
- [13] TRAN, T. K., W. PARK, W. TONG, M. M. KYI, B. K. WAGNER a C. J. SUMMERS. Photoluminescence properties of ZnS epilayers. *Journal of Applied Physics*. 1997, **81**(6), 2803-2809. DOI: 10.1063/1.363937. ISSN 0021-8979.
- [14] SHON, P.K., J.H. SHIN, G.C. KIM, S.N. LEE, Hong Lee PARK a Sang Do HAN. Enhanced luminescence related to transparent conductive oxide in ZnS-based EL device fabricated by screen printing method: Mn, Cu, Cl phosphor. *Journal of Luminescence*. 2012, **132**(7), 1764-1767. DOI: 10.1016/j.jlumin.2012.01.012. ISSN 00222313.
- [15] PARK, K.W., H.S. JEONG, J.H. PARK, et al. Flexible powder electroluminescent device on silver nanowire electrode. *Journal of Luminescence*. 2015, **165**, 216-219. DOI: 10.1016/j.jlumin.2015.04.030. ISSN 00222313.
- [16] AVANESYAN, V.T, E.V BONDARENKO. *Dielectric properties of a new polymer binder for electroluminescent light sources*, Russia
- [17] HÖSEL, M; KREBS, F C. *Large-scale Roll-to-Roll Fabrication of Organic Solar Cells for Energy Production*. Roskilde, 2013. PhD Thesis. Technical University of Denmark, Denmark. Department of Energy Conversion and Storage Solar Energy.
- [18] IZDEBSKA, Joanna. Applications of Printed Materials. *Printing on Polymers*. Elsevier, 2016, 2016, 371-388. DOI: 10.1016/B978-0-323-37468-2.00023-3. ISBN 9780323374682.
- [19] NOVAKOVIĆ, Dragoljub, Nemanja KAŠIKOVIĆ, Gojko VLADIĆ a Magdolna PÁL. Screen Printing. *Printing on Polymers*. Elsevier, 2016, 247-261. DOI: 10.1016/B978-0-323-37468-2.00015-4. ISBN 9780323374682.
- [20] SØNDERGAARD, Roar, Markus HÖSEL, Dechan ANGMO, Thue T. LARSEN-OLSEN a Frederik C. KREBS. Roll-to-roll fabrication of polymer solar cells. *Materials Today*. Elsevier, 2012, 2016, **15**(1-2), 36-49. DOI: 10.1016/S1369-7021(12)70019-6. ISBN 9780323374682. ISSN 13697021.
- [21] POSPÍŠIL, Jan. *Studium optoelektrických vlastností tenkých vrstev organických polovodičů* [online]. Brno, 2012, Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta chemická. Ústav fyzikální a spotřební chemie. Vedoucí práce Oldřich Zmeškal
- [22] THOMAS, Sabu, Raju THOMAS, Ajesh K. ZACHARIAH a Raghvendra Kumar MISHRA. *Spectroscopic methods for nanomaterials characterization*. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, [2017]. ISBN 978-0-323-46140-5.
- [23] POSPÍŠIL, Jan, Alexander KOLAVELNKO, Veronika SCHMIEROVÁ, Oldřich ZMEŠKAL a Martin VALA, *Impedance Spectroscopy Study of Organic Photovoltaic Cells with an Inkjet Printed Hole-Extracting Graphene Oxide Layer*. Brno

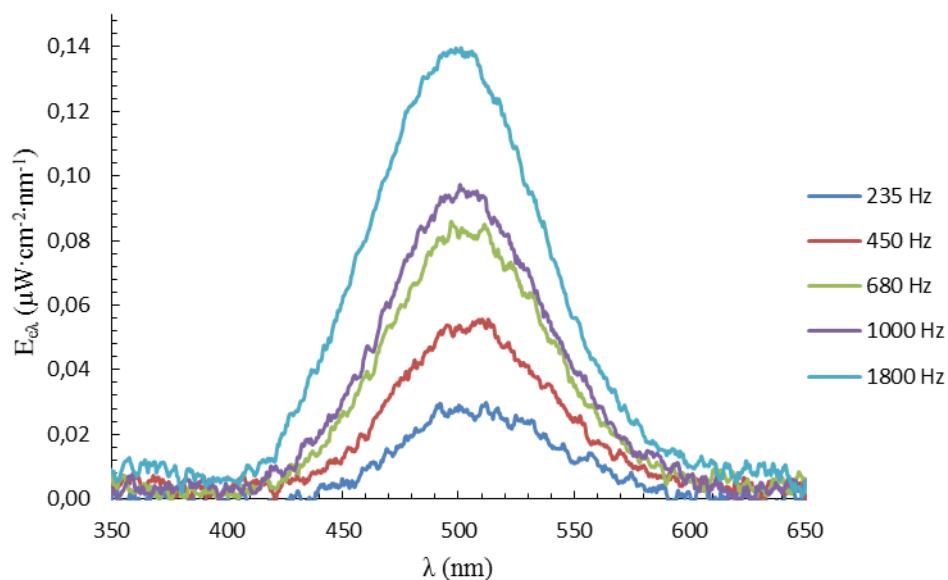
- [24] RYER, Alex. Light measurement handbook. Newburyport, MA: International Light, 1997. ISBN: 09-658-3569-3.
- [25] LEE, Hsien-che. Radiometry. *Introduction to Color Imaging Science*. Cambridge: Cambridge University Press, 2005, s. 29-48. DOI: 10.1017/CBO9780511614392.004. ISBN 9780511614392.

## 7 SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ

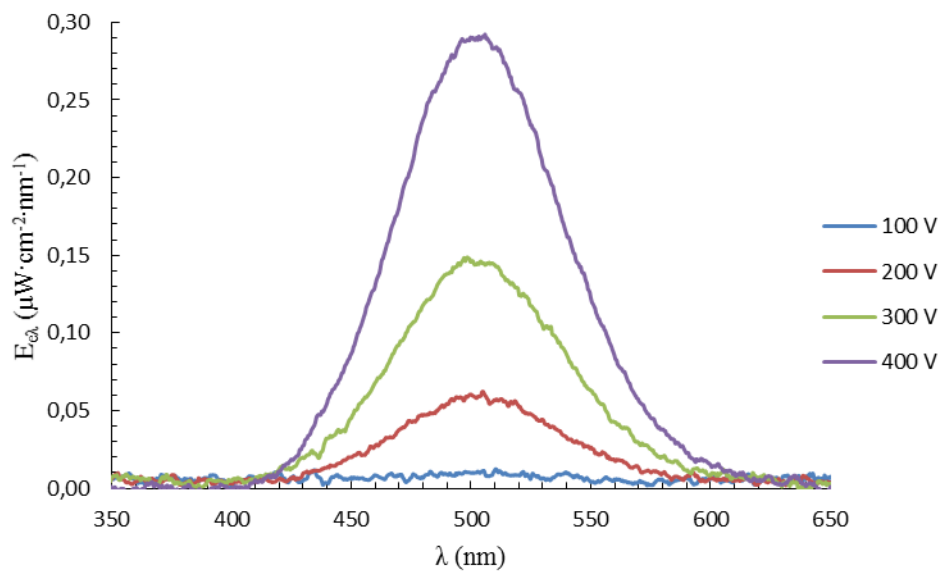
Zkratka	Vysvětlení zkratky
ACEL	elektroluminiscence buzená střídavým proudem (Alternate Current ElectroLuminescence)
Ag NW	stříbrné nanodrátky (Ag nanowire)
BaS	sulfid barnatý
BaSO <sub>4</sub>	síran barnatý (baryt)
BaTiO <sub>3</sub>	titaničitan barnatý
DCEL	elektroluminiscence buzená stejnosměrným proudem (Direct Current ElectroLuminescence)
ITO	směsný oxid india a cínu (Indium Tin Oxide)
LCD	displej z tekutých krystalů (Liquid Crystal Display)
PEDOT:PSS	poly(3,4-ethylendioxythiofen)polystyren sulfonát
PET	polyethylentereftalát
PMMA	polymethymethakrylát
PVDF	polyvynilidendifluorid
TFACEL	tenkovrstvá elektroluminiscence buzená střídavým proudem (Thin Film Alternate Current ElectroLuminescence)
SiBi	organokřemičité pojivo (Silica Binder)
ZnS	sulfid zinečnatý

<b>Symbol</b>	<b>Popis veličiny</b>
$A$	plocha elektrod plošného kondenzátoru
$d$	vzdálenost mezi elektrodami
$C$	kapacita
$E_m$	intenzita elektrického pole
$E_{ZnS}$	intenzita elektrického pole pro zrna ZnS
$U$	aplikované napětí
$\varepsilon_{r1}$	relativní permitivita ZnS
$\varepsilon_{r2}$	relativní permitivita pojiva
$\varepsilon_0$	relativní permitivita vakua
$E_e$	intenzita ozáření (iradiance)
$E_{e\lambda}$	spektrální ozáření
$\Phi_e$	zářivý tok
$\lambda$	vlnová délka

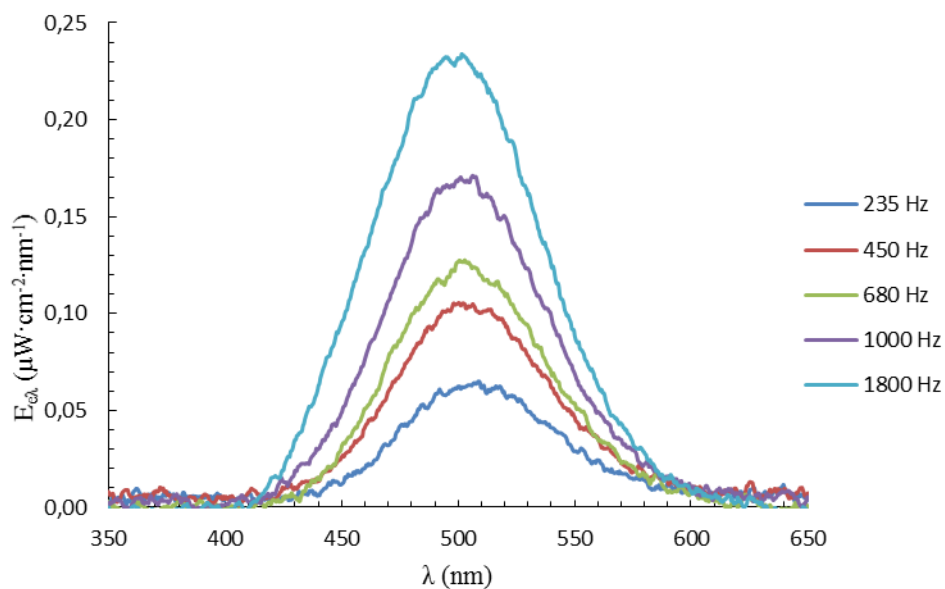
## 8 PŘÍLOHA



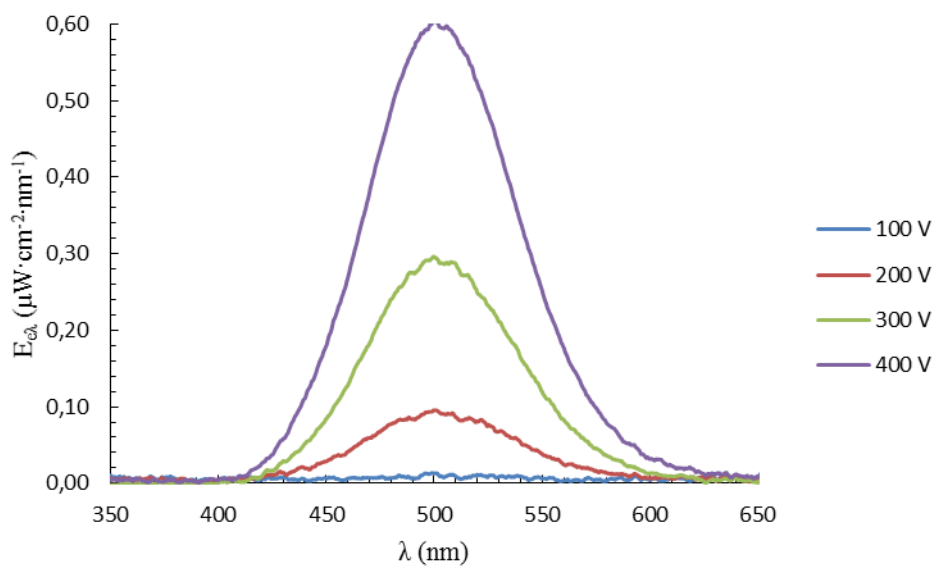
Příloha 1: Emisní spektrum komerčního pojiva s přídavkem 30 % ZnS při 250 V



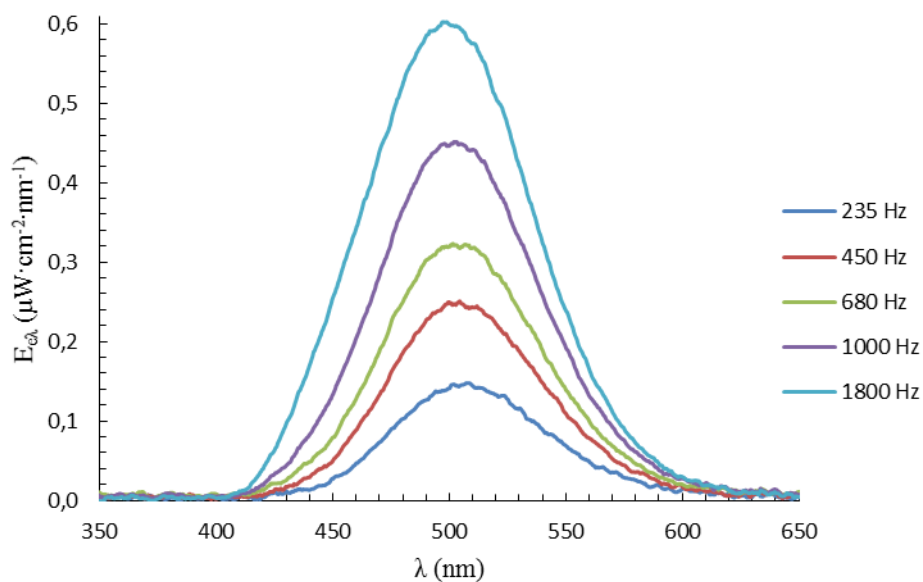
Příloha 2: Emisní spektrum komerčního pojiva s přídavkem 30 % ZnS při 1000 Hz



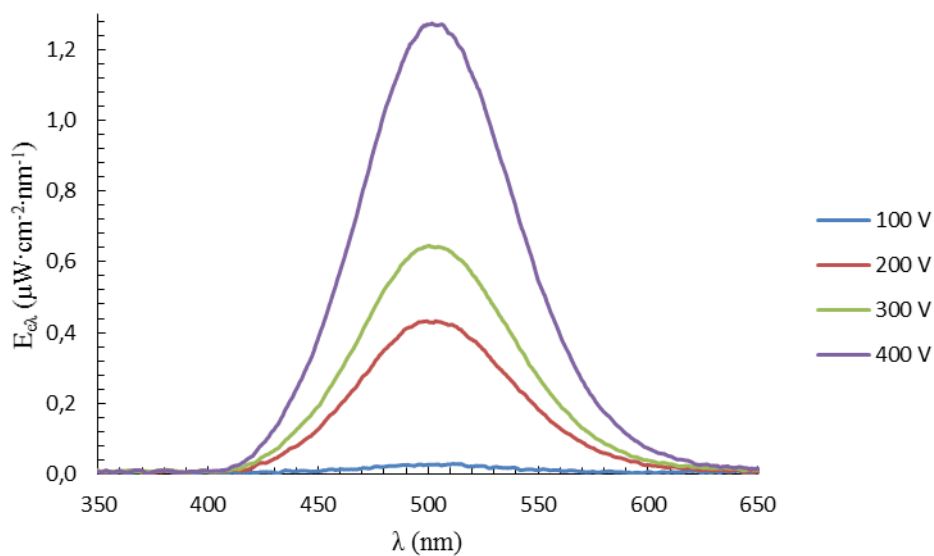
Příloha 3: Emisní spektrum komerčního pojiva s přídavkem 50 % ZnS při 250 V



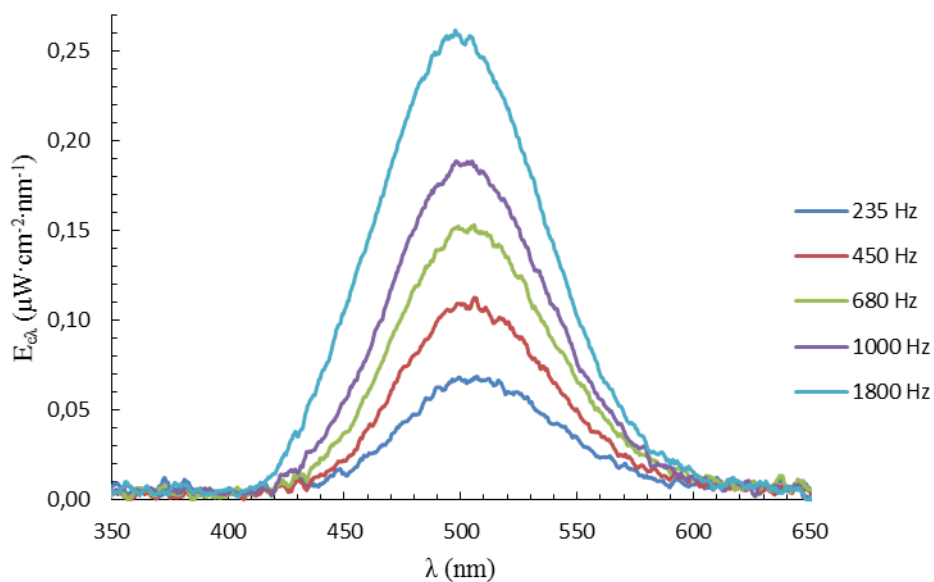
Příloha 4: Emisní spektrum komerčního pojiva s přídavkem 50 % ZnS při 1000 Hz



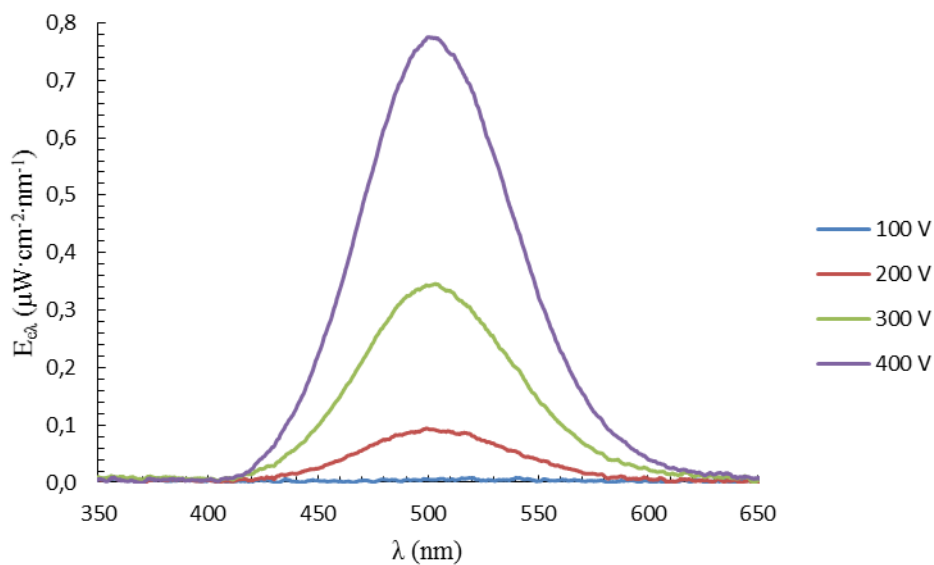
Příloha 5: Emisní spektrum komerčního pojava s přídavkem 70 % ZnS při 250 V



Příloha 6: Emisní spektrum komerčního pojava s přídavkem 70 % ZnS při 1000 Hz

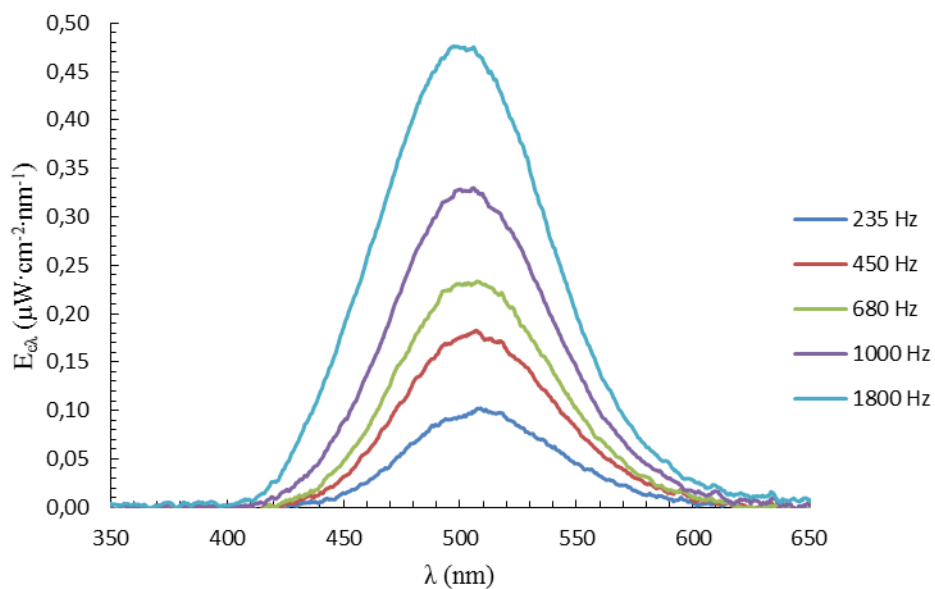


Příloha 7: Emisní spektrum komerčního pojíva s přídavkem 80 % ZnS při 250 V

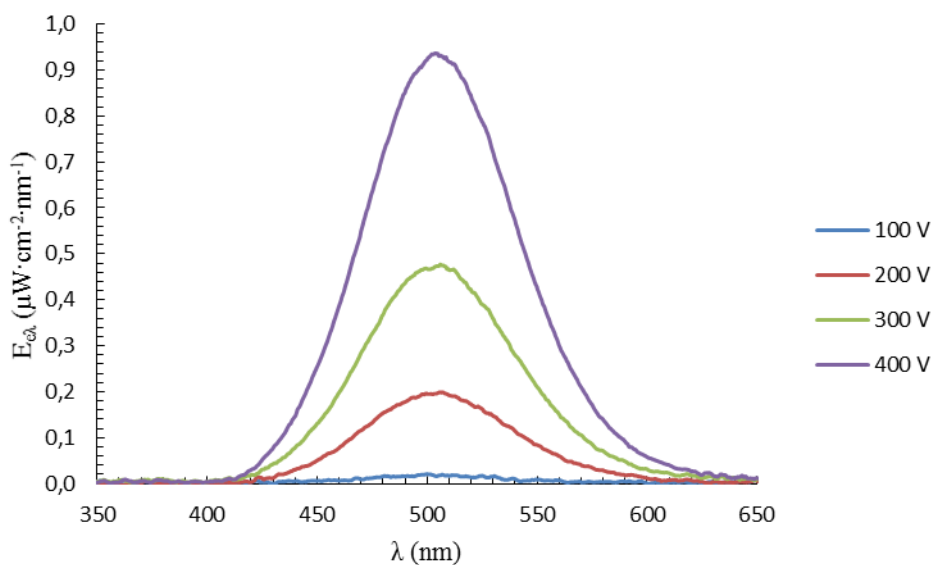


Příloha 8: Emisní spektrum komerčního pojíva s přídavkem 80 % ZnS při 1000 Hz

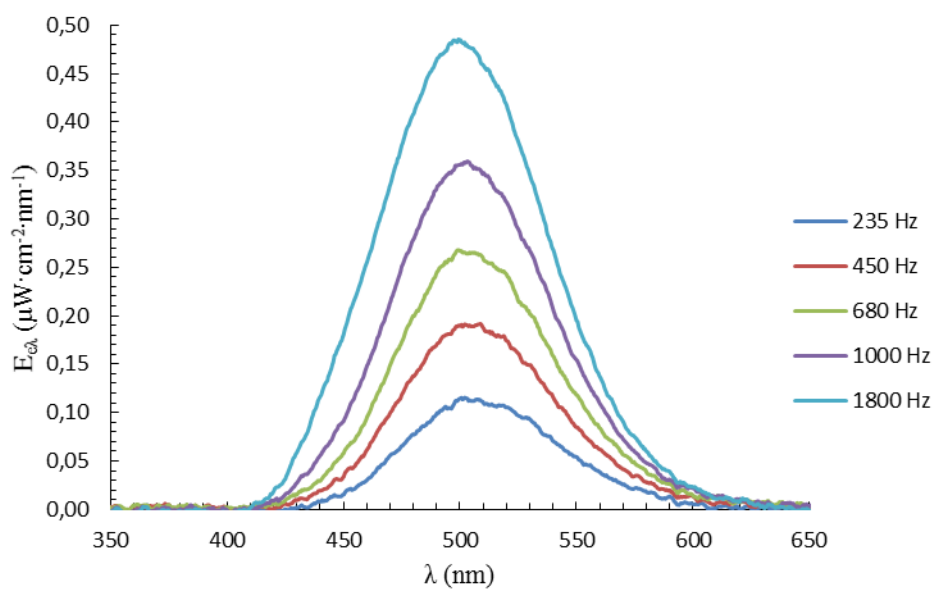




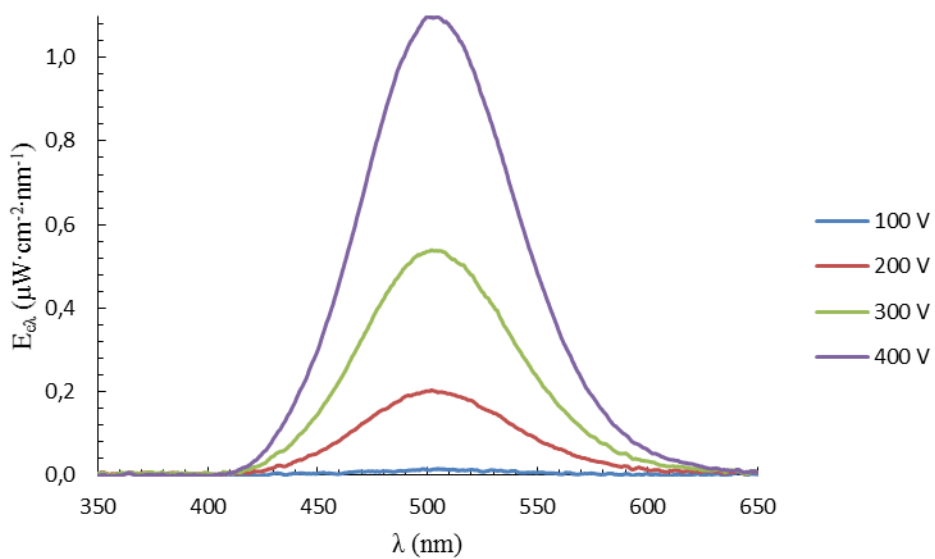
Příloha 9: Emisní spektrum BaTiO<sub>3</sub> v pojivu s přídavkem 30 % ZnS při 250 V



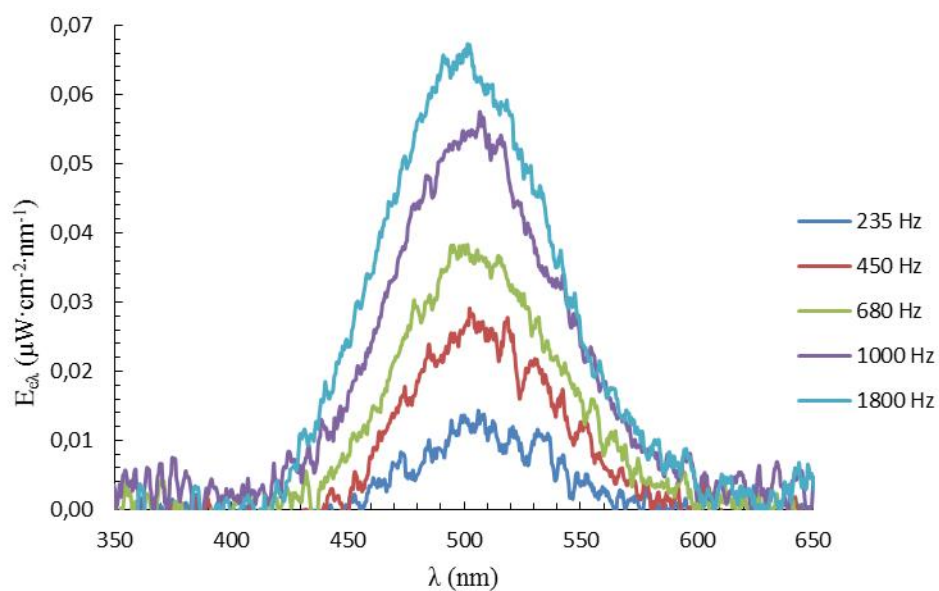
Příloha 10: Emisní spektrum BaTiO<sub>3</sub> v pojivu s přídavkem 30 % ZnS při 1000 Hz



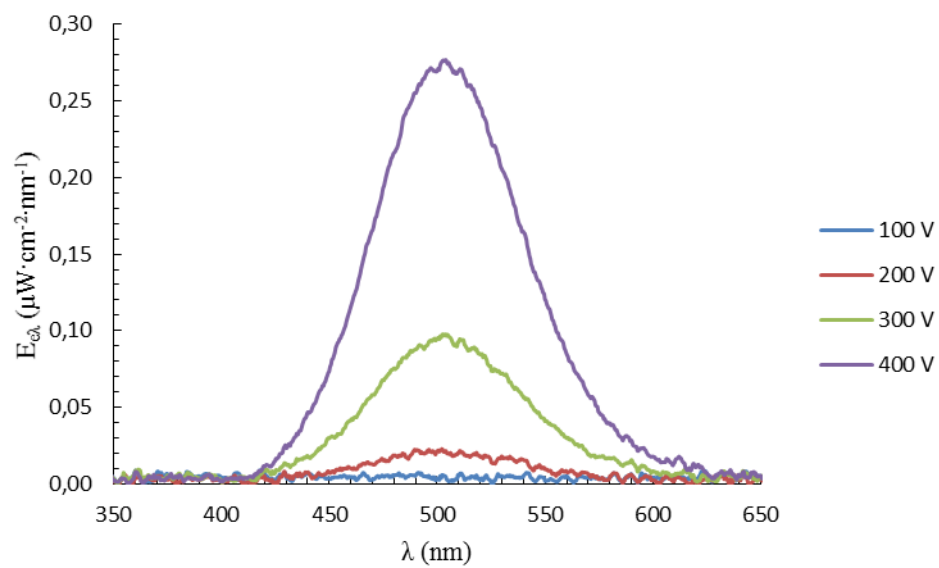
Příloha 11: Emisní spektrum BaTiO<sub>3</sub> v pojivu s přidavkem 50 % ZnS při 250 V



Příloha 12: Emisní spektrum BaTiO<sub>3</sub> v pojivu s přidavkem 50 % ZnS při 1000 Hz



Příloha 13: Emisní spektrum BaTiO<sub>3</sub> v pojivu s přidavkem 70 % ZnS při 250 V



Příloha 14: Emisní spektrum BaTiO<sub>3</sub> v pojivu s přidavkem 70 % ZnS při 1000 Hz