



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNologiÍ
ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND
COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC

ORGANICKÉ POLOVODIVÉ MATERIÁLY

ORGANIC SEMICONDUCTORS MATERIALS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

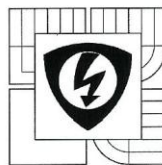
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

MICHAL ČERNOŠEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

ING. JIŘÍ ŠPINKA



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií
Ústav elektrotechnologie

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Mikroelektronika a technologie

Student: Michal Černošek
Ročník: 3

ID: 119377
Akademický rok: 2010/11

NÁZEV TÉMATU:

Organické polovodivé materiály

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s problematikou organických polovodičů a součástek. Na vzorcích doporučených vedoucím práce proměřte jejich elektrické vlastnosti a měření vyhodnoťte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 7.2.2011

Termín odevzdání: 2.6.2011

Vedoucí práce: Ing. Jiří Špínka
Konzultanti bakalářské práce:


doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.
předseda oborové rady



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 organickými materiály a součástkami z těchto materiálů zkonstruovaných. Popsány jsou také principy funkcí, struktura výsledné součástky a problematika s výrobou spojená. Dále jsou probrané výhody a nevýhody těchto součástek. Stručně jsou popsány jevy, které se v organických materiálech vyskytují. Velká pozornost v této práci je věnována organickým světlo emitujícím diodám. V experimentální části byly měřeny elektrické vlastnosti PLED struktur vystavené odlišným zdrojům osvětlení. Byl zkoumán vliv osvětlení na přenos nosičů náboje.

KLÍČOVÁ SLOVA

organické polovodiče, OLED, OFET, OPVC, PLED

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with organic materials and parts made of this materials. Described are also principles of their functions, structure of whole part and issues linked with production. Next are referred advantages and disadvantages of those parts. Described are also events which occurs during using organic parts. Attention is given to light emitting diodes. In experimental part is measured electrical attributes of PLED structures, exposed to different sources of illumination. Influence of illumination to transfer of electrical charge is examined too.

KEYWORDS

organic semiconductor, OLED, OFET, OPVC, PLED

ČERNOŠEK, M. *Organické polovodiče a součástky*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav mikroelektroniky, ústav elektrotechnologie 2011. 41s., 11s. příloh. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jiří Špinka.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Organické polovodivé materiály jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské 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 bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Jiřímu Špinkovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce. Dále děkuji týmu Doc. Ing. Martina Weitera za poskytnutí vzorků organických LED.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

OBSAH

Seznam obrázků	viii
Seznam tabulek	x
Úvod	1
1 Organické polovodiče (OS)	2
1.1 Historie	2
1.2 Základní vlastnosti	2
1.3 Výroba	3
1.3.1 Povlakové technologie (mokrě)	3
1.3.2 Vakuová tepelná depozice	3
2 Organické fotovoltaické články (OPVC)	4
2.1 Princip funkce	4
Fotovoltaický jev	4
2.2 Struktury polymerních solárních článků	5
2.2.1 Solární články na bázi organických barviv	5
2.2.2 Dvouvrstvé solární články	5
2.2.3 Objemové heteropřechodové články	6
2.2.4 Tandemová struktura polymerového článku	7
2.3 Vývoj organických solárních článků	7
2.4 Organické materiály používané v současnosti	8
3 Polem řízené tranzistory (OFET)	9
3.1 Princip	9
3.2 Struktury polem řízených tranzistorů	10
3.2.1 MESFET - kov/polovodič	10
3.2.2 MISFET – kov/izolant/polovodič	10
3.2.3 TFT- Struktura tenkých filmů	11
4 Organická svítící dioda (OLED)	12
4.1 Druhy	12
4.1.1 PMOLED — Pasivní matice organických LED	13

4.1.2	AMOLED — Aktivní matice organických LED	13
4.1.3	TOLED – transparentní organická LED.....	14
4.1.4	PHOLED — Fosforeskující OLED dioda	14
4.1.5	FOLED – Flexibilní OLED dioda.....	15
4.1.6	WOLED- Bílá OLED dioda.....	15
4.1.7	PLED- polymerní OLED dioda	15
4.2	Výroba	15
4.3	Struktura	16
4.4	Princip.....	17
5	Experimentální část	18
5.1	Vytvořené substráty.....	18
5.1.1	Měření tloušťky vrstev	18
5.2	Elektrická měření	19
5.2.1	Použité zařízení	19
5.3	Výpočet dynamického odporu	21
5.4	Postup měření.....	21
5.5	První vzorek.....	21
5.5.1	Výsledky měření za tmy	22
5.5.2	Výsledky měření při stropním osvětlení.....	25
5.5.3	Výsledky měření při LED osvětlení.....	27
5.6	Shrnutí pro 1. vzorek.....	29
5.7	Druhý vzorek	30
5.7.1	Výsledky měření za tmy	30
5.7.2	Výsledky měření při stropním osvětlení.....	33
5.7.3	Výsledky měření při LED osvětlení.....	35
5.7.4	Shrnutí pro 2. vzorek	37
5.8	Srovnání 1. a 2. vzorku.....	38
6	Závěr	41
	Literatura	42
	Seznam symbolů, veličin a zkratek	44
	Seznam příloh	45

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1:	Dvě vazby sp_2 hybridizovaných uhlíkových atomů.....	2
Obr. 2.1:	Struktura (DSSC).	6
Obr. 2.2:	Typická struktura organického heteropřechodového článku.	6
Obr. 2.3:	Průřez tandemovou strukturou.	7
Obr. 3.1:	Princip funkce OFET:	10
Obr. 3.2:	Struktury OFET tranzistorů: a) MISFET (kov/izolant/polovodič); b) MESFET (kov/polovodič); c) TFT: struktura tenkého filmu tranzistoru (převzato z [17]).	11
Obr. 4.1:	Struktura organické luminiscenční diody.	12
Obr. 4.2:	a) Aktivní matice: katoda, organická vrstva, TFT film, anoda. b) Pasivní matice: katoda, organická, vrstva anoda (převzato z [4]).	13
Obr. 5.1:	Průřezy 1 a 2 vzorku s orientačním pohledem shora.	18
Obr. 5.2:	Pořadí jednotlivých měření při pohledu shora.....	19
Obr. 5.3:	Měřicí přístroje.....	20
Obr. 5.4:	První vzorek složený z materiálů ITO/PEDOT/Al ₃ /Al.....	22
Obr. 5.5:	A-V charakteristika 4. diody v přímém směru, se stanoveným U_p a $\Delta U, \Delta I$ pro výpočet dynamického odporu.....	23
Obr. 5.6:	A-V charakteristika 4. diody v závěrném směru, s určeným závěrným napětím daným průsečíkem přímky U_z s osou napětí.	23
Obr. 5.7:	A-V charakteristiky pro 4., 5. a 8. diodu za tmy [1. vzorek].....	24
Obr. 5.8:	A-V charakteristiky závěrného směru pro 4., 5. a 8. diodu za tmy [1. vzorek]	24
Obr. 5.9:	A-V charakteristika pro 2., 6. a 7. diodu při stropním osvětlení [1. vzorku].	26
Obr. 5.10:	A-V charakteristika závěrného směru pro 2., 6. a 7. diodu při stropním osvětlení [1. vzorku].....	26
Obr. 5.11:	A-V charakteristika pro 1., 3. a 7 diodu při LED osvětlení [1. vzorek].....	28
Obr. 5.12:	A-V charakteristika závěrného směru pro 1., 3. a 7. diodu při LED osvětlení [1. vzorku].	28
Obr. 5.13:	Vzorek 2. ITO/PEDOT/MDMO-PPV/Al ₃ /Al reálný pohled shora a demonstrativní pohled na rozmístění diod	30
Obr. 5.14:	A-V charakteristika 2. diody v přímém směru, se stanoveným U_p a $\Delta U, \Delta I$ pro výpočet dynamického odporu [2. vzorek].	31

Obr. 5.15: A-V charakteristika 2. diody při měření v závěrném směru, se závěrným napětím daným průsečíkem přímky U_z s osou napětí [2. vzorek].	32
Obr. 5.16: A-V charakteristika pro 2., 4. a 8. diodu při měření za tmy [2. vzorek]	32
Obr. 5.17: A-V charakteristika pro 2., 4. a 8. diody v závěrném směru neosvětleného vzorku [2. vzorek]	33
Obr. 5.18: A-V charakteristika pro 2., 4. a 8 diodu při stropním osvětlení [2. vzorek].	34
Obr. 5.19: A-V charakteristika pro 2., 4. a 8. diodu v závěrném směru při stropním osvětlení. Levá proudová osa se vztahuje pro 2. a 4. diodu, pravá proudová osa pro 8. diodu.	35
Obr. 5.20: A-V charakteristika pro 2., 4. a 8. diodu při LED osvětlení [2. vzorek]	36
Obr. 5.21: A-V charakteristika pro 2., 4. a 8. diodu v závěrném směru při LED osvětlení [2. vzorek]	37
Obr. 5.22: Srovnání přenosů nosičů náboje 4. diody při měření za tmy	38
Obr. 5.23: Srovnání přenosů nosičů náboje pro 4. diodu při stropním osvětlení.	39
Obr. 5.24: Srovnání přenosů nosičů náboje pro 4. diodu při LED osvětlení.	40

SEZNAM TABULEK

Tab. 5.1:	Naměřené velikosti tloušťky vrstev.	19
Tab. 5.2:	Naměřené a odečtené hodnoty elektrických veličin a spočítaný R_d pro 8 diod při měření za tmy [1. vzorek].....	22
Tab. 5.3:	Naměřené a odečtené hodnoty elektrických veličin 8 diod a jejich vypočítaný R_d při stropním osvětlení [1. vzorek].	25
Tab. 5.4:	Naměřené a odečtené hodnoty elektrických veličin 8 diod a jejich vypočítaný R_d při LED osvětlení [1. vzorek].	27
Tab. 5.5:	Nejvyšší hodnoty U_p , I_p , U_z , I_z a R_d při rozdílném osvětlení.	29
Tab. 5.6:	Naměřené a odečtené hodnoty elektrických veličin a vypočítané R_d pro 7 diod při měření za tmy [2. vzorek].....	31
Tab. 5.7:	Naměřené a odečtené hodnoty elektrických veličin a spočítané R_d pro 7 diod při stropním osvětlení [2. vzorek].	34
Tab. 5.8:	Naměřené a odečtené hodnoty elektrických veličin a spočítané R_d pro 7 diod při LED osvětlení [2. vzorek].	36
Tab. 5.9:	Nejvyšší hodnoty U_p , I_p , U_z , I_z a R_d při rozdílném osvětlení [2. vzorek] ..	38

ÚVOD

Organické polovodiče nacházejí v současné době využití v celé řadě elektronických prvků, jako jsou např. organické tenkovrstvé tranzistory, organické a elektroluminiscenční diody-panely. Fyzikální vlastnosti organických polovodičů umožňují nejenom nahradit stávající drahé anorganické polovodiče v mnoha aplikacích, ale zejména vytvořit nové základní elektronické a optické součástky a zařízení. Tyto materiály, nebo struktury s těmito materiály vytvořené, vykazují velký potenciál. Některé společnosti investovaly do výzkumu nemalé finanční obnosy s úmyslem nahradit těžko zpracovatelný křemík. Organika má přinést levné a k prostředí šetrné řešení. Z dostupných výzkumů se zjistilo, že tyto materiály vykazují velkou pružnou přizpůsobivost, s možností aplikace při nízkých teplotách, což je perspektiva s možností využití nízkonákladových depozicí a výrobních technologií, které v konečném důsledku budou znamenat nízkou cenu finálního výrobku. Předmětem výzkumů je délka životnosti organických struktur, kombinování organických materiálů za účelem zvýšení účinnosti a dosažení vyšších přenosů nosičů náboje.

V bakalářské práci je zmíněn vývoj organických polovodičů a přibližné způsoby využití těchto materiálů, jako jsou polem řízené tranzistory, organické elektroluminiscenční diody a fotovoltaiické články, kde jsou organické materiály klíčovým parametrem. V praktické části byla provedena měření organických polymerních struktur a následně zjištěny jejich elektrické vlastnosti. Cílem mé práce bylo zjistit vliv osvětlení při použití různých zdrojů světla na pohyb nosičů náboje organickými polymerními materiály a provést srovnání.

1 ORGANICKÉ POLOVODIČE (OS)

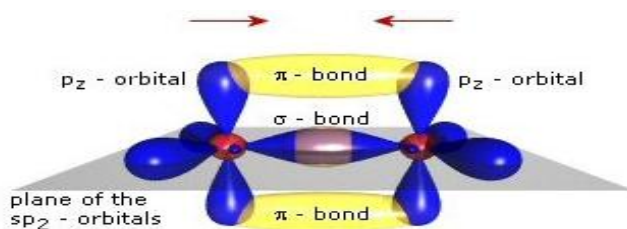
Jsou to organické materiály s polovodičovými vlastnostmi. Polovodivost může být ukázána na jednoduchých molekulách (monomery), nebo makromolekulách s malým počtem monomerních jednotek (oligomery) a molekulách s mnohonásobně se opakujícími strukturami jednotek (polymery). Do polovodivých malých molekul (aromatické uhlovodíky) patří polycyklické aromatické sloučeniny pentacenu, antracenu. Polymerní organické polovodiče zahrnují poly(3-hexylthiophene), poly(p fenylene vinylenu) a také polyacetylen a jeho deriváty. Typickým nosičem nábojů v organických polovodičích jsou díry a elektrony v π vazbách. Většina organických materiálů jsou izolátory, pokud je netvoří π konjugovaný systém. V tom případě je vodivost zajištěna elektrony, jenž se mohou pohybovat (přeskakovat, tunelovat) pomocí π -elektronových mraků.

1.1 Historie

Prvním organikem byl syntetický polymer, vytvořený v 18. století německým chemikem Unverdorbenem. Oxidací anilínu vyráběl zelené oxidační produkty, kterými se dají v dnešní terminologii označit polyaniliny. Kolem roku 1970 výzkumníci objevili melanin jako organický polovodič. Následným studiem se ukázalo, že melanin dokáže vydávat záblesk světla (elektroluminiscenci) a vykazuje negativní vnitřní odpor. Rostoucí zájem o vodivé polymery se projevil až na konci sedmdesátých let, s příchodem polyacetylenů. Je to organický polymer s vysokou elektrickou vodivostí, který nastartoval používání organických sloučenin v mikroelektronice.

1.2 Základní vlastnosti

Organické materiály se dají rozdělit na dvě skupiny: polymery (vodivé; konjugované) a materiály o nízké molekulární hmotnosti. Molekulární hmotnost a její distribuce má zásadní vliv, neboť tuhost polymeru je primárně dána nepohyblivostí, nebo zauzlením řetězců. Při stoupající molekulární hmotnosti se polymerové řetězce stávají delší a méně pohyblivé a výsledkem je tužší materiál. Obě skupiny jsou tvořené konjugovaným π elektronovým systémem, který je tvořen p_z orbitalem hybridizovaných sp_2 atomů uhlíků v molekule (základní stavební jednotka většiny polymerních materiálů), viz Obr. 1.1. Zde máme dvě vazby, kde páteřní vazbu tvoří σ -bond a vedlejší π -bond. K nejnižším elektrickým excitacím dochází právě na spojení π -vazeb. Díky tomu můžeme absorbovat, nebo emitovat světlo ve viditelném rozsahu spektra [2].



Obr. 1.1: Dvě vazby sp_2 hybridizovaných uhlíkových atomů (převzato z [1]).

1.3 Výroba

Zpracování se dá rozdělit podle toho, jestli chceme zpracovávat polovodivé polymery, nebo malé molekuly organických polovodičů. Tenké vrstvy konjugovaných polymerů mohou být připraveny určitými zpracovatelskými metodami. Naproti tomu jsou malé molekuly obvykle nerozpustitelné a vyžadují depozici pomocí vakuového napařování. Oba přístupy poskytnou polykrystalický, nebo amorfni film, s různým počtem poruch [3].

1.3.1 Povlakové technologie (mokrě)

vyžadují polymery, vhodné pro rozpuštění v těkavém rozpouštědle, filtrování a následnou depozici na substrát. Mezi metody nejčastěji využívané k depozici na pevnou podložku patří metoda rotačního lití (spin-coating), metoda „doctor blading“, inkoustový tisk a sítotisk. Z ekonomického hlediska jsou některé, zde zmíněné metody nevýhodné např. u rotačního lití se projevují velké ztráty, proto se spíše využívá Doctor-blade technika (minimální ztráty). Doctor-blade je speciálně vyvinutá pro velkoplošné produkce tenkých filmů [3].

1.3.2 Vakuová tepelná depozice

Vakuová tepelná depozice malých molekul vyžaduje odpařování molekul z horkého zdroje. Molekuly jsou pak přepravovány vakuem na substrát. Kondenzace těchto molekul na povrchu substrátu vytváří tenkou vrstvu. Mokrě techniky mohou být také aplikovány na malé molekuly, ale pouze v ojedinělých případech [3].

2 ORGANICKÉ FOTOVOLTAICKÉ ČLÁNKY (OPVC)

Organické fotovoltaické články (OPVC-organic photovoltaic cells) jsou to články využívající organickou strukturu pro absorpci a přeměnu světelného záření na elektrickou energii. V současné době se nejčastěji setkáme se solárními články na bázi anorganických materiálů, např. křemíku. Z hlediska účinnosti tyto materiály dosahují nejlepších možných hodnot, ale z důvodu obtížné sériové výroby těchto článků je realizace možná jen za pomoci dotací. Požadavek nízkých cenových nákladů splňují organické polovodiče. Flexibilita organických molekul a nízké náklady na výrobu dělají tyto materiály potenciálně lukrativními. Spojují chování typické pro anorganické polovodiče s vlastnostmi polymeru. Optický koeficient absorpce organických molekul dosahuje velkých hodnot, naproti tomu konverzní účinnost zůstává malá. Je to způsobené nedostatečnou generací nosičů náboje, jejich transportem a kvantovou účinností.

2.1 Princip funkce

Princip spočívá ve využívání fotoelektrického jevu, kdy při působení světelného záření na polovodičový materiál dochází ke vzniku elektrického napětí. Toto zařízení, tvořené fotony, je zdrojem elektrické energie v závislosti na jeho vlnové délce. Příklad uvedu na dvouvrstvé struktuře, která tvoří PN přechod. První vrstva je zhotovena z měděného thalocyaninu, užitého, jako elektronový donor (typu N) a perylén-tetracarboxylového derivátu jako elektronový akceptor (typu P). Ve vrstvě N je přebytek elektronů a ve vrstvě P je nedostatek děr. Vznikne potenciální bariéra, která brání elektronům samovolně přejít z vrstvy N do vrstvy P. Při dopadu světelného záření na PN přechod se začnou uvolňovat elektrony vlivem předávání světelné energie atomům v krystalické mřížce. Tyto elektrony se začnou hromadit ve vrstvě N a díry ve vrstvě P vlivem potenciální bariéry, která brání průchodu volných elektronů. Až se tyto vrstvy zaplní, začnou volné elektrony přecházet z vrstvy P do vrstvy N. Velikost takto generovaného proudu je závislá na míře ozáření PN přechodu článku [7].

Fotovoltaický jev

Fotovoltaický jev objevil Alexandr Edmond Becquerel v roce 1839. Je to fyzikální jev, při kterém jsou z látky emitovány elektrony vlivem absorpce elektromagnetického záření. Tento jev podle působení rozdělujeme na:

- Vnější fotoelektrický jev – působením vnějšího elektromagnetického záření se elektrony uvolňují do okolí látky.
- Vnitřní fotoelektrický jev – uvolněné elektrony zůstávají uvnitř látky v podobě vodivých elektronů.
- Inverzní fotovoltaický jev – dopadající elektrony způsobují vyzařování fotonů.

Princip spočívá v ozařování materiálu. Ozařování probíhá spektrem elektromagnetického vlnění, u kterého se ukázalo, že k pohlcení dochází hlavně u krátkých vlnových délek. Delší vlnové délky, obsažené ve spektru, jsou přeměněny na teplo. U krátkých vlnových délek dochází k emisím elektronů v závislosti na intenzitě vlnění. Zvyšováním intenzity dopadajícího záření dosahujeme většího počtu uvolněných elektronů, avšak pokud frekvence dopadajícího záření klesne pod mezní (prahový) kmitočet, fotoemise nenastane. U delších vlnových délek jev nenastává ani při změně intenzity vlnění [9].

2.2 Struktury polymerních solárních článků

Můžeme rozdělit na 4 základní struktury:

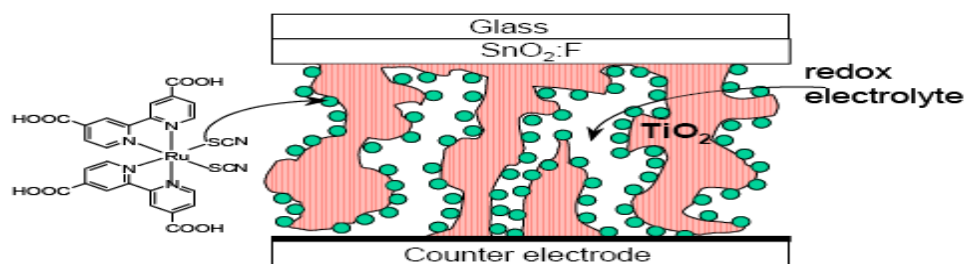
- Solární články založené na bázi organických barviv
- Dvouvrstvé solární články
- Objemové heteropřechodové články
- Tandemová struktura polymerového článku

2.2.1 Solární články na bázi organických barviv

DSSC- dye-sensitized solar cell se řadí se do skupiny tenkovrstvých solárních článků. Jsou založeny na bázi organických barviv. Toto barvivo je nanesené na povrch anorganického polovodiče. Styčná plocha je tvořena organickým donorovým a anorganickým akceptorovým polovodičem. Jako organické barvivo je použito ruthenium. Ruthenium se využívá jako monomolekulární světlo-absorbující materiál. Zde slouží k absorpci a následné injekci elektronů do vodivé vrstvy, viz Obr. 2.1. Vodivá vrstva je tvořena použitím nanoporézního oxidu titaničitého (TiO_2), jehož póry jsou vyplněny redukčním elektrolytem (regenerace barvivových molekul) [8].

2.2.2 Dvouvrstvé solární články

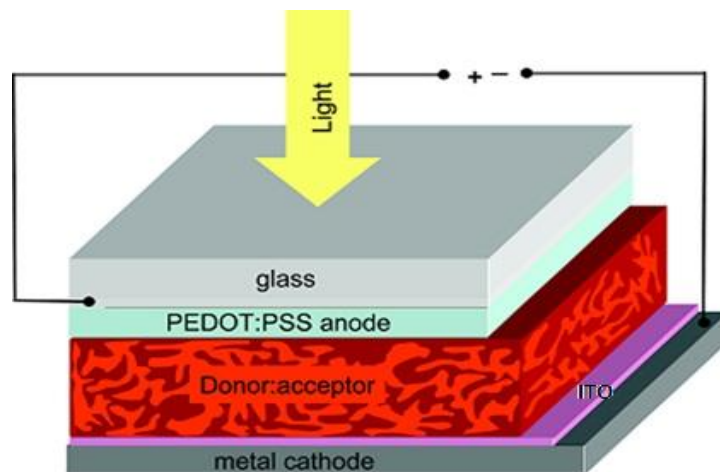
První návrhy těchto článků spočívaly ve složení jednoho uzavřeného celku organického materiálu mezi dvěma elektrodami. Takto vytvořené struktury vykazovaly nestálost a malou účinnost. Fotovoltaické vlastnosti závisely na vlastnostech elektrod. Průlom byl v objevu dvouvrstvé struktury, složené z polovodičů typu n a p. První vrstva je zhotovena z měděného thalocyaninu, užitého jako elektronový donor (typu N) a perylén-tetracarboxylového derivátu jako elektronový akceptor (typu P). Fotovoltaický materiál je umístěn mezi dvěma elektrodami. Pro sběr kladných nábojů slouží elektroda tvořená směsí oxidu india a cínu (ITO) a pro sběr záporného náboje můžeme použít stříbrnou elektrodu (Ag). Nevýhodou této struktury je omezená difuzní dráha 5-10nm, kterou je schopen urazit nosič náboje. Vlivem takto omezené dráhy můžeme dosahovat účinného fotovoltaického jevu pouze ve velmi tenkých vrstvách [8].



Obr. 2.1: Struktura (DSSC). Po přijetí světla barvivem je elektron injektován do vodivé vrstvy (TiO_2). Barvivo je pak redukováno redukčním elektrolytem a kladný náboj je přepraven z barviva přes elektrolyt ke kovové sběrné elektrodě (Counter electrode). Elektron v TiO_2 je transportován k $\text{SnO}_2\text{:F}$ elektrodě (převzato z [10]).

2.2.3 Objemové heteropřechodové články

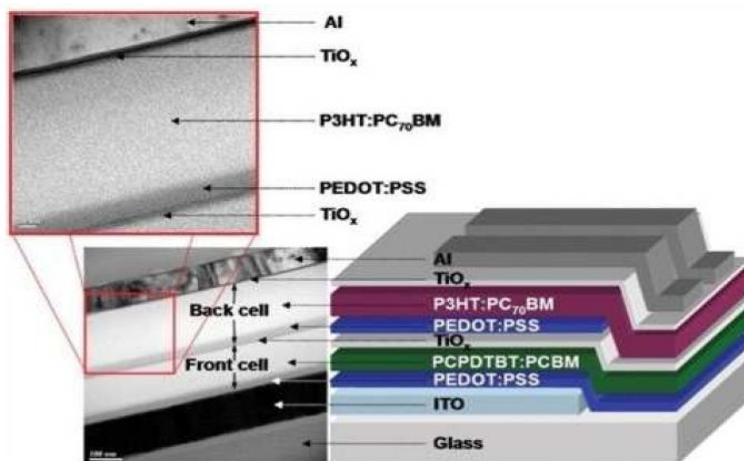
První články byly tvořeny kombinací donorových a akceptorových materiálů ve vodivé vrstvě. Vytvořená exciton buď difunduje do rozhraní materiálu, nebo se nábojově rozdělí. Tyto struktury mají vysoký koeficient absorpce, ale nejsou dostatečně opticky husté, což dovoluje většině fotonů projít bez předání energie. Řešení vzniklo po smíchání materiálu elektron-donor a elektron-akceptor tzv. heteropřechod. Heteropřechod je rozhraní v polovodičích s různými šířkami zakázaného pásma, podmínkou je plynulá návaznost jednotlivých materiálů na úrovni krystalové mřížky. Objemový princip využívají hlavně fullerenové polymerní solární články. Fulleren a jeho deriváty jsou dobrými akceptory a jejich volné elektrony mají značnou pohyblivost.[8]



Obr. 2.2: Typická struktura organického heteropřechodového článku, který tvoří: skleněný materiál; transparentní anoda – (PEDOT:PSS) jejíž složení je: poly(3,4ethylenedioxythiophene) poly(styrenesulfonate); selektivní vrstva (polopropustná vrstva); vrstva (ITO) india-cínu-oxidu “transparentní”; kovová katoda (převzato z [12]).

2.2.4 Tandemová struktura polymerového článku

Nevýhodou výše uvedených solárních článků je malá spektrální citlivost. Zatím nebyl syntetizován takový polymer, který by byl schopný převádět široké spektrum záření, včetně UV a IR záření. Částečně řešení dosáhneme tzv. tandemovým uspořádáním článku, viz Obr. 2.3. Toto uspořádání tvoří dva články umístěné nad sebou, oddělené vrstvou TiO_2 . Princip spočívá v tom, že každý článek je citlivý na jinou část spektra slunečního záření. Většinou článek v horní vrstvě má větší šířku zakázaného pásma, než článek pod ním. Tak absorbuje fotony kratších vlnových délek, zatímco fotony delších vlnových délek projdou a jsou absorbovány ve spodní vrstvě. Články vyrobené v tomto rozložení mají nízkou účinnost. Negativní vliv na to má tloušťka prvního článku. Způsobuje útlum infračerveného záření, které se má zachytávat až vrstvou spodní [8].



Obr. 2.3: Průřez tandemovou strukturou, kde aktivní materiály (polymery) tvoří sloučeniny P3HT (poly3-hexylthiophene) [polovodič typu p] a PCPDTBT (poly[(4,4-bis(2-ethylhexyl)-cyclopenta-[2,1-b;3,4-b2]dithiophene)-2,6-diyl-alt-2,1,3-benzothiadiazole-4,7-diyl]) [polovodič typu n]. P3HT pokrývá velkou část viditelného spektra, PCPDTBT absorbuje větší část infračervené a ultrafialové oblasti blízké, viditelnému spektru (převzato z [11]).

2.3 Vývoj organických solárních článků

Jedny z prvních organických článků byly skládány z malých molekul (donory a akceptory). První heterostrukturální dvojvrstva byla tvořena tenkou vrstvou Cu-ftalocyaninu a derivátu perylenu mezi elektrodou ITO (oxid india a cínu) a stříbrnou elektrodou. Konverzní účinnost se přibližovala 1%. Následný vývoj struktury organických solárních článků se zakládal na existenci pohyblivých fotoindukovaných nosičů náboje v polymerech. Sloučení konjugovaného systému (polymeru) s molekulou akceptoru způsobí větší pohyblivost nosičů náboje, fotoexcitaci elektronu a větší konverzní účinnost, než v samotném konjugovaném systému. Mezi první používané články patřily dvouvrstvé struktury. Jednou z nich byl poly-fenylenvinylen – PPV, který

je donorového typu (+ jeho deriváty) a akceptor tvořily většinou molekuly fullerenu, které mohou absorbovat až šest elektronů. Přidáním fullerenu k polymeru se výrazně mění (klesá) luminiscence a absorpce přejde ke kratším vlnovým délkám světelného záření, konverzní účinnost se bude pohybovat kolem 4% [7].

2.4 Organické materiály používané v současnosti

Fulleren (C_{60}) a jeho deriváty jsou dobrými akceptory a jejich volné elektrony mají značnou pohyblivost. Pigment perylen je akceptor s větší absorpcí v blízké infračervené oblasti. Ftalocyaniny, porfyriny a příbuzné molekuly jsou dobrými donory s dobrou elektronovou pohyblivostí. Všechny tyto molekuly mohou být dopovány jinými látkami a tím zvýšena rychlost transportu nosičů náboje. Například přídavek polymeru MEH-PPV v molekule výrazně zvyšuje pohyblivost elektronů [7].

3 POLEM ŘÍZENÉ TRANZISTORY (OFET)

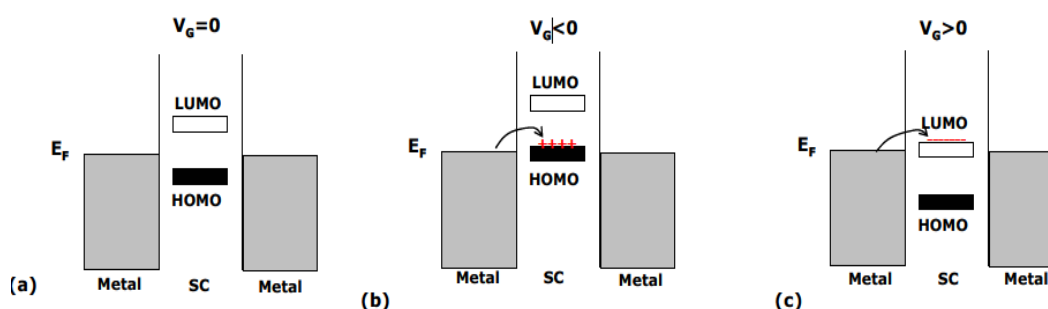
Princip polem řízených tranzistoru (FET) byl objeven už v roce 1930 na potřebu aktivního prvku s vysokým vstupním odporem. Funkce je obdobná jako u elektronky, kde řídicí složkou je napětí. Tato vlastnost nám umožňuje integrovat větší množství takovýchto tranzistorů do čipu, neboť se zde neuplatňuje Jouleovo teplo. O 30 let později vědci vymysleli tranzistor, kde vodivost kanálu mezi elektrodami byla ovládaná elektrickým polem, vytvářeným ve struktuře kov-oxid-polovodič (MOSFET). Pravděpodobně nejvýznamnější složka moderní mikroelektroniky a to jak v diskretních tak v integrovaných obvodech. Pro MOSFET se používá několik označení IGFET (Insulated gate FET) a MISFET (Metal-Insulator-Semiconductor FET), ty jsou převážně vyrobeny s krystalů křemíku. Nicméně, rostoucí náklady na materiál a výrobu, jakož i veřejný zájem o ekologičtější elektronická zařízení daly impuls k využívání nových struktur. Ty byly založeny na organických materiálech.

Jako první OFET byly vyrobeny tranzistory založené na elektrochemicky polymerovaných polythiophenech. Polythiopheny (PT) patří do skupiny vodivých

(konjugovaných) polymerů (CP). Polythiophen vzniká polymerizací thiophenu. Tento materiál se stává vodivý přidáním, nebo odebráním elektronu z konjugovaných π -orbitalů prostřednictvím příměsi (dopingu). Výhodou těchto tranzistorů je možnost technologické výroby při nízkých teplotách (60-120°C). Vlivem toho klesají výrobní náklady a zvyšuje se možnost využití těchto tranzistorů. V porovnání s křemíkovým tranzistorem je nevýhodou nižší mobilita nosičů náboje a malá rychlost přepínání [17].

3.1 Princip

spočívá v tom, jaká polarita napětí je přivedena na hradlo gate, viz Obr. 3.1. Ta určuje, jestli elektrony budou migrovat z source do drain, nebo díry z drain do source (opačně). Source a drain je označení elektrod. Pokud napětí na gate je nulové, nedojde k žádnému přenosu nosičů náboje. Přivedení jak kladného tak záporného napětí na elektrodu gate je jediný způsob pro vedení elektrického proudu přechodem PN. Izolovaná vrstva zabrání průchodu i malého elektrického proudu (a). Při přivedení záporného napětí na gate, pozitivní náboj je indukován na rozhraní polovodiče (vodivého kanálu) a izolačního materiálu. Když je Fermiho hladina source/drain blízko HOMO energetické hladiny, díry mohou být injektovány dovnitř kovového hradla, nebo z něj odebrány; stejně to platí i u HOMO energetické hladiny polovodiče. Tak vznikne polovodič typu P (b). Při přivedení kladného náboje na gate je záporně orientovaný náboj (elektron) indukován na rozhraní vodivého kanálu a izolačního materiálu s Fermiho hladinou blízko LUMO hladiny organického materiálu, elektron může být injektován z source/drain do LUMO polovodiče. Tím vytvoříme polovodič typu-n(c) [13].



Obr. 3.1: Princip funkce OFET: a) napětí na gate je nulové; b) napětí na gate je záporné c) napětí na gate je kladné. HOMO- nejvyšší obsazený molekulový orbital; LUMO- nejnižší neobsazený molekulový orbital (převzato z [15]).

3.2 Struktury polem řízených tranzistorů

Návrhy OFET využívají třech struktur:

- MESFET- Tranzistor se Schottkyho přechodem.
- MISFET- Řídicí elektroda tranzistoru je izolována.
- TFT- Struktura tenkých filmů, kde source a drain jsou přímo uloženy na vodivém kanálu, který je oddělen izolační vrstvou od řídicí elektrody gate.

3.2.1 MESFET - kov/polovodič

Metal semiconductor field-effect transistor - tento tranzistor se skládá z vodivého kanálu umístěného mezi kontakty source a drain, viz Obr. 3.2 b). Tok nosičů náboje od source k drain je ovládán hradlem, vyrobeným napařením vrstvičky hliníku (Schottkyho kontakt), jež se polarizuje napětím U_{GE} ve zpětném směru (záporným oproti emitoru). Hlavní výhodou těchto tranzistorů je vysoká pohyblivost nosičů náboje ve vodivém kanálu, což vede k většímu elektrickému proudu, strmosti a tranzitnímu kmitočtu. Díky rychlému ovládní vyprázdněné oblasti Schottkyho kontaktem, umožňují tyto tranzistory zpracovávat signály s vysokou frekvencí. Využití nacházejí v mikrovlnných zesilovačích, vojenských radarových zařízeních, aj.. Operační kmitočet se pohybuje kolem 45GHz. Nevýhodou MESFET, v pojetí širšího využití těchto tranzistorů, je právě struktura s Schottkyho kontaktem. Ta omezuje předpětí na gate v sepnutém stavu na napětí Schottkyho diody (0,7V pro typ GaAs). Prahové napětí musí proto být nižší, než toto spínací napětí (GaAs - 0,7V). Technologicky náročná výroba omezuje využití MESFET v integrovaných obvodech [16].

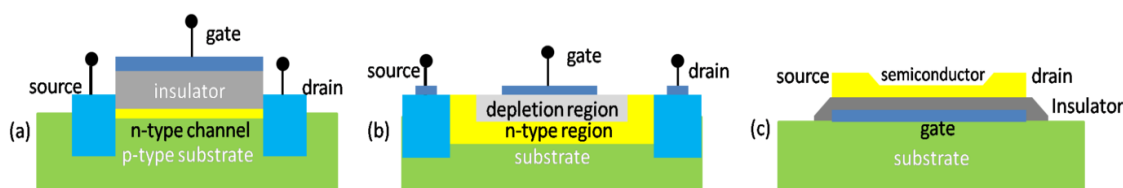
3.2.2 MISFET – kov/izolant/polovodič

Nejvyužívanější polem řízené tranzistory jsou MOSFETy. Do této kategorie se řadí více druhů, mezi které patří například IGFET (insulated gate field-effect transistors), nebo také MISFET (metal insulator semiconductor field-effect transistor). U MISFETu jsou do povrchu slabě dotované základní destičky z křemíku, jež má vodivost P. Difúzí vhodné příměsi jsou vytvořeny dva rovnoběžné příkopy s velkou koncentrací příměsí (N+), tvořící hradla source a drain. Mezi nimi je o něco tenčí vrstva (méně dotovaná)

typu N. Celý povrch destičky je okysličen. Touto vrstvou prochází vývody source a drain. Na vrstvu kysličníku, nad místem ve kterém je vytvořen kanál, je napařena vrstva hliníku, která tvoří řídicí elektrodu (hradlo G). Kysličník křemičitý (SiO_2), je velmi dobrý izolant, takže hradlo je dostatečně separováno od kanálu, viz Obr. 3.2 a) [16].

3.2.3 TFT- Struktura tenkých filmů

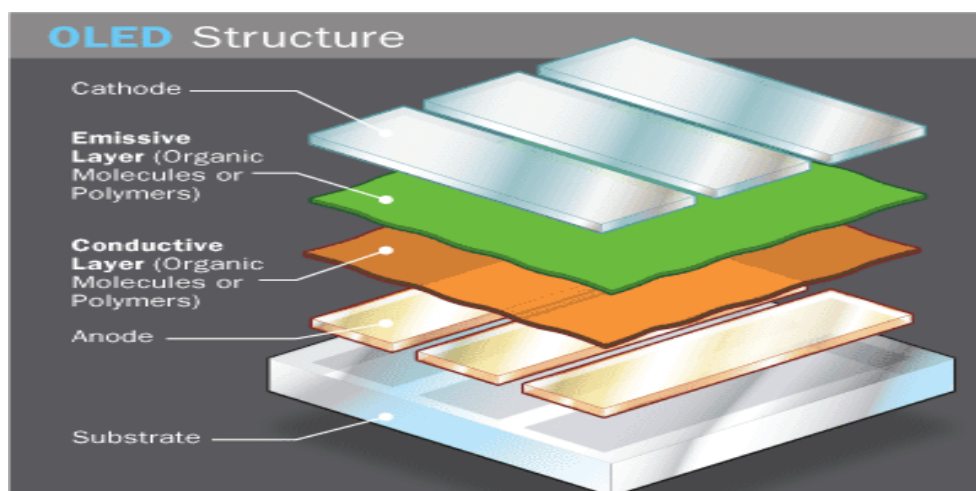
Thin-Film Transistor (TFT) jsou součástky s podobnou strukturou jako tranzistory MIS. Source a drain jsou umístěny přímo na vodivém kanálu (tenká vrstva polovodiče). Tento vodivý kanál je pokrytý vrstvou dielektrika, nad kterou je umístěna elektroda gate, viz Obr. 3.2 c). Všechny vrstvy se vyrábějí vakuovým napařováním. Lze vyrábět typy jak s ochuzováním, tak s obohacováním kanálu. Substrát je tvořen plastovým podkladem PET (polyethylentereftalát). Hradlovou vrstvu tvoří kov (Au nebo Al). Izolant bývá z SiO_2 , případně Al_2O_3 . Jako polovodič se používá polymer P (NDI2OD-T2). Zájem o využívání TFT struktur u OFET tranzistorů vzrostl se zvyšující pohyblivostí nosičů náboje. Organické TFT mají hybnost okolo $5(\text{cm}^2/\text{V.s})$. Jednou z technologických zajímavostí organických tranzistorů je to, že všechny jeho vrstvy mohou být vytvořeny za pokojové teploty. Jde v podstatě o nízkonákladové technologické metody založené na zpracování materiálu z roztoků, nebo speciálních tiskařských metod, což je dělá cenově dosažitelnými. Využití těchto struktur je třeba u aktivních matic organických LED displejů [17].



Obr. 3.2: Struktury OFET tranzistorů: a) MISFET (kov/izolant/polovodič); b) MESFET (kov/polovodič); c) TFT: struktura tenkého filmu tranzistoru (převzato z [17]).

4 ORGANICKÁ SVÍTÍCÍ DIODA (OLED)

Je to teprve 8 let, co OLED (Organic Light Emitting Diode) diody opustily výzkumné laboratoře. Podnět k rozvoji dali vědci z firmy Kodak, kterým se povedlo rozsvítit první účinné organické diody. OLED mohou mít různou strukturu: jednovrstvou, nebo dvouvrstvou až třívrtvou, kde poslední vrstva pomáhá dopravit elektrony z katody do emisní vrstvy. Další vrstvy nám pak umožňují optimalizaci dalších parametrů diody. Jednovrstvou strukturu tvoří dvě elektrody, kde anoda je transparentní. Nejčastějším používaným materiálem anody je oxid india a cínu, který sestává z 90% In_2O_3 a 10% SnO_2 . Mezi těmito elektrodami se nachází emisní elektroluminiscenční vrstva, tvořená organickými sloučeninami, která při průchodu elektrického proudu emituje světlo. Tyto vrstvy jsou vyrobeny z organických molekul nebo polymerů. Katoda, která bývá většinou kovová, zajišťuje protipól a při přivedení elektrického napětí emituje elektrony. Struktura OLED je zobrazena na Obr. 4.1. Zastoupení těchto diod můžeme najít u přehrávačů MP3, televizních a počítačových monitorů, PDA. Velkou výhodou těchto displejů je, že fungují bez podsvícení, takže při zobrazení černé barvy vidíme opravdu černou. Dalšími přednostmi je dobrý kontrast a široký pozorovací zorný úhel, jenž dosahuje téměř 180° .



Obr. 4.1: Struktura organické luminiscenční diody, jejíž složení je: substrát (čiré plasty, sklo, fólie); anoda (transparentní); dále je vodivá a emisní vrstva, na které je katoda (v závislosti na typu OLED může být i transparentní). (převzato z [4]).

4.1 Druhy

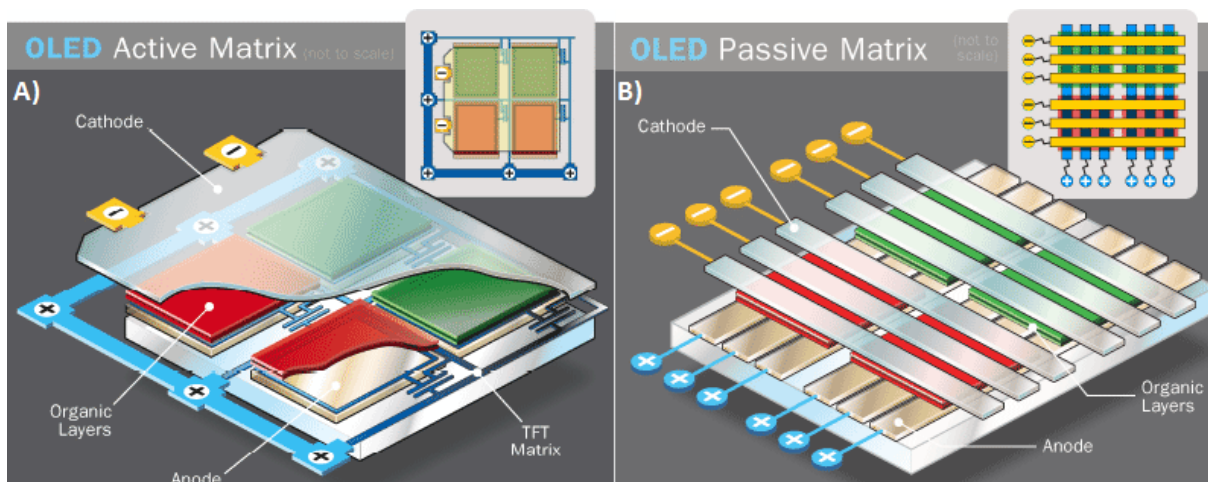
Nejčastěji se setkáme s OLED u displejů. Ty se dělí na displeje s pasivní maticí (PMOLED) a displeje s aktivní maticí (AMOLED). Další varianty jsou transparentní diody (TOLED), fosforeskující diody (PHOLED), flexibilní diody (FOLED) a bílé diody (WOLED), polymerní diody (POLED) [4].

4.1.1 PMOLED — Pasivní matice organických LED

Tato technologie se využívá u displejů menších úhlopříček, nebo u zobrazování statických a textových informací. Struktura těchto matic je z naplátovaných elektrod, mezi kterými se nachází organická vrstva. Tyto tři vrstvy leží na sobě tak rozložené, aby proužky anody, nebo katody, byly na sebe kolmé, viz Obr. 4.2. Každé takové překřížení tvoří jeden pixel, který je schopen vyzařovat světlo. Na tuto strukturu je připojen vnější obvod, k lepšímu zajištění ovládní jednotlivých bodů. Ovládání probíhá díky mřížce vodičů a multiplexních přepínačů. Obvod pošle signály do sloupců a synchronizuje je s cyklickým zapojováním řádků, probíhajícím 60krát za vteřinu. Výsledný obraz tedy vznikne skládáním těchto řádků. Čím větší proud použijeme, tím jasněji nám bude ten daný bod zářit. Pro plné zobrazení musíme nabíjet každý řádkový vodič po dobu $1/N$ snímkovacího času, kde N je počet řádků. Tato metoda není moc efektivní. Důvodem jsou velké ztráty, způsobené úbytky napětí na vodičích [4] [5].

4.1.2 AMOLED — Aktivní matice organických LED

Tato matice je tvořena vrstvou katody, organické molekuly a anodou. Anodovou vrstvu překrývá tenký film, tvořený polem tranzistorů (TFT), viz Obr. 4.2 a). Spínání každého pixelu je prováděné přímo. Přičiňují se o to dva tranzistory, z nichž jeden řídí nabíjení a vybíjení a druhý funguje jako napěťový stabilizátor. Stabilizace elektrického proudu zajistí světelnou stálost bodu, jinými slovy: zamezí blikání, způsobené několika po sobě jdoucími cykly. Současně zvyšuje průtok proudu a zkracuje dobu odezvy. Výhodou je vyšší zobrazovací frekvence, kdy dosahujeme třikrát větší rychlosti zapnutí a vypnutí jednoho pixelu, což je větší rychlost, než jaké dosahuje pohyb konvenčního snímku ve filmu. Přínosem je též nízká hodnota spotřebované energie. Nevýhodou je složitější struktura displeje promítnutá ve výsledné ceně displeje [4] [5].



Obr. 4.2:

- a) Aktivní matice: katoda, organická vrstva, TFT film, anoda.
- b) Pasivní matice: katoda, organická, vrstva anoda (převzato z [4]).

4.1.3 TOLED – transparentní organická LED

Transparent OLED – jsou tvořeny pouze z průhledných složek. Anoda, katoda substrát, to vše je tvořeno tenkými průhlednými materiály, abychom mohli světlo vyzařovat v obou směrech. Řízení svítivých pixelů zajišťuje transparentní TFT (thin film transistors) s tloušťkou kolem 100nm. Tato vrstva ve složení zinek-cín-oxid umožňuje zobrazení více než 90% viditelného spektra se zářením $0 - 700 \text{ cd/m}^2$. Navíc jsou tyto vrstvy velmi tenké a lze je vytvářet při teplotách pod 200°C , což umožňuje použití i levných materiálů na substrát, pokud bude splněna podmínka, že při vypnutém stavu dosahuje 85% transparentnosti [5].

4.1.4 PHOLED – Fosforeskující OLED dioda

Phosphorescent Organic Light-Emitting Diode. Vyzařují světlo díky elektroluminiscenci z organických polovodičů při průchodu elektrického proudu. Elektrony a díry jsou vstřikovány do organické vrstvy a na elektrodách se tvoří excitony v podobě elektronů a děr, což jsou fermiony s $\frac{1}{2}$ spinem. Exciton je vytvořen rekombinací dvou částic: elektronu a díry. Jejich kombinace může nabývat dvou stavů: singlet state a triplet state. Singlet state je tvořen dvojicí elektron-elektron. Triplet state je ve složení dvojic elektron-díra, díra-elektron, díra-díra. Pravděpodobnost výskytu singlet state je 25% a pravděpodobnost výskytu triplet state je 75%. Rozložením excitonu dosáhneme vyzáření světla díky spontánní emisi.

Klasická OLED technologie využívá pouze singlet state a kvantová účinnost je maximálně 25%. PHOLED využívá obou stavů, jak singlet state tak i triplet state, proto se teoretická kvantová účinnost blíží 100%. [4]

Singlet state a Triplet state:

V kvantové mechanice se vyskytuje pojem singlet state. Singlet state se zabývá fyzickou vlastností atomu. Je to jeden ze dvou způsobů, jak lze kombinovat spin dvou elektronů. Obsahuje spiny s poloviční hodnotou, tzv. fermiony. Princip je vysvětlen na chemické vazbě dvou elektronů. Představme si směr točení v zastoupení vektory S_1 a S_2 , jež mohou nabývat hodnot $\pm\hbar/2$, kde $\hbar$ je redukovaná Planckova konstanta. Celková rotace je vyjádřena rovnicí (3.2). Když jsou tyto vektory anti-paralelní $S_1 = -S_2$, tak celková rotace $S = 0$. Pokud jsou znaménka vektorů shodná, tak může celková rotace nabývat hodnot $+1$ a -1 , které jsou využívány v triplet state. Triplet state je druhý způsob kombinací směru otáčení elektronů a děr, které nabývá hodnot $(-1, 0, 1)$ a je vyjádřen celočíselnými spiny, tzv. bosony. Na tomto principu vzniká fosforescence, zatímco u singlet state fluorescence [6].

$$S = S_1 + S_2 \quad (3.2)$$

S- celková rotace

$S_{1,2}$ - vektor

4.1.5 FOLED – Flexibilní OLED dioda

Někdy také označovaná jako „skládaná“ (foldable) dioda, je vyrobena s velmi pružných materiálů. Zatím se tyto diody realizují na plastovém opticky průhledném materiálu, ale ve výzkumu už jsou kovové folie, které by mohly zvýšit odolnost těchto struktur. Tyto LED budou mít obrovskou možnost využití, od umístění v automobilových přístrojových panelech, až po vsívání do tkanin (chytré oblečení) [5].

4.1.6 WOLED- Bílá OLED dioda

Využívají se v aktivních i v pasivních maticích. Bílé světlo je tvořeno RGB proužky, s možností měnit jeho intenzitu u každého proužku zvlášť. Přitom bílé barvy dosahujeme mícháním dvou nebo tří barev, s rozdílem, že metody míchání se liší ve výsledné účinnosti záření. Mix tří barev červená-modrá-zelená, dosahuje světelného toku 0.41 lm/W. Při míchání dvou barev používáme zelenou a purpurovou (je tvořena systémem CMYK smícháním červené+modré), čímž dosáhneme světelného toku 0,35 lm/W. Životnost těchto diod je kolem 20 000 hodin [5].

4.1.7 PLED- polymerní OLED dioda

Materiály jako konjugované polymery jsou využívány už delší dobu. Vykazují dobré fotoluminiscenční vlastnosti. Využívají se proto fotoelektronice, telekomunikaci a zobrazovací technice. Avšak využití konjugovaných materiálů bylo omezené, kvůli velkému řídicímu napětí s malým přenosem náboje v jednom krystalu. S příchodem tenkovrstvých technologií nanášení se problém s vysokým řídicím napětím omezil. Efektivita těchto struktur, ale nedosahuje pořád uspokojivých hodnot. Tang a Van Slyke se povedlo sestrojit nízkonapětové (10V) světlo emitující organické LED zařízení z tenkého filmu Alq_3 .

Alq_3 – Tris(8hydroxyquinolinato)aluminium je to chemická sloučenina s $\text{Al}(\text{C}_9\text{H}_6\text{NO})_3$. Je to komplexní sloučenina, jež obsahuje alespoň jednu kovalentní vazbu, kde hliník je vázaný dvojítm způsobem do konjugované základny

4.2 Výroba

Výrobu těchto vrstev můžeme provést třemi způsoby

- Vakuové tepelné vypařování, nebo napařování (VTE).
- Nanášení organik v plynné fázi (OVPD).
- Inkoustový tisk.

Vakuové tepelné vypařování : (Vacuum thermal evaporation) Ve vakuové komoře jsou organické molekuly, které začneme pozvolna zahřívat. Ty se začnou odpařovat a vytvoří tenký film na studeném substrátu. Avšak tento proces je neefektivní a drahý.

Nanášení organik v plynné fázi : (Organic vapor phase deposition) V nízkotlakové komoře s vyhřívanými stěnami přepravuje nosný plyn vypařené organické molekuly na chlazený substrát. Zde kondenzují do tenké vrstvy. Díky nosnému plynu zvyšujeme efektivitu a snižujeme výrobní náklady OLED.

Inkoustový tisk : (Inject printing) Organické materiály jsou stříkány na podklady stejně, jako barvy na papír během tisku. Inkoustové technologie výrazně snižují náklady na výrobu a umožňují tisknout OLED na velké filmy, nebo elektronické billboardy [4]. tris(8hydroxychinoligandu)

4.3 Struktura

Základní struktura OLED je zobrazena na Obr. 4.1, dvě elektrody uložené na substrátu, z nichž jedna musí být transparentní, aby mohlo dojít k emitování světla, polymerní materiály pro přenos děr-elektronu a emitující vrstva. Materiály, které využíváme pro sestavení OLED se dají rozdělit do několika funkčních skupin:

- Materiály na vstřikování děr (hole transport emitters)
- Materiály na transport děr (hole transport materials)
- Materiály na blokování děr (hole blocking material)
- Materiály na transport elektronu (electron transport emitters)

Struktura OLED je tvořena:

Substrát+ITO:

Substrát je důležité vhodně opravit, aby se dosáhlo požadované výstupní práce. Ošetření substrátu se provádí v atmosférické plasmě ošetření nízkotlakovou plazmou atd. potom je na tento substrát opatřen směsí oxidu india a cínu (ITO).

ITO (Indium tin oxide) je pevný roztok india kysličníku a kysličník cínu, typicky složení je 90 % In_2O_3 , 10 % SnO_2 . Základními charakteristickými parametry je kombinace elektrické vodivosti a optické průhlednosti. Transparentní vlastnosti tento materiál má pouze u tenkých vrstev, ve větších vrstvách je nažloutlý až šedý. V infračervené části spektra se chová jako neprostupný kov (zrcadlo)

Vrstva na vstřikování děr:

Tato vrstva mezi ITO, katodou a vrstvou pro přenos elektronů, snižuje mezi nimi vstřikovací bariéru a značně vede ke zvýšení stability zařízení. Různé další vrstvy pro vstřikování děr slouží pro zvýšení životnosti nebo snížení pracovního napětí.

Vrstva pro přenos děr:

Jsou to tenké vrstvy, které neobsahují žádné díry. Většinou jsou naneseny na vrstvu pro vstřikování děr. Některé materiály mají tu vlastnost, že mohou snížit prahové napětí. Běžně používaným materiálem pro přenos děr je Polyethylenedioxythiophinem (PEDOT)

PEDOT neboli Poly (3,4ethylenedioxythiophene) je konjugovaný polymer založen na polythiophenu. Využívá se jako transparentní, vodivý polymer s vysokou přizpůsobivostí při různých aplikacích.

Vrstva pro přenos elektronu a světlo emitující vrstva:

Je to vrstva, kde se spojují kladné a záporné náboje. Některé materiály mají tu vlastnost, že jsou schopny emitovat světlo. Pro světlo emitující vrstvu se volí materiály o různé vlnové délce, podle světla, kterého chceme dosáhnout. Využívané materiály jsou:

- Al_{q3}
- MDMO-PPV.

Katoda:

Slouží pro přivedení napětí do dalších vrstev. Přes katodu proudí elektrony do vodivé vrstvy a následně do organického materiálu. Bývá většinou kovová. Nejběžněji využívaným materiálem je Al.

Al (hliník) velmi lehký kov, dobrý vodič elektrického proudu. Hliník s kyslíkem reaguje. Při kontaktu s kyslíkem se hliník pokryje tenkou vrstvou oxidu.

4.4 Princip

Celý provoz se dá rozdělit to tři procesů:

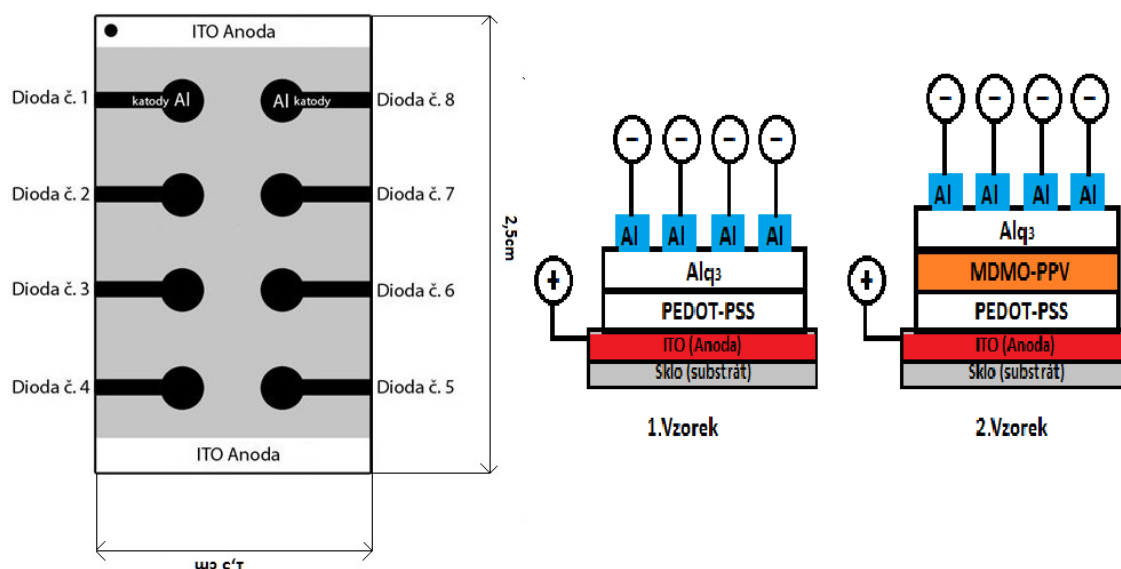
- Injekce náboje
- Přenos náboje
- rekombinace

Během provozu protéká proud strukturou od záporného potenciálu (katody) ke kladnému (anody). Začneme vstříkovat elektrony z katody do emisní vrstvy. Tím odstraníme elektrony z vodivé vrstvy, kde po sobě nechají oblast s nedostatkem záporného náboje a vznikne tedy oblast s přebytkem kladného náboje tzv. díra. Na hranici mezi emisní a vodivostní vrstvou, se elektrony snaží najít díry, které by mohly zaplnit. Následně začnou díry z vodivostní vrstvy přeskakovat do emisní vrstvy a tam začnou s elektrony difundovat. Časem dojde k rekombinaci za vzniku fotonu (světelného záblesku). Jeho vlnová délka závisí na šířce zakázaného pásma a intenzita světelného toku je přímo úměrná velikosti elektrického proudu. Čím větší je původní rozdíl energie mezi dírou a elektronem, tím víc se v barvě světla pohybujeme od červené k modré. Účinnost emitovaného světla k velikosti elektrického proudu v současnosti dosahuje něco kolem 7% [4].

5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

5.1 Vytvořené substráty

Chemickou fakultou (FCH) byly poskytnuty k měření dva vzorky o rozměrech 2,5 x 1,5 cm, viz Obr. 5.1. Vzorky byly vytvořeny na skleněném substrátu pokrytém vrstvami organických polovodičů. První vzorek byl tvořen vrstvami ITO/PEDOT/Alq₃/Al a druhý vzorek byl tvořen vrstvami ITO/PEDOT/MDMO-PPV/Alq₃/Al, kde ITO vrstva slouží jako anoda a Al vrstva jako katoda. Vzorky bylo nutné uskladnit před a po měření v inertním prostředí. Pro zajištění inertního prostředí byly vzorky uskladněny v komoře s dusíkovou atmosférou při tlaku 1200mbar, za konstantní teploty 23°C



Obr. 5.1: Průřezy 1 a 2 vzorku s orientačním pohledem shora.

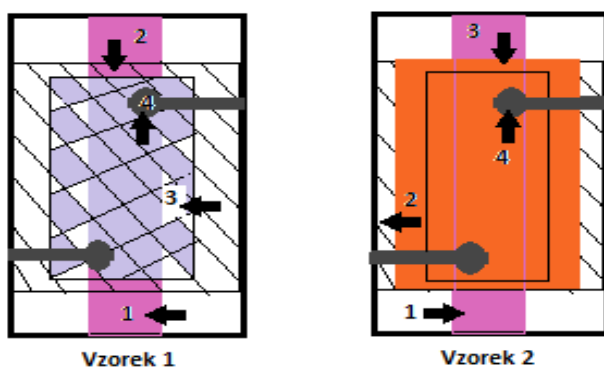
5.1.1 Měření tloušťky vrstev

Měření tloušťky dvou vzorků, dodaných Chemickou fakultou, se realizovalo v Ústavu přístrojové techniky na profilometru pro monitorování povrchové drsnosti (Talystep). Talystep je hrotový přístroj, speciálně upravený pro měření profilů. Jednotlivé vrstvy se proměřují hrotem, který se pohybuje po vzorku. Síla přítlaku je proměnná dle zesílení tloušťky resp. profilu. V profilometru byl vzorek umístěn pod hrot pomocí optiky. Na vzorcích proběhla 4 měření. Jednotlivé vrstvy byly měřeny vždy samostatně. Pořadí měření vrstev je uvedeno v Obr. 5.2 i s popisem a rozmístěním jednotlivých vrstev. První vzorek byl proměřován ITO/PEDOT/Alq₃/Al. Jednotlivé vrstvy vykazovaly velké množství nehomogenit. Druhý vzorek ITO/PEDOT/MDMO-PPV/Alq₃/Al byl proměřen stejným způsobem, jako první vzorek. Zde mělo být provedeno 5 měření, ale vrstva Alq₃ nemohla být změřena, protože byla překryta vrstvou MDMO. Nanesené vrstvy stejných materiálů se lišily až o 20nm. Při průměrné tloušťce vrstvy 100nm je tato odchylka poměrně značná a může se projevit při měření elektrických vlastností těchto vzorků. Rozpis hodnot je v Tab. 5.1.

Velké množství nerovností vrstev u obou vzorků je způsobeno především výrobním procesem. Jelikož se vrstvy vzájemně překrývaly, mohlo dojít i k nepřesnému změření profilů. Měření by měla být prováděna vždy po nanesení jednotlivých vrstev, čímž se zabrání vzájemnému překrytí (vrstev). Pořadí měření jsou zobrazena na Obr. 5.2.

Tab. 5.1: Naměřené velikosti tloušťky vrstev.

Vrstva	Vzorek 1	Vzorek 2
ITO	93[nm]	76[nm]
PEDOT-PSS	107[nm]	131[nm]
MDMO-PPV	-	147[nm]
Alg ₃	119[nm]	-
Al	317[nm]	318[nm]



Obr. 5.2: Pořadí jednotlivých měření při pohledu shora:

1. vzorek [1]ITO [2]PEDOT-PSS [3] Alg₃[4] Al
2. vzorek [1]ITO [2]PEDOT-PSS [3] MDMO-PPV[4] Al

5.2 Elektrická měření

5.2.1 Použité zařízení

Mikroskop Leica S8 APO s prstencovým osvětlením (využitým při osvětlení vzorků, viz Obr. 5.3

Parametry (převzato z [17]):

- plynulý měnič zvětšení zoom, rozsah zvětšení 8:1
- integrovaný apochromatický objektiv 1×
- standardní zvětšení 10× – 80×
- maximální rozlišení 600 lp/mm
- volitelně 1×, 1,25×, 1,6×, 2× apochromatické objektivy
- ergonomický úhel pohledu 38 stupňů
- přepínatelný foto/video tubus 100/0
- zorné pole 36,5 mm
- 75 mm pracovní vzdálenost
- okuláry 10×, 16×, 25×, 40×

Hrotové zařízení: Cascade M150 (pro přívod napájení na vzorky, viz Obr. 5.3)

Parametry (převzato z [18]):

- široký rozsah pohybů stanice
- stůl s víceúčelovou platformou
- sondovací příslušenství (4 hrotové sondy)

Vyhodnocovací zařízení Keithley 4200-SCS, viz Obr. 5.3 s vybavením (parametry dostupné z [19])

- ultra rychlý I/V modul
- pulzní generátorová jednotka (pouze napět'ový zdroj)
- dvoukanálový osciloskop
- vyhodnocovací software



Obr. 5.3: Měřicí přístroje, využívané k elektrickým měřením a ukázka připojeného nasvíceného 2. vzorku; [1] mikroskop Leica; [2] hrotové zařízení Cascade; [3] Vzorek [4] vyhodnocovací zařízení Keithley (převzato z [19]).

5.3 Výpočet dynamického odporu

$$R_d = \frac{U_2 - U_1}{I_2 - I_1} = \frac{\Delta U}{\Delta I} \quad (5.3)$$

kde R_d je odpor otevřené diody $I_{1,2}$ představuje proud odečtený v okolí pracovního bodu a $U_{1,2}$ je k němu příslušný úbytek napětí na diodě. Vzorec byl převzat ze skript [20]

5.4 Postup měření

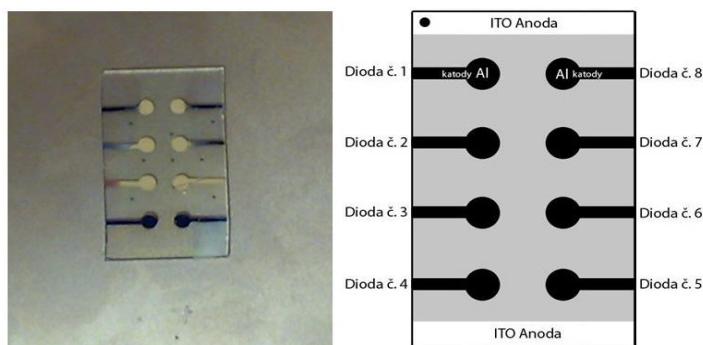
K měření byly zvoleny dva výše zmíněné vzorky. Na každém vzorku je umístěno 8 diod, viz Obr. 5.1, vystavovaných bílému osvětlení o různé intenzitě. Vzorky byly změřeny:

- 1) za tmy
- 2) při stropním plošném zářivkovém osvětlení
- 3) osvětlením bílými LED diodami v prstenci na objektivu mikroskopu

Pro měření byl vždy vzorek umístěn do hrotového zařízení a pomocí dvou sond připojen k vyhodnocovacímu zařízení Keithley. První sonda byla připojena na anodu ITO a druhá sonda na katodu Al. Každá dioda byla proměřena samostatně. Měření zpracovávalo PC zařízení Keithley, které vyhodnocovalo velikosti proudů při zvoleném napětí v rozsahu od $U = -10V \div +15V$, s krokem po 0,1V. Měřením bylo pro každou diodu získáno 251 hodnot napětí a proudu a z těchto údajů byla následně sestavena A-V charakteristika. Po každém měření bylo nutno vyčkat 10 min., nezbytných pro ustálení odezvy po předešlém osvětlení. Všechna měření se uskutečnila za konstantní teploty 23°C. Po změření byly vzorky umístěny do přetlakové dusíkové komory, kde bylo zajištěno inertní prostředí.

5.5 První vzorek

První vzorek viz Obr. 5.4 byl ve složení ITO/PEDOT/Alg₃/Al, kde aktivní vrstva je Alg₃, jež slouží pro excitaci elektronu, při níž by mělo dojít k následnému vyzáření fotonu. Všechny diody byly proměřeny v propustném i závěrném směru. Z A-V charakteristik byl posuzován vliv osvětlení na pohyb nosičů náboje. Pro každou diodu byl vypočítán dynamický odpor v oblasti pracovního bodu $U_f = 14,5V$. Dosazením do rovnice (5.3) byl vypočítán dynamický odpor. Pracovní bod pro závěrný směr byl určen pro $U_z = -8V$.

Obr. 5.4: První vzorek složený z materiálů ITO/PEDOT/Alg₃/Al

5.5.1 Výsledky měření za tmy

Bylo proměřeno 8 diod, z toho každá samostatně. Naměřené parametry jsou uvedeny v Tab. 5.2. Měření byla provedena za tmy. Prahové napětí pro diody bez osvětlení bylo v rozsahu $U_p = 14,7V$ až $13,3V$. V přímém směru otevřenou diodou protékaly proudy v rozsahu $I_f = 1,22\mu A$ až $4,54\mu A$. Hodnoty proudu byly odečteny pro napětí $U_f = 14,5V$, což je pracovní bod, určený pro měření v přímém směru všech 8 diod. Dynamický odpor byl v rozsahu $R_d = 0,10M\Omega$ až $0,62M\Omega$. Stanovené U_p a $\Delta U, \Delta I$ pro výpočet dynamického odporu je zobrazeno na Obr. 5.5. Pro závěrný směr bylo stanoveno závěrné napětí U_b , to jest napětí, při kterém výrazně narůstá proud. Proud v závěrném směru dosahoval jen malých hodnot (v řádech nA). Proudů v závěrném směru byly v rozsahu $I_b = -0,01nA$ až $-43,69nA$. Velikosti proudů v závěrném směru byly odečteny pro pracovní bod $U_z = -8V$.

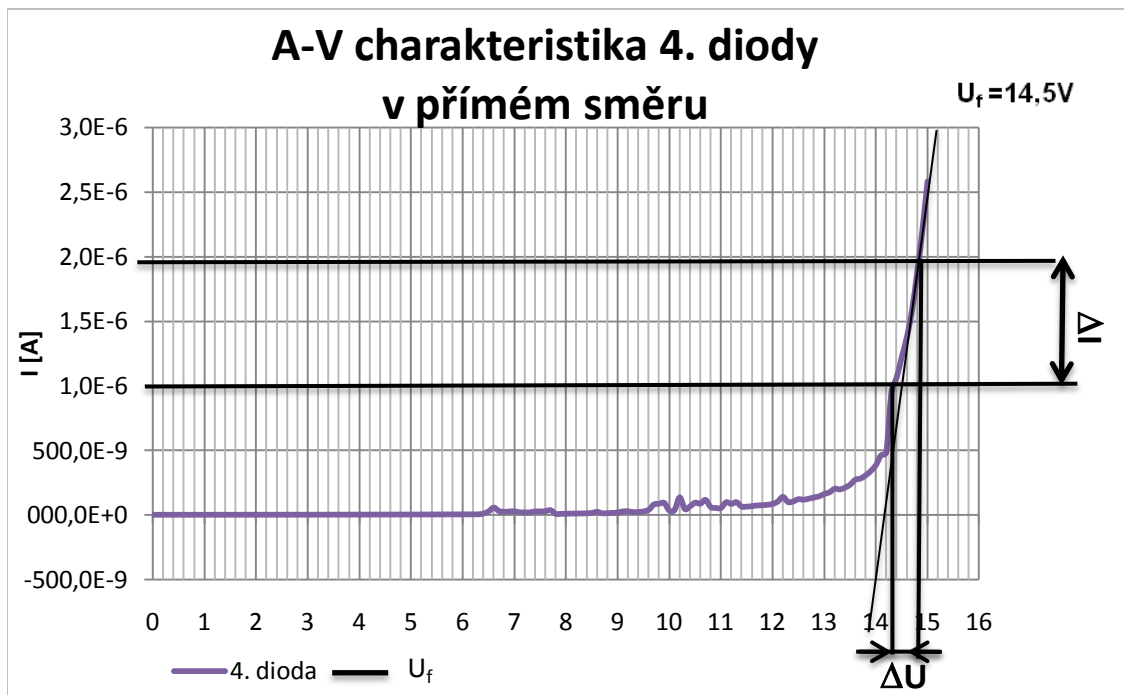
Rovnice pro výpočet je [5.3] Názorný výpočet R_d pro 4 diodu 1. vzorku:

$$R_{d4} = \frac{14,3 - 14,7}{0,94 \cdot 10^{-6} - 1,60 \cdot 10^{-6}} = 0,62 [M\Omega] \quad (5.4)$$

Vypočet byl použit u všech dalších měření.

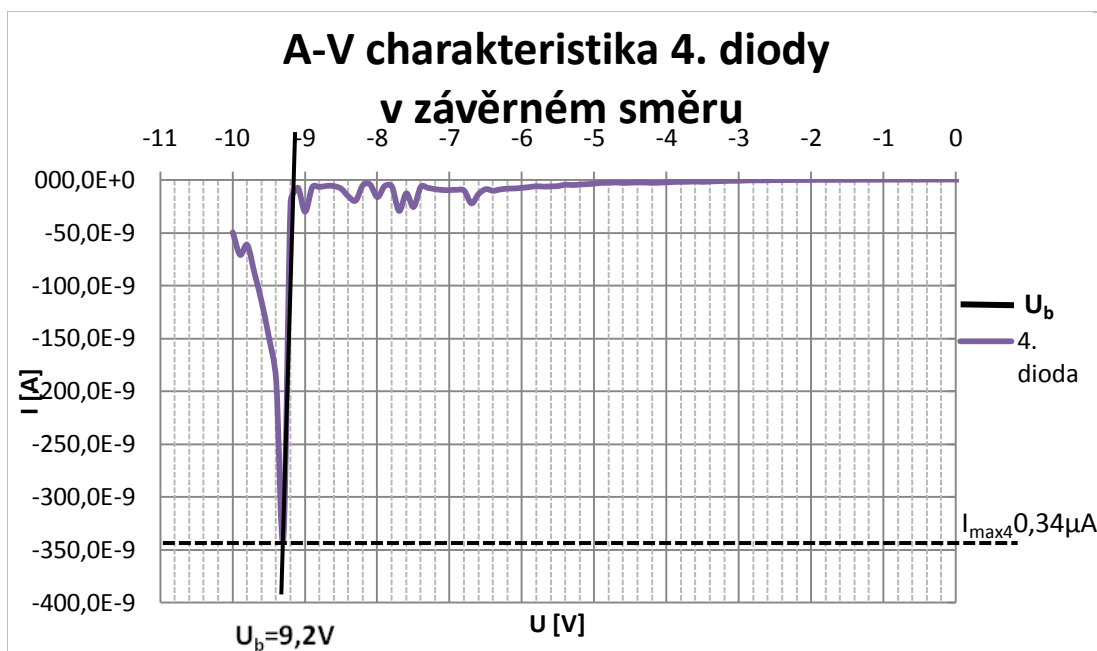
Tab. 5.2: Naměřené a odečtené hodnoty elektrických veličin a vypočítané R_d pro 8 diod při měření za tmy [1. vzorek]

Dioda	Prahové napětí U_p [V]	Stanovené napětí U_b [V]	Proud v přímém směru I_f [μA] při 14,5V	Proud v závěrném směru I_b [nA] při -8 V	Dynamický odpor R_d [$M\Omega$]
1	14,70	-7,80	3,13	-9,64	0,29
2	14,40	-8,40	1,87	-13,59	0,40
3	13,30	-4,40	2,74	-0,03	0,53
4	14,00	-9,20	1,22	-16,33	0,62
5	14,00	-5,00	4,54	-43,69	0,10
6	14,20	-7,40	2,95	-2,52	0,25
7	14,20	-5,90	4,00	-1,88	0,28
8	14,20	-8,60	3,87	-0,01	0,08



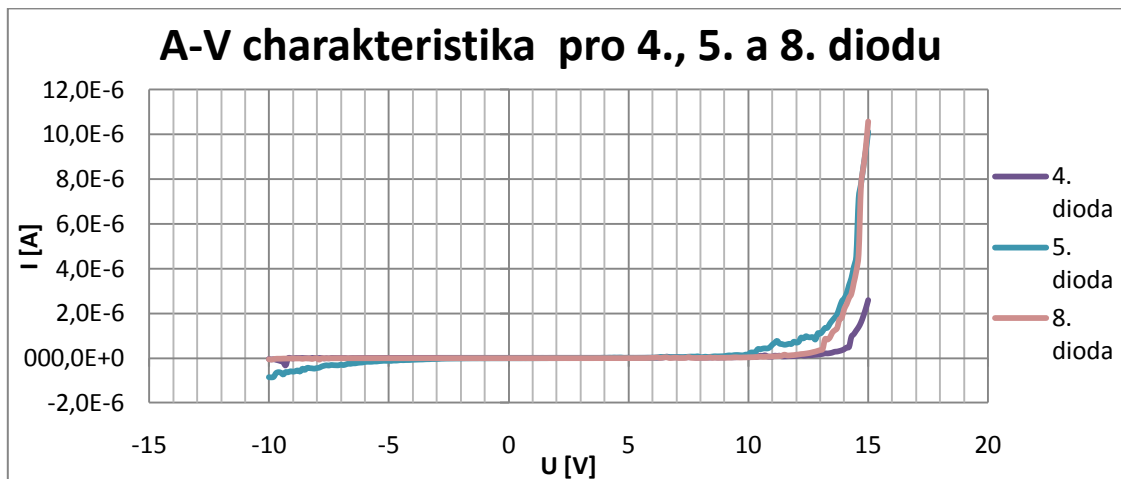
Obr. 5.5: A-V charakteristika 4. diody v přímém směru, se stanoveným U_f a $\Delta U, \Delta I$ pro výpočet dynamického odporu.

V grafu 4. diody na Obr. 5.5 je zobrazen 1. kvadrant (přímý směr). Nárůst proudu začíná při překročení prahového napětí $U_p = 14V$, kdy dojde k otevření diody. Na zmíněném grafu je znázorněno určení veličin $\Delta I, \Delta U$ pro výpočet dynamického odporu R_d . Hodnoty proudů byly odečteny v okolí pracovního bodu.



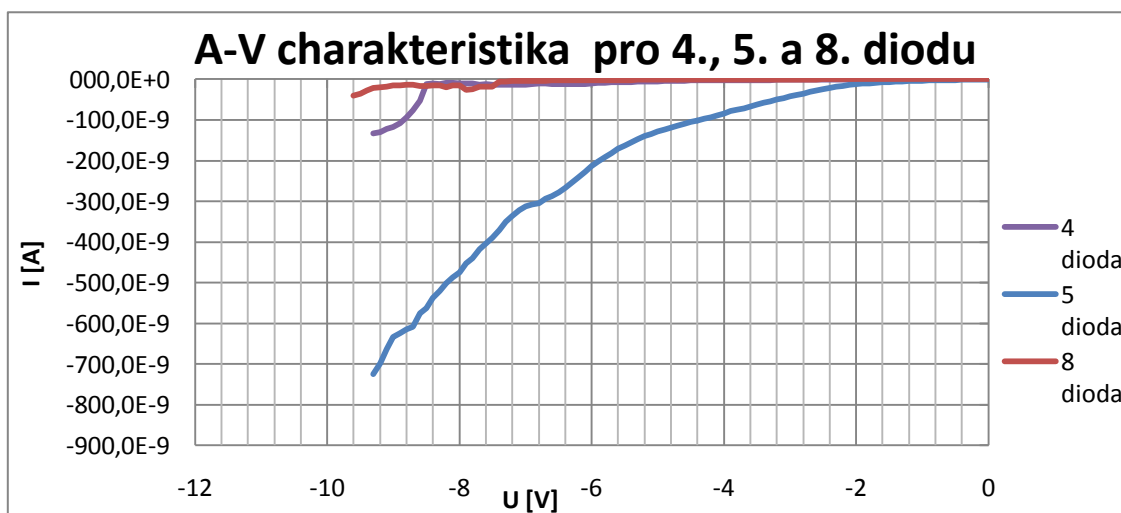
Obr. 5.6: A-V charakteristika 4. diody v závěrném směru, s určeným závěrným napětím U_b daným průsečíkem tečny k charakteristice s osou napětí.

Na Obr. 5.6 je zobrazen závěrný směr pro 4. diodu (3. kvadrant). Stanovené závěrné napětí $U_b = 9,2\text{V}$. V grafu lze pozorovat velký nárůst proudu. Maximální hodnota proudu v závěrném směru 4. diody je $I_b = 0,34\mu\text{A}$. Při dalším zvyšování napětí proud kupodivu klesá.



Obr. 5.7: A-V charakteristiky pro 4., 5. a 8. diodu za tmy [1. vzorek]

Na Obr. 5.7 jsou celkové A-V charakteristiky pro 4., 5. a 8. diodu. V přímém směru je vidět, že každou diodou protéká jiný proud, to platí i pro závěrný směr. Proud tekoucí v přímém směru 4. diodu byl pro $U_f = 14,5\text{V}$ $I_{f4} = 1,22\mu\text{A}$, pro 8. diodu byl $I_{f8} = 3,87\mu\text{A}$ a pro 5. diodu $I_{f5} = 4,54\mu\text{A}$. V přímém směru se tedy velikosti proudů mezi diodami liší až v jednotkách μA . Velké rozdíly parametrů diod jsou nejspíše způsobené výrobním procesem.



Obr. 5.8: A-V charakteristiky závěrného směru pro 4., 5. a 8. diodu za tmy [1. vzorek]

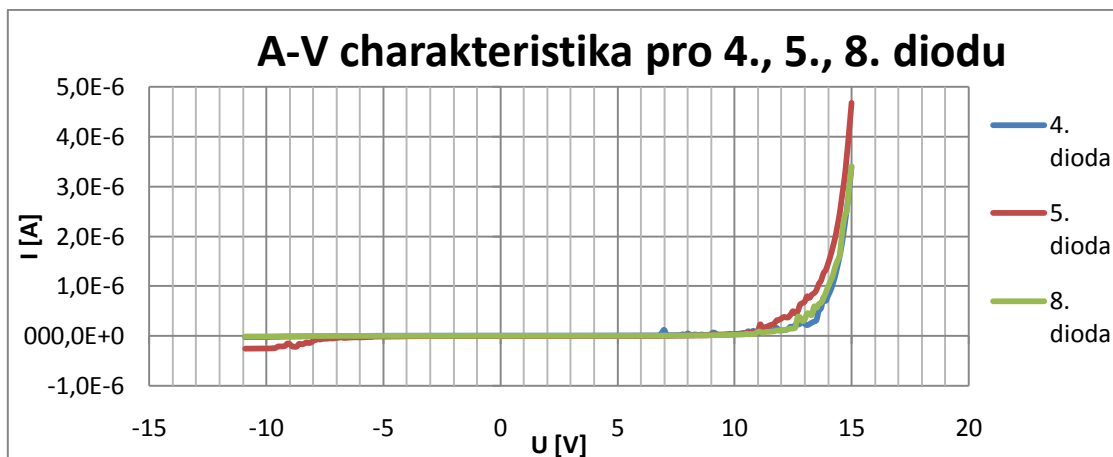
Závěrný směr je zobrazen samostatně, viz Obr. 5.8. Srovnávací napětí pro závěrný směr bylo stanoveno na $U_z = -8\text{V}$. V průbězích jsou patrné proudové pulsy, jež se při měření diod vyskytovaly. Tyto pulsy měly vratný charakter a objevovaly se náhodně v přímém i závěrném směru. Důvod jejich vzniku zatím není znám.

5.5.2 Výsledky měření při stropním osvětlení

Využitým plošným světelným zdrojem byly stropní zářivky. Zjišťován byl vliv osvětlení na pohyb nosičů náboje a bylo provedeno porovnání s měřením za tmy. Pro ustálení odezvy z předešlého měření, byl zachován odstup 10 min. mezi měřeními jednotlivých diod. Naměřené parametry jsou zobrazeny v Tab. 5.3. Prahové napětí při stropním osvětlení bylo zjištěno pro jednotlivé diody v rozsahu $U_p = 13,5\text{V}$ až $14,4\text{V}$. Po plném otevření diod jimi protékal proud v rozsahu $I_f = 1,13\mu\text{A}$ až $4,74\mu\text{A}$. Rozsah stanoveného závěrného napětí měřených diod je $U_b = -6,4\text{V}$ až $-8,1\text{V}$. Proud v závěrném směru byly v rozsahu $I_b = -1,68\text{nA}$ až $-95,95\text{nA}$. Velikosti proudů byly odečteny při napětí v pracovních bodech pro přímý směr $U_f = 14,5\text{V}$ a pro závěrný směr $U_z = -8\text{V}$. Vlivem osvětlení klesá prahové napětí U_p . Pokles prahového napětí u 4. diody je $\Delta U_{p4} = -0,10\text{V}$, 5. diody $\Delta U_{p5} = -0,40\text{V}$ a u 8. diody o $\Delta U_{p8} = -0,30\text{V}$ oproti hodnotám při měření za tmy. Proud v přímém směru se zvětšil pro 4. diodu o $\Delta I_{f4} = 0,4\mu\text{A}$ u 5. a 8. diody proud I_f klesl o $\Delta I_{f5} = -1,06\mu\text{A}$ a $\Delta I_{f8} = -2,24\mu\text{A}$. Je zřejmé, že osvětlení na každou diodu působí odlišně. Dynamický odpor v přímém směru jednotlivých diod byl od $R_d = 0,06\text{M}\Omega$ do $7,30\text{M}\Omega$.

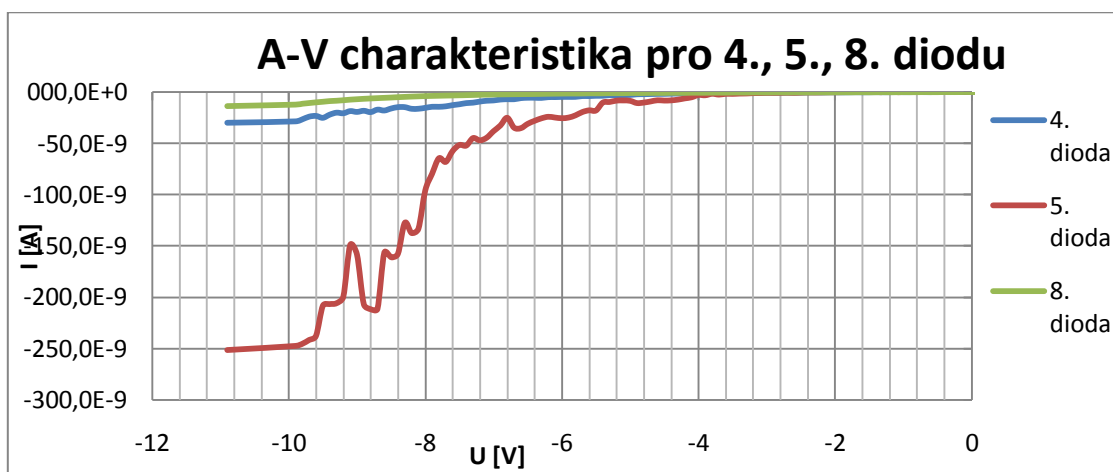
Tab. 5.3: Naměřené a odečtené hodnoty elektrických veličin 8 diod a jejich vypočítaný R_d při stropním osvětlení [1. vzorek].

Dioda	Prahové napětí U_p [V]	Stanovené napětí U_b [V]	Proud v přímém směru I_f [μA] při 14,5V	Proud v závěrném směru I_b [nA] při -8 V	Dynamický odpor R_d [$\text{M}\Omega$]
1	14,10	-6,70	2,85	-3,87	0,30
2	13,70	-8,10	1,13	-1,68	0,73
3	14,10	-7,40	1,58	-4,23	0,34
4	13,90	-6,80	1,62	-15,14	0,35
5	13,60	-6,40	2,48	-95,95	0,28
6	13,50	-8,00	2,42	-2,37	0,30
7	14,40	-6,50	4,74	-43,27	0,06
8	13,90	-7,20	1,63	-3,60	0,40



Obr. 5.9: A-V charakteristika pro 4., 5. a 8. diodu při stropním osvětlení [1. vzorku].

Na Obr. 5.9 jsou celkové charakteristiky pro 4., 5. a 8. diodu. Po překročení prahového napětí nastává exponenciální nárůst proudu (v přímém směru). V přímém i závěrném směru se objevují proudové pulsy.



Obr. 5.10: A-V charakteristika závěrného směru pro 2., 6. a 7. diodu na 1. vzorku při stropním osvětlení

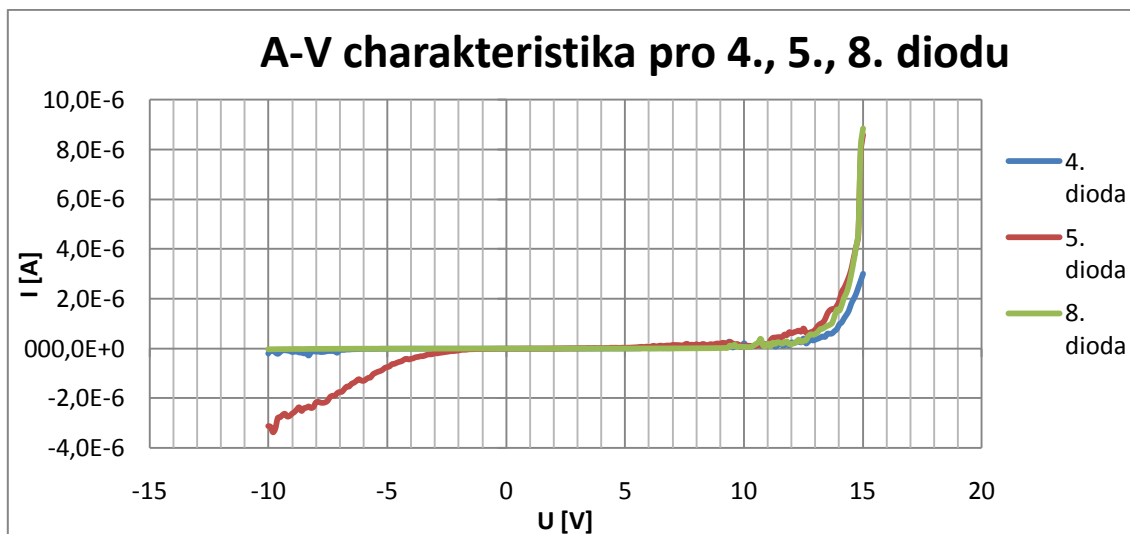
Na Obr. 5.10 jsou zobrazeny charakteristiky pro závěrný směr diod (3. kvadrant). Závěrné napětí bylo stanoveno pro jednotlivé diody od $U_b = -6,4\text{V}$ do $-8,5\text{V}$. Po překročení srovnávacího napětí $U_b = -8\text{V}$ začne výrazně narůstat proud. U 5. diody je patrný nárůst proudu již od napětí $U = -6\text{V}$. V průbězích křivek diod lze opět pozorovat náhodné proudové pulsy. Jednotlivé pulsy mají vratný charakter. Výskyt těchto pulsu je ve větší míře v závěrném směru. Vlivem osvětlení u některých diod klesá závěrné napětí U_b . Ve srovnání s měřením za tmy velikost závěrného napětí 4. diody klesla o $\Delta U_{b4} = -2,4\text{V}$, $\Delta U_{b8} = -1,4\text{V}$. Naopak u 5. diody byl změřen nárůst stanoveného napětí o $\Delta U_{b5} = 1,4\text{V}$ oproti tmě. Závěrný proud 4. diody klesl při stropním osvětlení o $\Delta I_{b4} = 1,19\mu\text{A}$. U 5. a 8. diody vzrostl o $\Delta I_{b5} = -52,26\mu\text{A}$ a $\Delta I_{b8} = -3,59\mu\text{A}$. Proud v závěrném směru dosahuje nejvyšší velikosti u 5. diody $I_{b5} = 95,95\mu\text{A}$ (při $U_z = -8\text{V}$).

5.5.3 Výsledky měření při LED osvětlení

Všechna měření byla provedena za osvětlení, které vytvářel prstenec LED diod, umístěný nad objektivem mikroskopu Leica. Způsob osvětlení je patrný s fotografie na Obr. 5.3. Měření probíhala s desetiminutovým odstupem. Zjišťován byl vliv osvětlení na pohyb nosičů náboje s porovnáním měření za tmy a při stropním osvětlení. Naměřené hodnoty pro každou diodu jsou rozepsány v Tab. 5.4. Při LED osvětlení byla stanovena prahová napětí v rozmezí od $U_p = 12,9\text{V}$ do $14,6\text{V}$. Proudů otevřenou diodou byly v rozsahu $I_f = 1,17\mu\text{A}$ až $4,74\mu\text{A}$. Rozsah stanoveného závěrného napětí měřených diod byl $U_b = -3,50\text{V}$ až $-9,40\text{V}$. Proudů v závěrném směru byly v rozsahu $I_b = -2,17\text{nA}$ až $-119,99\text{nA}$. Velikosti proudů byly odečteny při napětí v pracovních bodech pro přímý směr $U_f = 14,5\text{V}$ a pro srovnávací napětí $U_z = -8\text{V}$. Při osvětlení pomocí LED 4. diody došlo k poklesu prahového napětí o $\Delta U_{p4} = -0,3\text{V}$ v porovnání s prahovým napětím za tmy. Ve srovnání se stropním osvětlením, byl tento pokles $\Delta U_{f4} = -0,2\text{V}$. Velikost proudu v přímém směru 4. diody vzrostla o $\Delta I_{f4} = 0,58\mu\text{A}$ oproti tmě a ve srovnání se stropním osvětlením byla velikost proudu vyšší o $\Delta I_{f4} = 0,18\mu\text{A}$. Vliv osvětlení na 4. diodu je tedy patrný a odpovídá předpokladům. Při LED osvětlení 4. dioda vykazuje vyšší pohyb nosičů náboje v přímém i závěrném směru. Srovnání je použito pro proudy v pracovních bodech U_f, U_z . Při měření 5. a 8. diody jsou odezvy na odlišná osvětlení rozdílné. Hodnoty pro 4., 5. a 8. diodu jsou v Tab. 5.5. V závěrném směru protékaly jednotlivými diodami proudy v rozsahu $I_b = 2,17\text{nA}$ až $199,99\text{nA}$. Dynamické odpory byly v rozsahu $R_d = 0,49\text{M}\Omega$ až $1,62\text{M}\Omega$. Závěrná napětí v rozsahu $U_b = 3,5\text{V}$ až $9,4\text{V}$.

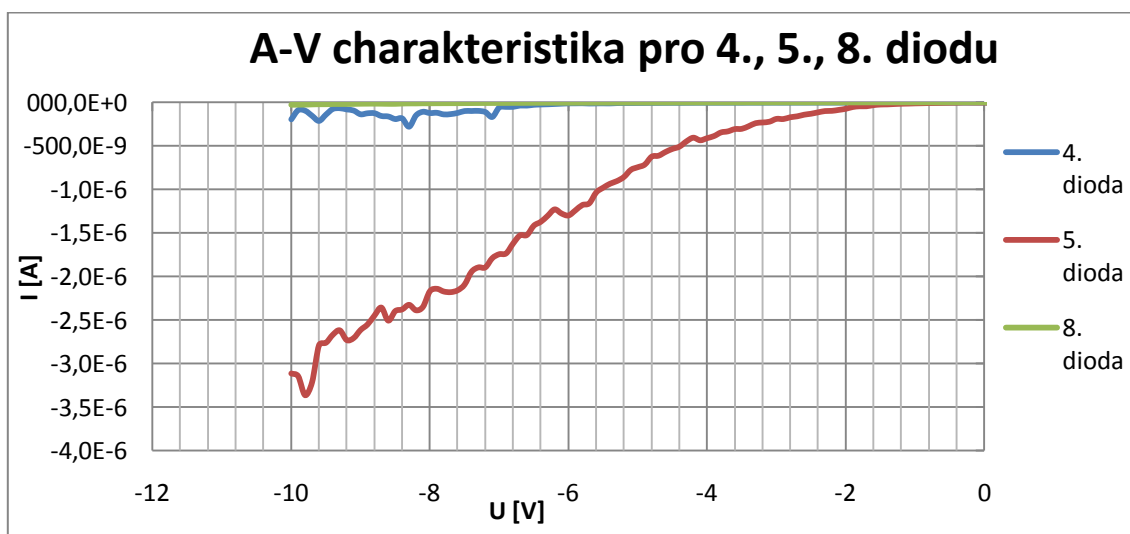
Tab. 5.4: Naměřené a odečtené hodnoty elektrických veličin 8 diod a jejich vypočítaný R_d při LED osvětlení [1. vzorek].

Dioda	Prahové napětí U_p [V]	Stanovené napětí U_b [V]	Proud v přímém směru I_f [μA] při 14,5V	Proud v závěrném směru I_b [nA] při -8 V	Dynamický odpor R_d [$\text{M}\Omega$]
1	13,50	-6,60	3,28	-48,09	0,39
2	12,90	-6,70	1,17	-34,25	0,69
3	13,80	-9,40	2,23	-11,36	0,30
4	13,70	-5,90	1,80	-119,99	0,43
5	13,80	-3,50	3,18	2167,83	0,23
6	13,70	-6,30	3,73	-11,14	0,26
7	14,60	-6,00	3,11	-15,05	0,19
8	14,50	-5,50	2,98	-10,88	0,19



Obr. 5.11: A-V charakteristika pro 4., 5. a 8 diodu při LED osvětlení [1. vzorek]

Na Obr. 5.11 jsou celé A-V charakteristiky pro 4., 5. a 8. diodu. V přímém směru nastává nárůst proudu po překročení prahového napětí. Nejvyššího pohybu nosičů náboje dosahuje 5. dioda s velikostí proudu $I_f = 3,18 \mu\text{A}$.



Obr. 5.12: A-V charakteristika závěrného směru pro 1., 3. a 7. diodu při LED osvětlení [1. vzorku].

Závěrná napětí byla v rozmezí $U_b = 3,5\text{V}$ až $9,4\text{V}$. Po překročení závěrného napětí výrazně narůstal proud. U 5. diody se při LED osvětlení zřetelně vzrostl proud, jak přímém, tak i v závěrném směru. Velikost proudu v závěrném směru 5. diodou dosahoval řádů μA , což u 1. vzorku nedosahovala žádná dioda. Hustota proudových pulsu se zvětšila, viz Obr. 5.12. Tyto pulsy zřejmě souvisí se strukturou materiálu diod.

5.6 Shrnutí pro 1. vzorek

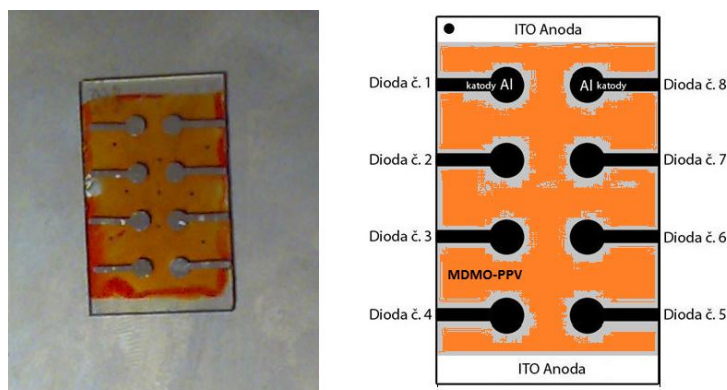
Při srovnání parametrů PLED je patrný vliv různého osvětlení na diody. Druh osvětlení působil na každou diodu odlišně. Parametry jednotlivých diod vykazovaly velké rozdíly. Ty lze přisoudit technologii výroby. Největší rozdíly mezi diodami se projevily při LED osvětlení. Při něm se zřejmě zvětšila vzájemná interakce mezi sousedními polymerními řetězci a tedy i podmínky pro přenos nábojů. Srovnání rozdílu naměřených veličin při odlišném osvětlení diod je v Tab. 5.5. Nejmarkantnější rozdílné proudy většiny měřených diod byly při $U_p = 14,5V$ (v přímém směru) a $U_z = -8V$ (v závěrném směru). Při osvětlení jsou prahová i závěrná napětí nižší. Při překročení stanoveného napětí U_b v závěrném směru docházelo k nárůstu proudu, s výjimkou diody č. 4. U čtvrté diody, při měření v závěrném směru, lze pozorovat jev, kdy při dosažení $U_b = -9,30V$ se zastaví růst proudu a při dalším zvyšování napětí začne velikost proudu klesat anomálně, viz Obr. 5.6. Průrazné napětí nebylo určeno pro nebezpečí poškození vzorku, určeného pro další měření.

Tab. 5.5: Srovnání 4., 5. a 8. diody při odlišném osvětlení.

Osvětlení	Dioda	Prahové napětí U_p [V]	Stanovené napětí U_b [V]	Proud v přímém směru I_f [μA] při 14,5V	Proud v závěrném směru I_b [nA] při -8 V	Dynamický odpor R_d [MΩ]
LED os.	4	13,70	-5,90	1,80	-119,99	0,43
Stropní os.	4	13,90	-6,80	1,62	-15,14	0,35
Tma	4	14,00	-9,20	1,22	-16,33	0,62
LED os.	5	13,80	-3,50	3,18	-2,17	0,23
Stropní os.	5	13,60	-6,40	2,48	-95,95	0,28
Tma	5	14,00	-5,00	4,54	-43,69	0,10
LED os.	8	14,50	-5,50	2,98	-10,88	0,19
Stropní os.	8	13,90	-7,20	1,63	-3,60	0,40
Tma	8	14,20	-8,60	3,87	-0,01	0,08

5.7 Druhý vzorek

Postup měření byl shodný s prvním vzorkem. Vzorek byl tvořen vrstvami ITO/PEDOT/MDMO-PPV/Alg₃/Al, kde aktivní vrstvou byl polymer MDMO-PPV. Bylo proměřeno 7 diod v propustném i závěrném směru. Po zjištění vnitřního přerušení u diody č. 1 byla tato dioda vyřazena z dalšího měření. Z A-V charakteristik byl zjišťován vliv osvětlení na pohyb nosičů náboje. Pro každou diodu byl vypočítán dynamický odpor v oblasti pracovního bodu při $U_f = 13,5\text{V}$, po dosazení do rovnice (5.3). Pro závěrný směr byl pracovní bod $U_z = -8\text{V}$



Obr. 5.13: Vzorek 2. ITO/PEDOT/MDMO-PPV/Alg₃/Al reálný pohled shora a demonstrativní pohled na rozmístění diod

5.7.1 Výsledky měření za tmy

Bylo proměřeno 7 diod, každá samostatně. Naměřené hodnoty jsou zobrazeny v Tab. 5.6. Prahové napětí diod bylo v rozsahu $U_p = 5,10\text{V}$ až $13,10\text{V}$. Po plném otevření diod protékaly jimi proudy v rozsahu $I_f = 2,76\mu\text{A}$ ÷ $7,42\mu\text{A}$. Velikosti proudů byly odečteny v okolí pracovního bodu $U_f = 13,5\text{V}$. Dynamický odpor jednotlivých diod byl v rozmezí $R_d = 0,59\text{M}\Omega$ ÷ $3,55\text{M}\Omega$. Pro výpočet dynamického odporu byly z grafu, viz Obr. 5.14 odečteny veličiny ΔU a ΔI . V závěrném směru diod bylo naměřené závěrné napětí v rozmezí $U_b = -4,40\text{V}$ ÷ $-9,80\text{V}$. Proud změřený v závěrném směru u druhého vzorku byl srovnatelný s prvním vzorkem. Řádově dosahuje hodnot nA. Při měření za tmy se v závěrném směru proudy diod výrazně lišily. Proudů v závěrném směru byly v rozmezí $I_b = -2,09\text{nA}$ ÷ -270nA . Velké rozdíly proudů diod jsou přisuzovány výrobním procesům

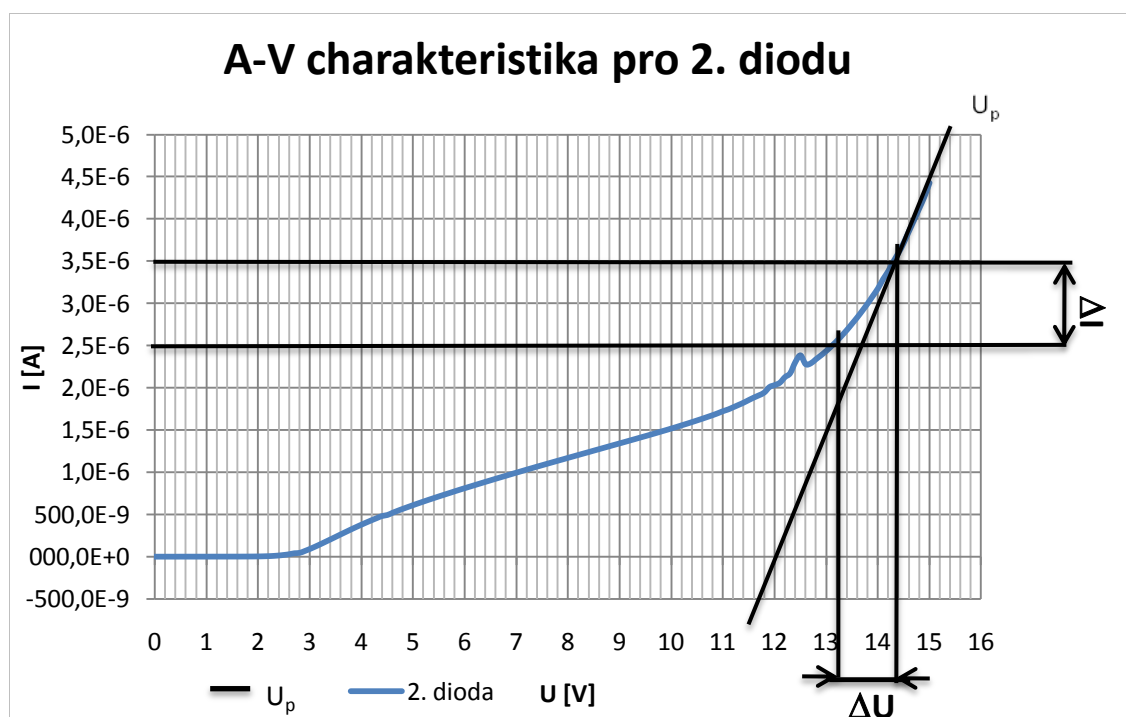
Rovnice pro výpočet je [5.3] Názorný výpočet R_d pro 2 diodu 2. vzorku

$$R_{d2} = \frac{14,4 - 13,2}{3,60 \cdot 10^{-6} - 2,55 \cdot 10^{-6}} = 1,15 [\text{M}\Omega] \quad (5.5)$$

Vypočet byl použit u všech dalších měření.

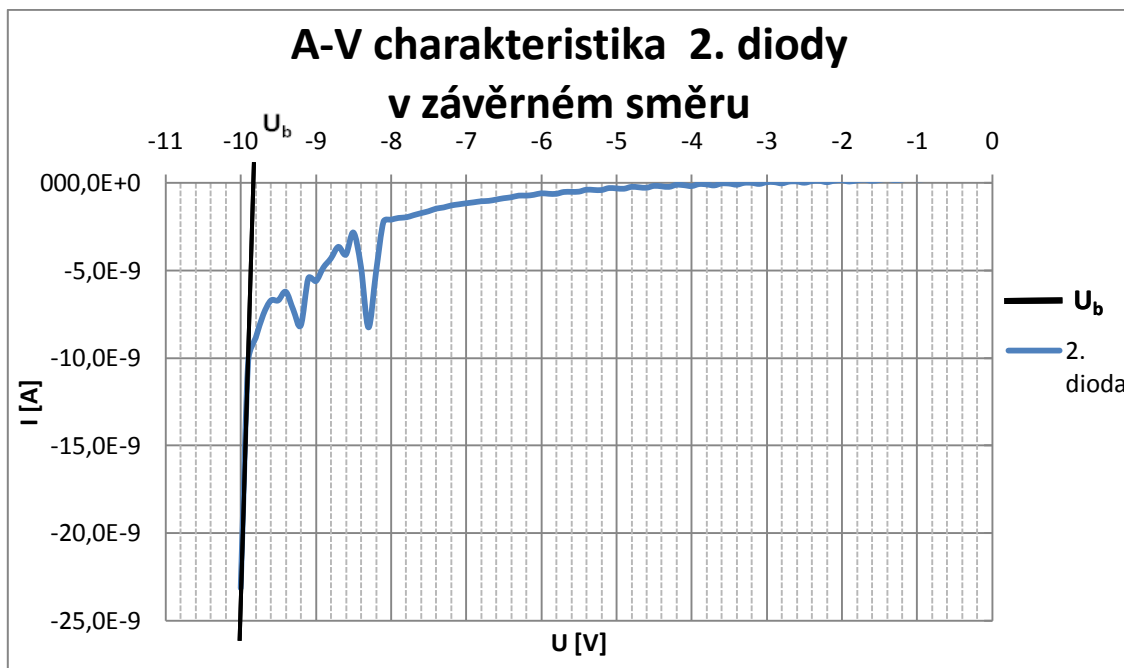
Tab. 5.6: Naměřené a odečtené hodnoty elektrických veličin a vypočítané R_d pro 7 diod při měření za tmy [2. vzorek].

Dioda	Prahové napětí U_p [V]	Stanovené napětí U_b [V]	Proud v přímém směru I_f [μ A] při 13,5V	Proud v závěrném směru I_b [nA] při -8 V	Dynamický odpor R_d [M Ω]
1	-	-	-	-	-
2	11,80	-9,80	2,76	-2,09	1,15
3	5,10	-7,60	3,67	-9,66	3,55
4	11,20	-8,80	3,32	-2,12	2,22
5	13,10	-7,70	3,22	-3,06	1,00
6	10,50	-4,40	3,35	-30,13	1,43
7	12,80	-5,70	3,51	-270,10	0,59
8	13,10	-9,40	7,42	-85,56	1,09



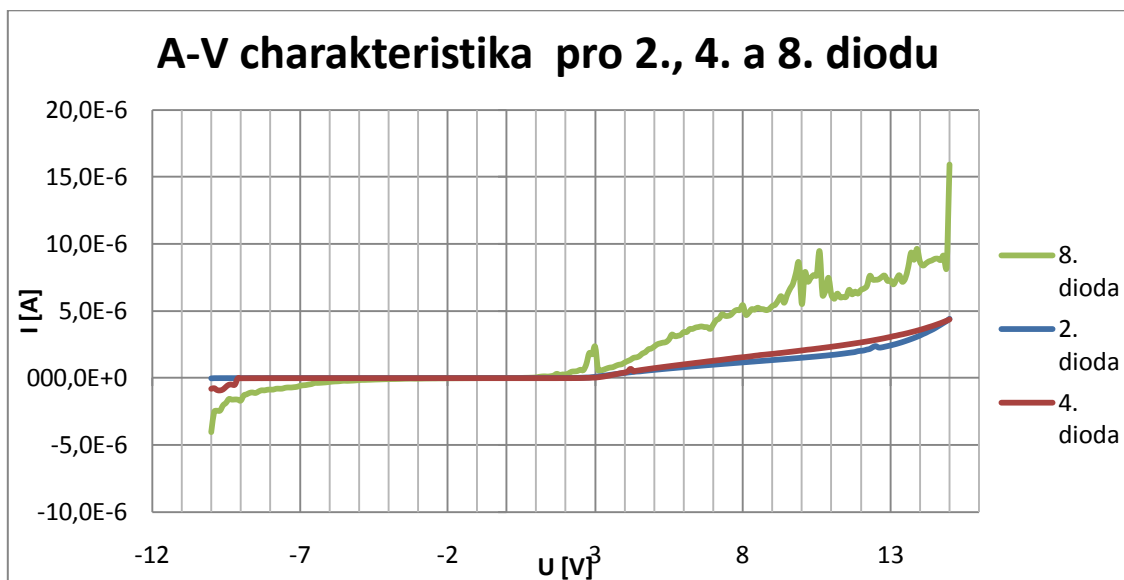
Obr. 5.14: A-V charakteristika 2. diody v přímém směru, se stanoveným U_p a $\Delta U, \Delta I$ pro výpočet dynamického odporu [2. vzorek].

Na Obr. 5.14 je graficky vyjádřena závislost napětí a proudu při měření 2. diody v přímém směru. Průchodnost diody začíná při $U = 3$ V a lineárně roste. Po překročení prahového napětí $U_p = 11,8$ V dojde k plnému otevření diody a následnému strmému nárůstu proudu. Pomalý nárůst proudu se projevuje u většiny měření, což lze přisoudit za vlastnost polymeru MDMO-PPV.



Obr. 5.15: A-V charakteristika 2. diody při měření v závěrném směru, se stanoveným napětím U_b daným průsečíkem tečny k charakteristice s osou napětí [2. vzorek].

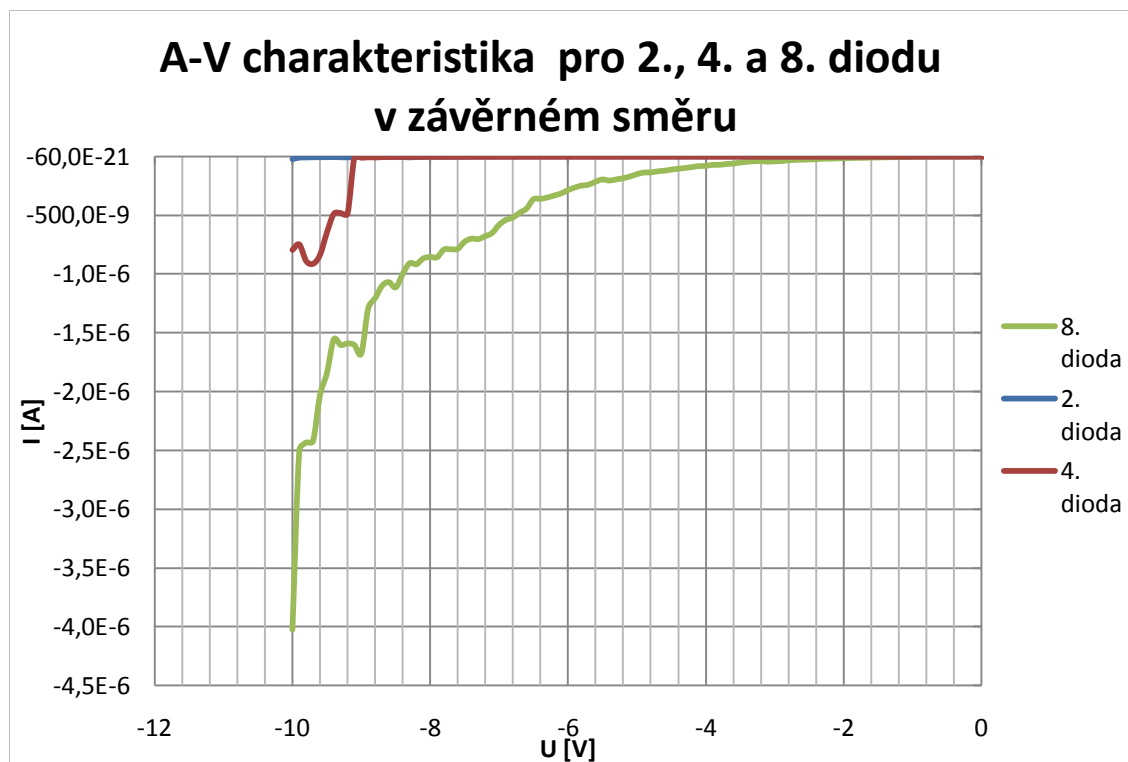
V grafu na Obr. 5.15 je zobrazen závěrný směr (3 kvadrant), kde závěrné napětí 2. diody je odečteno $U_b = -9,8\text{V}$. Po překročení závěrného napětí lze sledovat výrazný nárůst proudu. Při nárůstu proudu se uplatní menších proudových pulsů oproti vzorku 1.



Obr. 5.16: A-V charakteristika pro 2., 4. a 8. diodu při měření za tmy [2. vzorek]

Celkové A-V charakteristiky 2., 4. a 8. diody jsou uvedeny na Obr. 5.16 Z grafu lze v přímém směru vysledovat značné proudové rozdíly při $U_f = 13,5\text{V}$ zejména mezi 2. diodou $I_2 = 2,76\mu\text{A}$ a 8. diodou $I_8 = 7,42\mu\text{A}$. Při měření bez osvětlení jsou velikosti proudů pro tyto diody tj. I_2 minimální ze všech diod a I_8 je maximální pro přímý i závěrný směr. Tyto rozdíly proudů mezi 2. a 8. diodou jsou v přímém směru

$\Delta I_{f8,2} = 4,66\mu\text{A}$. Pro závěrný proud vychází rozdíl $\Delta I_{b8,2} = 268,01\text{nA}$. V přímém i závěrném směru lze sledovat mezi jednotlivými diodami 2. vzorku výrazně větší rozdíly nežli tomu bylo u vzorku 1 v přímém i závěrném směru.



Obr. 5.17: A-V charakteristika pro 2., 4. a 8. diody v závěrném směru neosvětleného vzorku [2. vzorek]

Závěrný směr je zobrazen zvlášť v grafu na Obr. 5.17, z něhož zde patrný uvedený velký rozdíl mezi 2. a 8. diodou. V grafu jsou patrné i proudové pulsy, jež se při měření diod opět vyskytovaly. Nejvíce proudových skokových změn vykazovala 8. dioda. U zbylých diod (2. až 7.) byla četnost těchto proudových skoků menší.

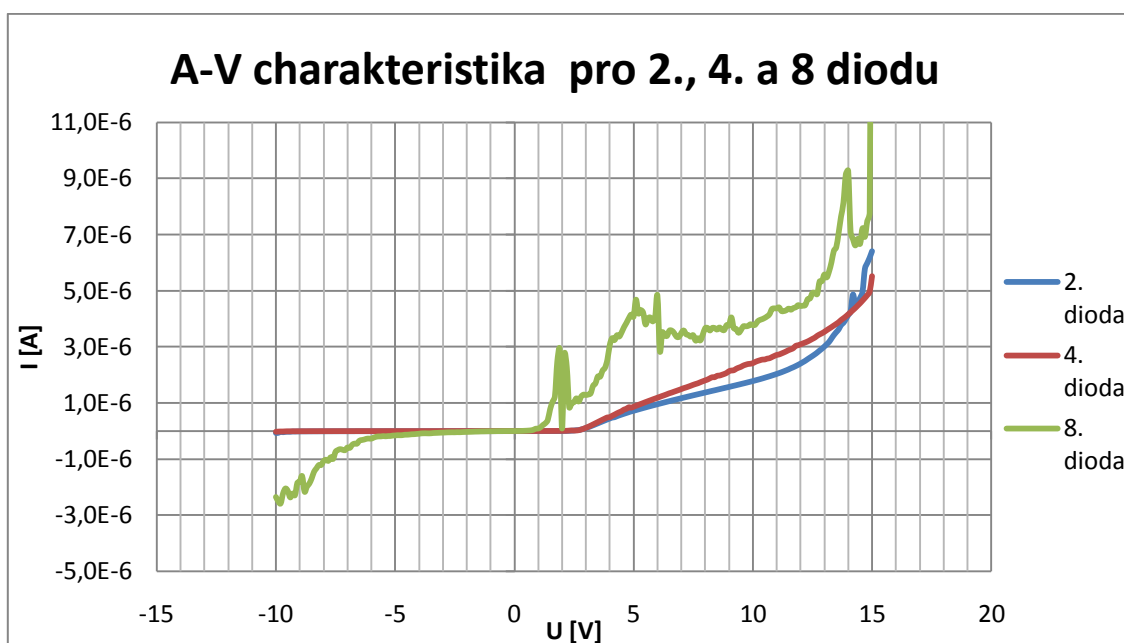
5.7.2 Výsledky měření při stropním osvětlení

Plošným světelným zdrojem byly stropní zářivky, využité i při měření prvního vzorku. Pro ustálení odezvy z předešlého měření byl udržován 10 min. odstup mezi měřeními. Naměřené parametry jsou uvedeny v Tab. 5.7. Jednotlivá stanovená prahová napětí diod při stropním osvětlení byla od $U_p = 8,00\text{V}$ do $13,00\text{V}$. Po plném otevření diod tekly proudy od $I_f = 3,03\mu\text{A}$ do $6,55\mu\text{A}$. V závěrném směru tekly proudy v rozsahu $I_b = -3,05\text{nA}$ až do $-1,07\mu\text{A}$. Proud v závěrném směru 8. diody dosahoval vysokých hodnot, až srovnatelných s hodnotami proudů v přímém směru. Velikosti proudů byly odečteny při napětí v pracovním bodě v přímém směru $U_f = 13,5\text{V}$ a pro závěrný směr bylo srovnávací napětí $U_z = -8,0\text{V}$. Vlivem osvětlení klesá prahové napětí U_p . Pokles prahového napětí je u 2. diody $\Delta U_{p2} = -0,80\text{V}$, u 4. diody $\Delta U_{p4} = -3,20\text{V}$ a u 8. diody o $\Delta U_{p8} = -0,10\text{V}$ oproti hodnotám při měření za tmy.

Proud v přímém směru se zvětšil pro 2. diodu o $\Delta I_{f2} = 0,76 \mu\text{A}$, 5. diodu $\Delta I_{f4} = 0,49 \mu\text{A}$ a u 8. klesl proud o $\Delta I_{f8} = -0,87 \mu\text{A}$. Dynamické odpory v přímém směru pro jednotlivé diody byly zjištěny v rozsahu $R_d = 0,21 \text{M}\Omega$ až $2,83 \text{M}\Omega$.

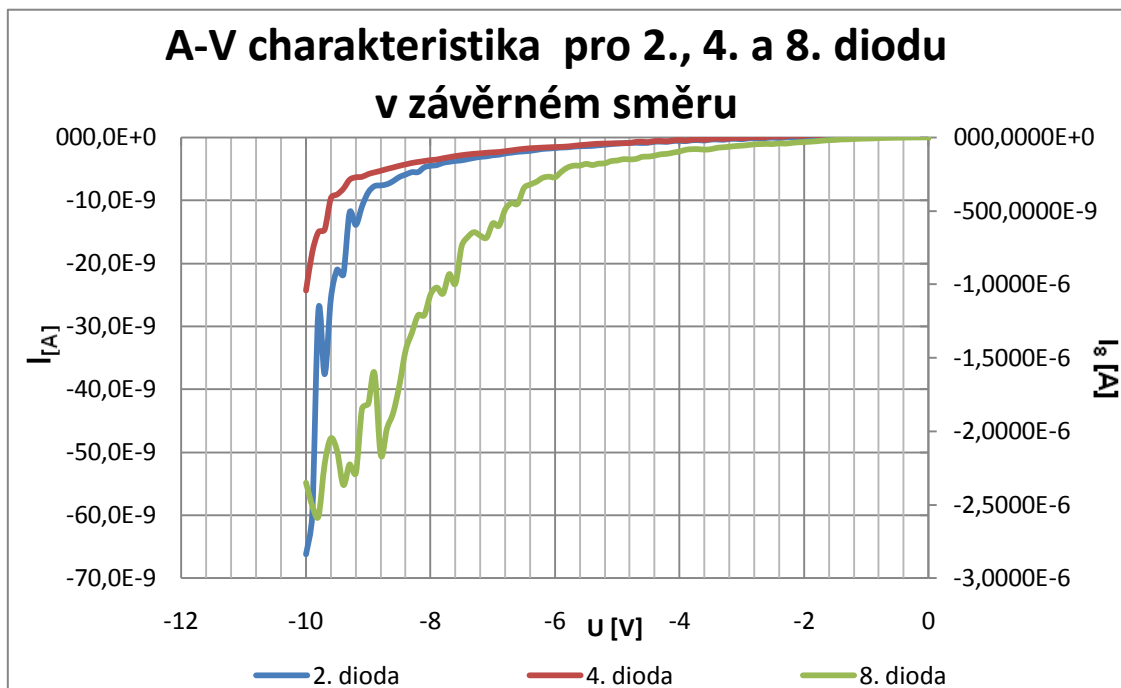
Tab. 5.7: Naměřené a odečtené hodnoty elektrických veličin a spočítaná R_d pro 7 diod při stropním osvětlení [2. vzorek].

Dioda	Prahové napětí U_p [V]	Stanovené napětí U_b [V]	Proud v přímém směru I_f [μA] při 13,5V	Proud v závěrném směru I_b [nA] při -8 V	Dynamický odpor R_d [$\text{M}\Omega$]
1	-	-	-	-	-
2	11,00	-9,40	3,52	-4,53	1,28
3	10,40	-6,90	5,36	-3,05	0,21
4	8,00	-9,30	3,81	-3,65	2,67
5	8,30	-5,90	3,32	-27,03	2,30
6	12,20	-5,60	3,21	-260,44	1,37
7	9,90	-5,20	3,03	-212,50	1,52
8	13,00	-6,60	6,55	-1069,09	2,83



Obr. 5.18: A-V charakteristika pro 2., 4. a 8 diodu při stropním osvětlení [2. vzorek]

Na Obr. 5.18 jsou uvedeny celkové A-V charakteristiky pro 2., 4. a 8. diody. Nejvyšší proud v přímém směru má 8. dioda. V pracovním bodě je velikost proudu v přímém směru 8. diody $I_{f8} = 6,55 \mu\text{A}$. V grafu lze pozorovat nižší proudy u 2. a 4. diody. U 8. diody se projevuje velké množství proudových skokových změn, jak v přímém, tak i v závěrném směru, kdežto u 2. a 4. diody se nevyskytují.



Obr. 5.19: A-V charakteristika pro 2., 4. a 8. diodu v závěrném směru při stropním osvětlení. Levá proudová osa se vztahuje pro 2. a 4. diodu, pravá proudová osa pro 8. diodu.

Na Obr. 5.19 jsou zobrazeny charakteristiky pro závěrný směr. Pro 8. diodu musela být přidána vedlejší osa vzhledem k vysokým hodnotám změřených proudů. Po překročení stanoveného napětí U_b 8. diody se velikost závěrného proudu I_b pohybovala řádově v μA . U diod 2., 3. a 4. je velikost závěrného proudu I_b nižší, viz Tab. 5.7.

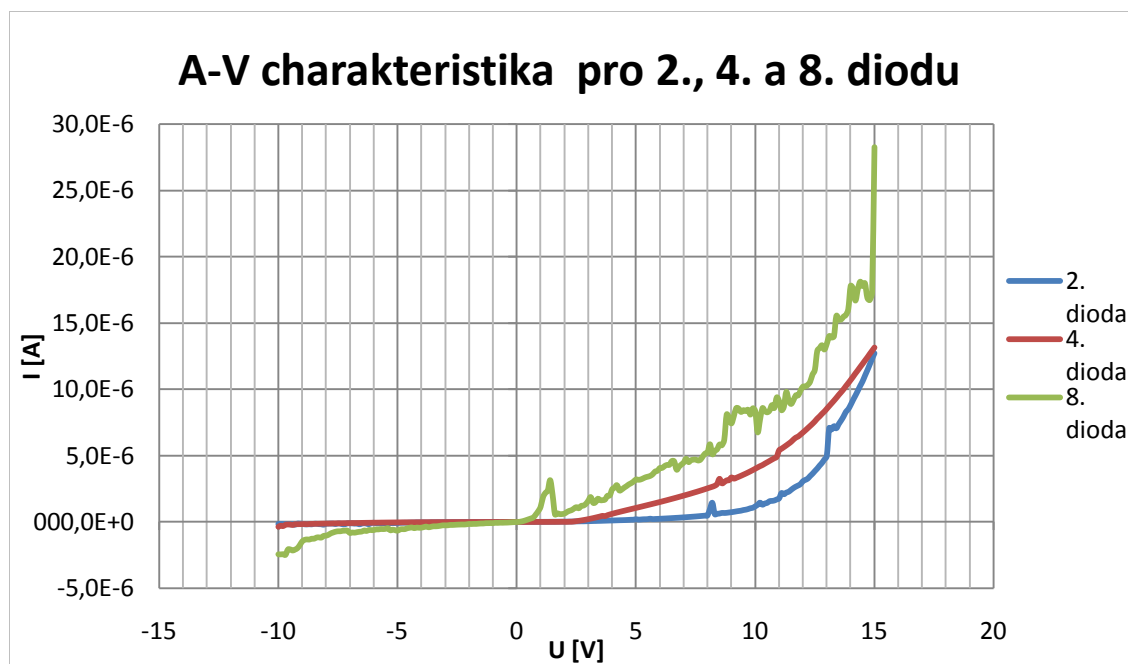
5.7.3 Výsledky měření při LED osvětlení

Zdrojem osvětlení byl prstenec LED diod, umístěný nad objektivem mikroskopu Leica, který byl využit již při měření na prvním vzorku. Způsob osvětlení je na fotografii Obr. 5.3. Pro ustálení odezvy, byl opět zachován odstup 10 min. mezi měřeními jednotlivých diod. Naměřené hodnoty pro každou diodu jsou rozepsány v Tab. 5.8. Při LED osvětlení byla zjištěna prahová napětí $U_p = 8,00\text{V}$ až $12,80\text{V}$. Rozsah stanoveného závěrného napětí měřených diod byl $U_b = -3,10\text{V}$ až $-9,30\text{V}$. Proudů v závěrném směru byly v rozsahu $I_b = -0,10\text{nA}$ až $-1,03\mu\text{A}$. Velikosti proudů byly odečteny při napětí v pracovních bodech pro přímý směr $U_f = 13,50\text{V}$ a pro srovnávací napětí $U_z = -8\text{V}$. Při osvětlení pomocí prstence LED došlo u 2., 4. a 8. diody k poklesu prahového napětí o rozdíly $\Delta U_{p2} = -0,70\text{V}$, $\Delta U_{p4} = -2,10\text{V}$, $\Delta U_{p8} = -0,3\text{V}$ v porovnání s prahovým napětím za tmy. Ve srovnání se stropním osvětlením vznikl nárůst o $\Delta U_{p2} = 0,10\text{V}$, $\Delta U_{p4} = 1,10\text{V}$ a u 8. diody došlo k poklesu prahového napětí o $\Delta U_{p8} = -0,20\text{V}$. Velikosti proudů v přímém směru 2., 4. a 8. diody vzrostly o $\Delta I_{f2} = 4,61\mu\text{A}$, $\Delta I_{f4} = 6,26\mu\text{A}$ a $\Delta I_{f8} = 7,87\mu\text{A}$ oproti tmě. Ve srovnání se stropním osvětlením byla velikost jednotlivých proudů vyšší o $\Delta I_{f2} = 3,85\mu\text{A}$, $\Delta I_{f4} = 5,77\mu\text{A}$ a $\Delta I_{f8} = 8,74\mu\text{A}$. Vliv osvětlení na 2., 4. a 8. diodu je tedy patrný a odpovídá předpokladům. Srovnání je použito pro proudy v pracovních bodech

U_f , U_z . Pro diody 5. a 8. V závěrném směru protékaly jednotlivými diodami proudy o velikosti $I_b = -0,10\mu\text{A}$ až $-1,03\mu\text{A}$. Dynamické odpory byly v rozsahu $R_d = 0,33\text{M}\Omega$ až $0,53\text{M}\Omega$. Stanovená závěrná napětí jsou v rozsahu $U_b = 3,10\text{V}$ až $9,3\text{V}$.

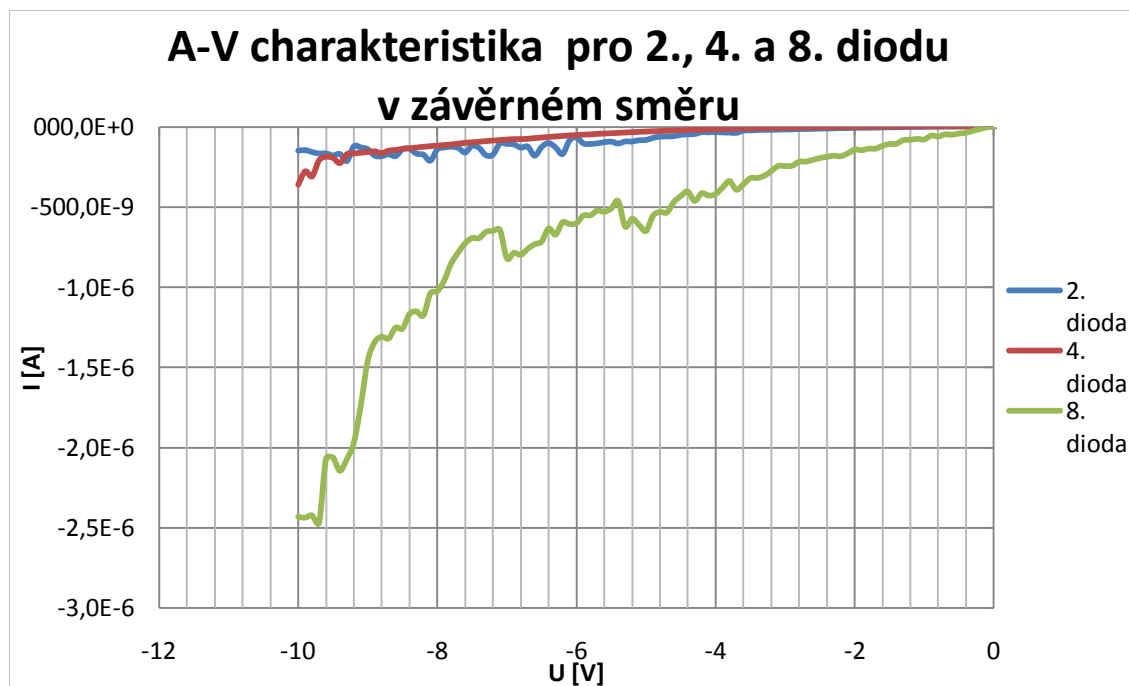
Tab. 5.8: Naměřené a odečtené hodnoty elektrických veličin a spočítané R_d pro 7 diod při LED osvětlení [2. vzorek].

Dioda	Prahové napětí U_p [V]	Stanovené napětí U_b [V]	Proud v přímém směru I_f [μA] při 13,5V	Proud v závěrném směru I_b [nA] při -8 V	Dynamický odpor R_d [$\text{M}\Omega$]
1	-	-	-	-	-
2	11,10	-3,10	7,37	-0,14	0,36
3	8,00	-6,00	8,07	-0,12	0,53
4	9,10	-9,30	9,58	-0,12	0,47
5	9,40	-4,40	7,39	-0,10	0,47
6	11,40	-6,40	6,81	-0,33	0,33
7	10,90	-5,80	6,67	-0,29	0,40
8	12,80	-6,30	15,29	-1,03	0,29



Obr. 5.20: A-V charakteristika pro 2., 4. a 8. diodu při LED osvětlení [2. vzorek]

V Obr. 5.20 jsou grafy pro 2., 4. a 8. diodu. Největší proud teče 8. diodou. V pracovním bodě 8. diody U_f je velikost proudu $I_{f8} = 15,29\mu\text{A}$. Z grafu jsou zřejmé velké rozdíly proudů mezi jednotlivými diodami: 2. diodou procházel při $U_f = 13,5\text{V}$ proud $I_{f2} = 7,37\mu\text{A}$, 4. diodou $I_{f4} = 9,58\mu\text{A}$ a 8. diodou $I_{f8} = 15,29\mu\text{A}$. Rozdíly proudů mezi diodami jsou řádu μA .



Obr. 5.21: A-V charakteristika pro 2., 4. a 8. diodu v závěrném směru při LED osvětlení [2. vzorek]

Na Obr. 5.21 je A-V charakteristika pro 2., 4. a 8. diody v závěrném směru (3 kvadrant). Velikosti proudů v závěrném směru se oproti minulému měření za tmy a stropního osvětlení, řádově zvýšily na stovky nA (pro všechny diody). Diodou č. 8 prochází nejvyšší proud v obou směrech (přímý i závěrný směr). Charakteristiky jsou opět doprovázeny proudovými pulsy.

5.7.4 Shrnutí pro 2. vzorek

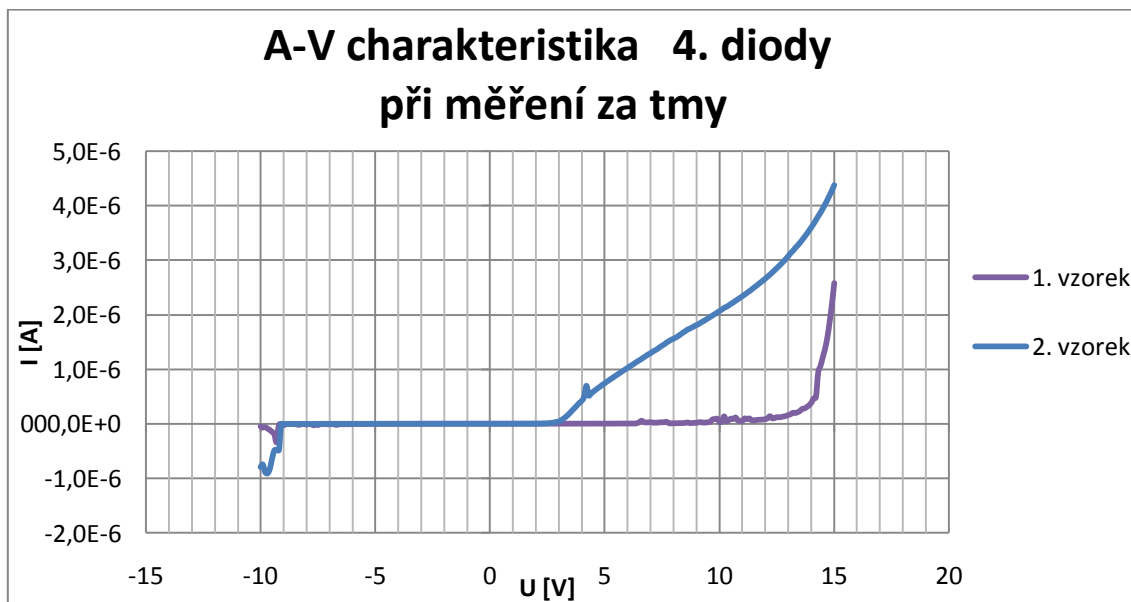
Při porovnání vlastností diod vytvořených touto technologií je při různém osvětlení patrný nárůst proudů při osvětlení LED. Velikost proudu byla nejvyšší pro 8. diodu, tj. $I_{\text{FB}} = 15,29 \mu\text{A}$. Proud v závěrném směru při LED osvětlení se zvýšil až na stovky nA z původních hodnot v jednotkách nA za tmy. Při osvětlení se snižuje hodnota prahového i závěrného napětí. Srovnání rozdílů naměřených veličin při odlišném osvětlení diod je v Tab. 5.9. U většiny měřených diod 2. vzorku nebyl patrný velký výskyt proudových pulsů. Na výskyt těchto pulsů zřejmě nemá osvětlení výrazný vliv. Průběhy A-V charakteristik změřených diod vykazovaly oproti vzorku 1. již při nižších napětích patrný nárůst proudu. Příčinou může být přítomnost dalšího polymeru MDMO-PPV ve struktuře diod. Všechny A-V charakteristiky diod 2. i 1. vzorku lze nalézt v přílohách.

Tab. 5.9: Srovnání 2., 4. a 8. diody při odlišném osvětlení. [2. vzorek]

Osvětlení	Dioda	Prahové napětí U_p [V]	Stanovené napětí U_b [V]	Proud v přímém směru I_f [μ A] při 13,5V	Proud v závěrném směru I_b [nA] při -8 V	Dynamický odpor R_d [M Ω]
Tma	2	11,80	-9,80	2,76	-2,09	1,15
Stropní os.	2	11,00	-9,40	3,52	-4,53	1,28
LED os.	2	11,10	-3,10	7,37	-138,252	0,36
Tma	4	11,20	-8,80	3,32	-2,12	2,22
Stropní os.	4	8,00	-9,30	3,81	-3,65	2,67
LED os.	4	9,10	-9,30	9,58	-118,02	0,47
Tma	8	13,10	-9,40	7,42	-85,56	1,09
Stropní os.	8	13,00	-6,60	6,55	-1069,09	2,83
LED os.	8	12,80	-6,30	15,29	-1026,29	0,29

5.8 Srovnání 1. a 2. vzorku

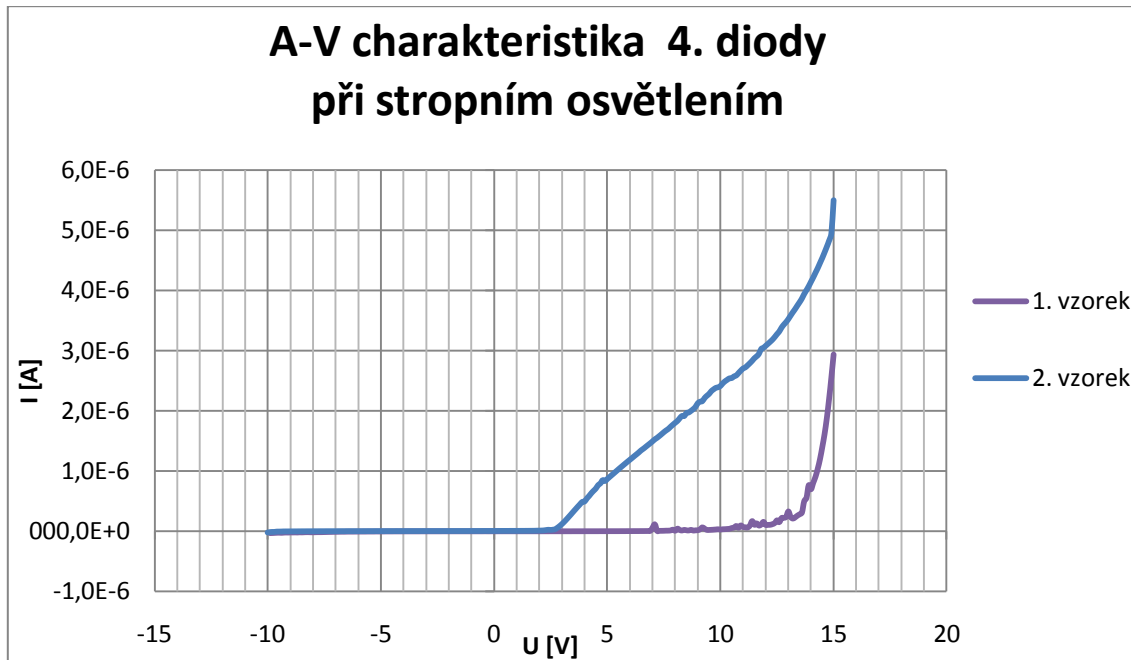
Při osvětlení vzorků vykazovaly diody obou vzorků zvýšení proudu s osvětlením. Každá z měřených diod reagovala na osvětlení jinou změnou velikosti proudu. První i druhý vzorek byly měřeny za tmy, s využitím stropního osvětlení a osvětlení prstencem LED diod. Jednotlivé výsledky měření jsou zobrazeny v grafech na Obr. 5.22, Obr. 5.23, Obr. 5.24. Pro porovnání byly vybrány diody označené č. 4, t.j. umístěná na obou vzorcích ve shodné poloze. Grafy jsou vytvořeny pro různé typy osvětlení.



Obr. 5.22: Srovnání přenosů nosičů náboje 4. diody při měření za tmy.

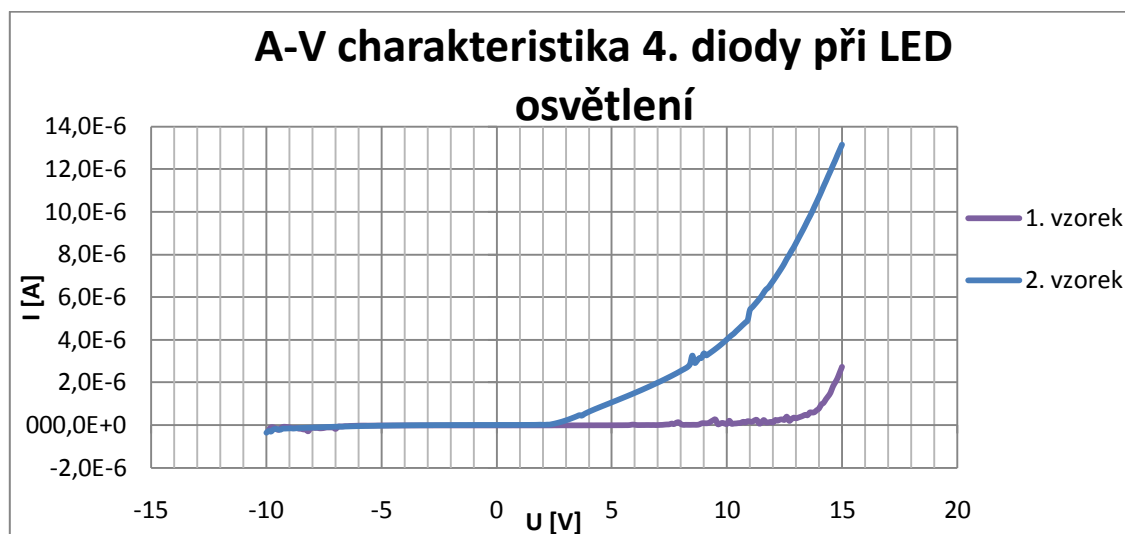
Z grafu 4. diody měřené bez osvětlení, znázorněném na Obr. 5.22, je zřejmé rozdílné prahové napětí prvního a druhého vzorku. U druhého vzorku došlo k nárůstu proudu již při nižším napětí, prahové napětí U_p se u vzorků liší $U_{p1.vzorek} = 14,00$ V, $U_{p2.vzorek} = 11,2$ V. Vyšší proud prochází tedy 2. vzorkem. Pro konkrétní 4. diodu při

měření v přímém směru prvního vzorku je to $I_{f1.vzorek} = 1,22 \mu A$ při $U_f = 14,5 V$ a při měření 4. diody druhého vzorku je proud $I_{f2.vzorek} = 3,32 \mu A$ při $U_f = 13,5 V$. V závěrném směru prochází proud o velikosti ($I_{b1.vzorek} = -16,33 nA$ a $I_{b2.vzorek} = -2,12 nA$ při $U_z = -8V$)



Obr. 5.23: Srovnání přenosů nosičů náboje pro 4. diodu při stropním osvětlení.

Na Obr. 5.23 jsou patrné pouze malé změny oproti neosvětlenému stavu. Průběhy jsou obdobné jako při měření za tmy, u 2. vzorku došlo k potlačení proudových pulsů, u 1. vzorku se proudové pulsy vyskytují. U obou vzorků vlivem stropního osvětlení klesla při měření velikost prahového napětí (na $U_{p1.vzorek} = 13,9 V$ a $U_{p2.vzorek} = 8,00 V$ a zvýšil se proud, v přímém ($I_{f1.vzorek} = 1,62 \mu A$ a $I_{f2.vzorek} = 3,81 \mu A$) v závěrném směru proud poklesl ($I_{b1.vzorek} = -15,14 nA$ a $I_{b2.vzorek} = -3,65 nA$ při $U_z = -8V$)



Obr. 5.24: Srovnání přenosů nosičů náboje pro 4. diodu při LED osvětlení.

Na Obr. 5.24 je srovnání 2 vzorků při osvětlení LED. Při LED osvětlení klesá prahové napětí. ($U_{p1.vzorek} = 13,7 \text{ V}$ a $U_{p2.vzorek} = 9,10 \text{ V}$) proud v přímém směru vzrostl na hodnotu ($I_{f1.vzorek} = 1,8 \mu\text{A}$ a $I_{f2.vzorek} = 9,58 \mu\text{A}$ při $U_f = 14,5 \text{ V}$) v závěrném směru se zvýšil proud ($I_{b1.vzorek} = -119,9 \text{ nA}$ a $I_{b2.vzorek} = -0,12 \mu\text{A}$ při $U_z = -8 \text{ V}$).

6 ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo zabývat se problematikou organických materiálů s polovodivými vlastnostmi a součástek z nich sestrojených. Byla zpracována rešerše organických polovodičových součástek, jejich parametrů a možnosti uplatnění. Stručně jsou popsány i základní vlastnosti a výroba organických materiálů. Nejnovější výzkumné práce vztahující se k této problematice jsou málo zveřejňovány. Většina dostupných materiálů není úplná a dostupnost nových informací o výzkumech je pro srovnání dosti omezená. Předpokládaný další vývoj prací v oblasti organických materiálů se bude zřejmě zaměřovat na zvýšení vhodnosti struktur pro výrobu součástek, zvýšení pohyblivosti nosičů náboje a prodloužení doby života, která nedosahuje zatím uspokojivých hodnot.

V bakalářské práci byla provedena měření dvou organických polymerních struktur, získaných fakultou, na kterých bylo vytvořeno vždy 8 diod. Byly změřeny elektrické parametry těchto diod i tloušťky jednotlivých vrstev. Při měření tloušťky vrstev byly zjištěny poměrně velké nerovnosti povrchů, způsobené zřejmě technologií. Vliv těchto nerovností na elektrické vlastnosti diod nebyl prokázán. Tloušťky vrstev dosahovaly velikostí 100 nm.

Při měření elektrických veličin byla provedena 3 měření s odlišnými zdroji světla (za tmy, při stropním osvětlení, při LED osvětlení). První struktura ITO / PEDOT / Alq3 / Al se vyznačuje vyšším prahovým napětím, strmým nárůstem proudu, malými proudy v závěrném směru (řádově nA) a velkým výskytem proudových pulsů v přímém i závěrném směru. Vlivem osvětlení se zvyšuje proud v přímém směru a snižuje hodnota prahového napětí. Nejvíce reagovaly diody při LED osvětlení. Změřený proud při LED osvětlení byl až o 50% větší, než při měření za tmy. Jednotlivé parametry diod se od sebe výrazně lišily. Vznik rozdílů je přisuzován vlivu struktury organického materiálu a technologie. Druhý typ diod tvořený vrstvami ITO / PEDOT / MDMO-PPV / Alq3 / Al se vyznačuje nižším prahovým napětím oproti diodám na prvním vzorku, určitým nárůstem proudu i při nižších napětích, celkově většími proudy v přímém směru a menším výskytem proudových pulsů. Přidáním dalšího polymeru (MDMO-PPV) do struktury došlo ke zvýšení procházejícího i částečnému stabilizování elektrických vlastností struktury. Oproti 1. vzorku nebyly rozdíly mezi parametry jednotlivých diod na 2. vzorku výrazné. K otevírání diod docházelo již při nízkých hodnotách napětí. Vzorek č. 2 reagoval na nejvíce na osvětlení LED. Nárůst proudu 2. vzorku při osvětlení LED byl až o 60% větší, než velikosti proudu za tmy. Změřené proudy pro diody druhého vzorku byly při osvětlení poměrně vysoké (až μA). Při ostatních měřeních, dosahovaly velikosti proudů v závěrném směru hodnot řádově nA. Příčina proudových pulsů, jež měření provázela, nebyla zjištěna. Z průběhů A-V charakteristik je zřejmé, že osvětlení nemá zřejmý vliv na vznik těchto proudových pulsů. Výsledkem práce je stanovení elektrických parametrů diod vyrobených z organických materiálů a chování těchto diod při různých typech osvětlení. Polymer MDMO-PPV se ukázal jako celkem vyhovující materiál pro další zkoumání. Při měření všech diod nedocházelo k emisi světla.

LITERATURA

- [1] Organic semiconductor world [online]. 2010 [cit. 2011-05-31]. What are organic semiconductors. Dostupné z WW: www.iapp.de/orgworld/?Basics:What_are_organic_semi_conductors
- [2] KRAJČOVIČ, J. Studium thiofenových oligo-kopolymerů: syntéza a optoelektronické. [ed.] CSc prof. RNDr. Zdeněk Friedl. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2010, s. 126
- [3] Organic semiconductor. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 26 říjen 2004 , last modified on 11. prosince [cit. 2011-05-31]. Dostupné z WWW: http://en.wikipedia.org/wiki/Organic_semiconductor.
- [4] FREUDENRICH, PH.D, Craig. *HowStuffWorks "How OLEDs Work"* [online]. ©1998-2011 [cit. 2011-01-03]. Dostupné z WWW: <http://electronics.howstuffworks.com/oled.htm>.
- [5] *Oled.at* [online]. 2006 [cit. 2011-01-03]. OLED Cesky . Dostupné z WWW: <http://www.oled.at/oledcesky.htm>.
- [6] TUCKERMAN, Mark E. *Nyu.edu* [online]. 2010 [cit. 2010-11-14]. Singlet vs. Triplet Spin States. Dostupné z WWW: http://www.nyu.edu/classes/tuckerman/honors.chem/lectures/lecture_19/node4.html.
- [7] OVESNÝ, K. *Studium optoelektrických a elektrooptických vlastností organických polovodičů – bakalářská práce*. Brno, 2009. 47 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jaroslav Boušek, CSc. FEKT VUT v Brně
- [8] TEBICH, I. *Organické polovodiče*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 45 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jaroslav Boušek, CSc.
- [9] Fotovoltaika *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 22 Srpen 2005, last modified on 12 Prosinec 2010 [cit. 2011-05-31]. Dostupné z WWW: http://cs.wikipedia.org/wiki/Fotovoltaick%C3%BD_%C4%8Dl%C3%A1nek.
- [10] Janssen, R.: Introduction to polymer solar cells, Dostupné z WWW: <http://user.chem.tue.nl/janssen/SolarCells/Polymer%20solar%20cells.pdf>
- [11] Polymerové solární články - nový směr vývoje [cit. 2011-05-31]. Dostupné z WWW: <http://automatizace.hw.cz/polymerove-plastove-solarni-clanky-novy-smer-vyvoje>
- [12] Solar & Alternative Energy [online]. 2010 [cit. 2011-05-31]. New material for high-performance solar cells. Dostupné z WWW: www.iapp.de/orgworld/?Basics:What_are_organic_semiconductors
- [13] Kelley TW, Muys DV, Baude PF, Smith TP, Jones TD. 2003. High performance organic thin film transistors, in *Organic and Polymeric Materials and Devices*, edited by P.W.M. Blom, N.C. Greenham, C.D. Dimitrakopoulos, and C.D. Frisbie. (*Mater. Res. Soc. Symp. Proc.* 771, Warrendale, PA), L6.5.1

- [14] Organic Field-Effect Transistors (OFET) [online]. 2010 [cit. 2011-05-31]. Illustration of a working principle OFET. Dostupné z WWW: <http://www.ipc.uni-linz.ac.at/os/Organic-Field-effect-transistors-intro.pdf>
- [15] UNIPOLÁRNÍ TRANZISTORY [online]. 2003 [cit. 2010-11-14]. HellWEB - Elektronika. Dostupné z WWW: <http://hellweb.loose.cz/index.php?page=school&subpage=elt&id=14> .
- [16] Organic field-effect transistor. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 13 březen 2005, last modified on 14 prosinec 2010 [cit. 2010-11-14]. Dostupné z WWW: http://en.wikipedia.org/wiki/Organic_field-effect_transistor.
- [17] *Mikro.cz/leica* [online]. c2010 [cit. 2011-05-31]. Stereomikroskop Leica S8 APO. Dostupné z WWW: <http://www.mikro.cz/leica/stereomikroskopy-laboratorni/stereomikroskop-leica-s8-apo>.
- [18] *Cmicro.com* [online]. c2011 [cit. 2011-05-31]. M150 Measurement Platform. Dostupné z WWW: <http://www.cmicro.com/m150>.
- [19] *Keithley.com* [online]. c2011 [cit. 2011-05-31]. 4200-SCS Semiconductor Parameter Analyzer Dostupné z WWW: http://www.keithley.com/products/semiconductor/parametric_analyzer/4200scs/?mn=4200-SCS.
- [20] Doc. RNDr. Drahošlav Vajda, CSc., Doc. Ing. Július Štelina, CSc., RNDr. Jaroslav Kovár, Ing. Ctibor Musil, CSc., RNDr. Ivan Bellan, Doc. Ing. Igor Jamnický, CSc. „*Návody k laboratorným cvičeniam z fyziky*“, Žilina: EDIS, 2003. 53 s.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

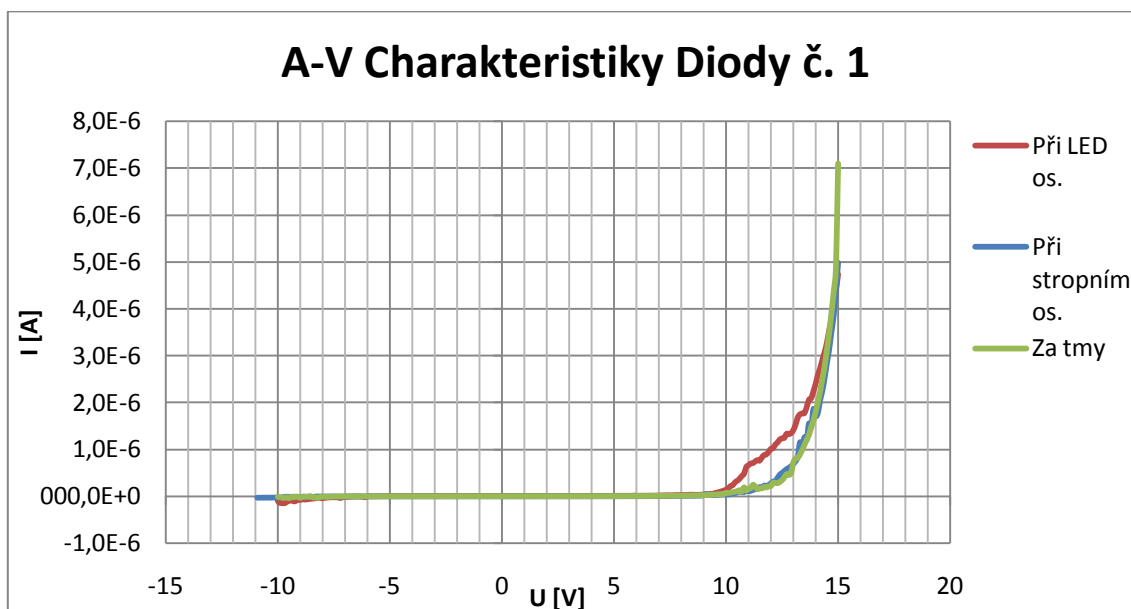
HOMO	nejvýše obsazený molekulový orbital
LUMO	nejníže neobsazený molekulový orbital
OFET	organický polem řízený tranzistor
OLED	organická luminiscenční dioda
OLET	organický světlo emitující tranzistor
OPVC	organický fotovoltaiický článek
TFT	tenkovrstvý tranzistor
VTE	vakuové tepelné vypařování, nebo napařování
OVPD	nanášení organik v plynné fázi
PDA	osobní digitální pomocník
PMOLED	displeje s pasivní maticí
AMOLED	displeje s aktivní maticí
TOLED	transparentní dioda
PHOLED	fosforeskující dioda
FOLED	flexibilní dioda
WOLED	bílé dioda
DSSC	solární články na bázi organických barviv
CMYK	barevný model založený na subtraktivním míchání barev
RGB	barevný model červená-zelená-modrá
ITO	směs oxidu india a cínu
PT	polythiophen
CP	konjugovaný polymer
MOSFET	polem řízený tranzistor struktura (kov-oxid-polovodič)
MISFET	polem řízený tranzistor struktura (kov-izolant-polovodič)
IGFET	polem řízený tranzistor struktura (izolovaný gate)
LED	luminiscenční dioda
PET	polyethylentereftalát
os	osvětlení

SEZNAM PŘÍLOH

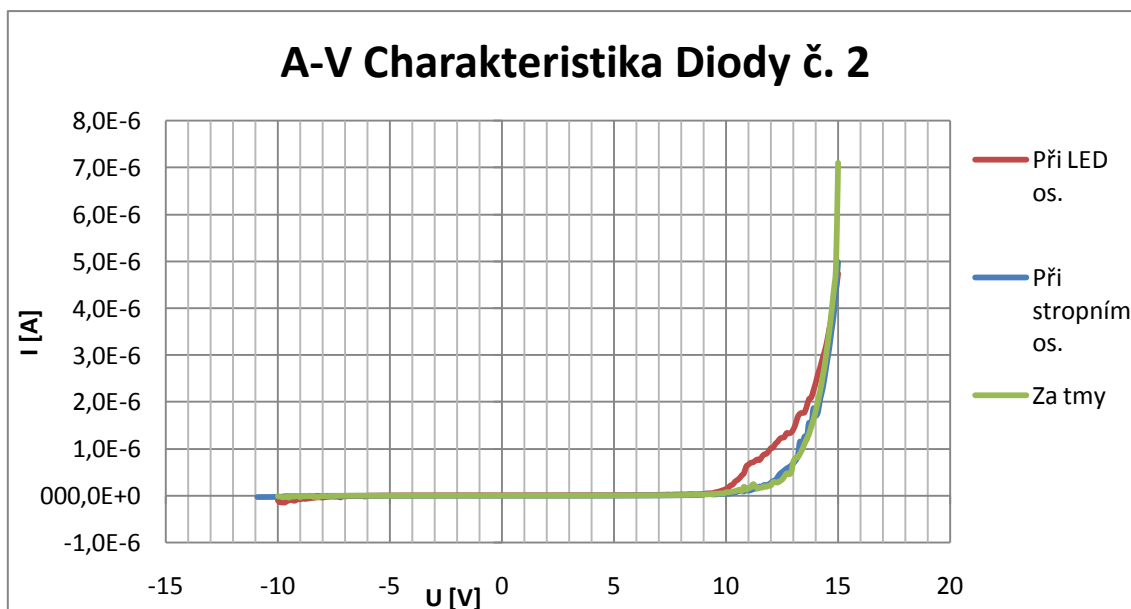
A	A-V charakteristiky vzorků	46
A.1	A-V Charakteristika diod [1. vzorek].....	46
A.2	A-V Charakteristika diod [2. vzorek].....	49
A.3	A-V Charakteristiky diod, závěrný směr[1. vzorek].....	52
A.4	A-V Charakteristiky diod, závěrný směr [2. vzorek]	55

A A-V CHARAKTERISTIKY VZORKŮ

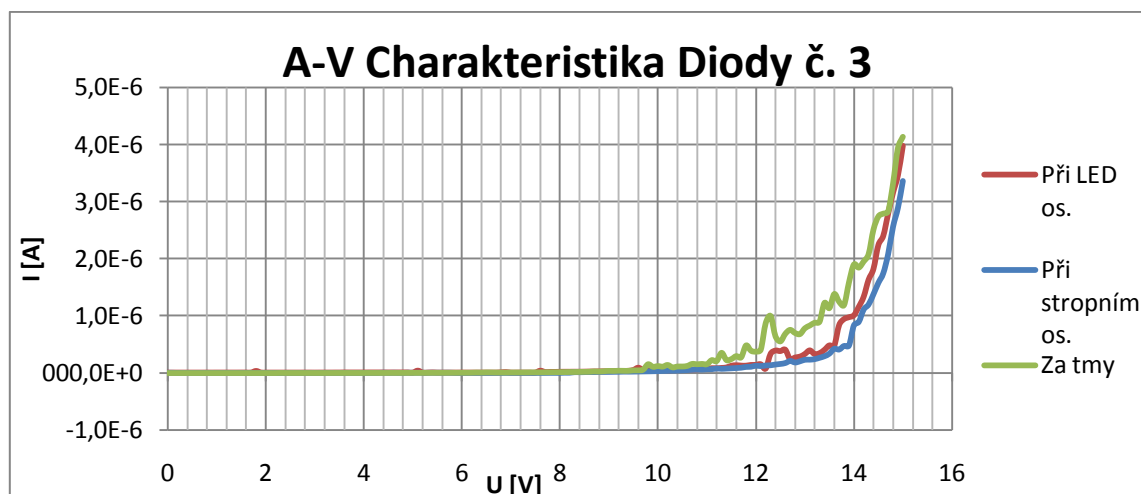
A.1 A-V Charakteristika diod [1. vzorek]



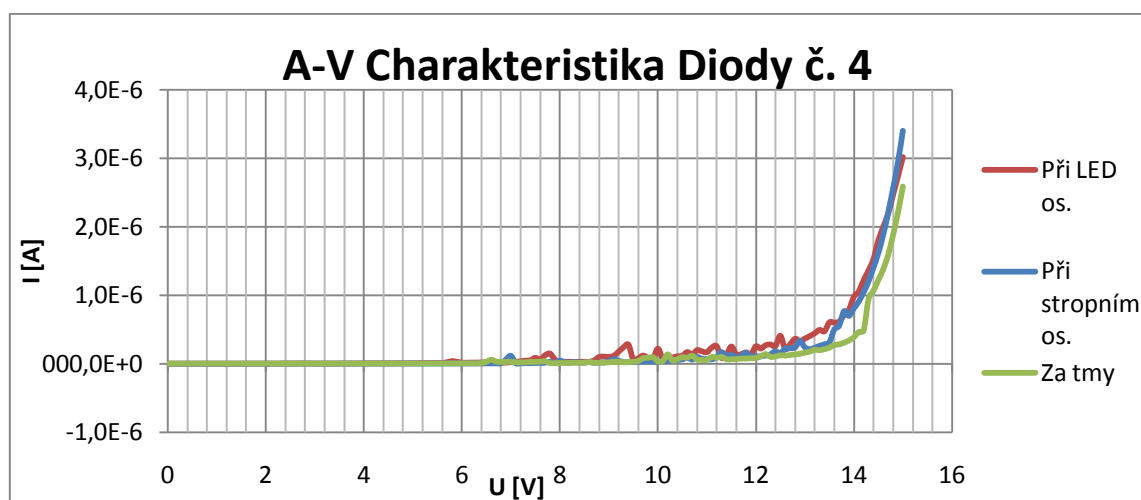
Obr. 6.1: A-V charakteristiky Diody č. 1 při LED os., při stropním os., za tmy.



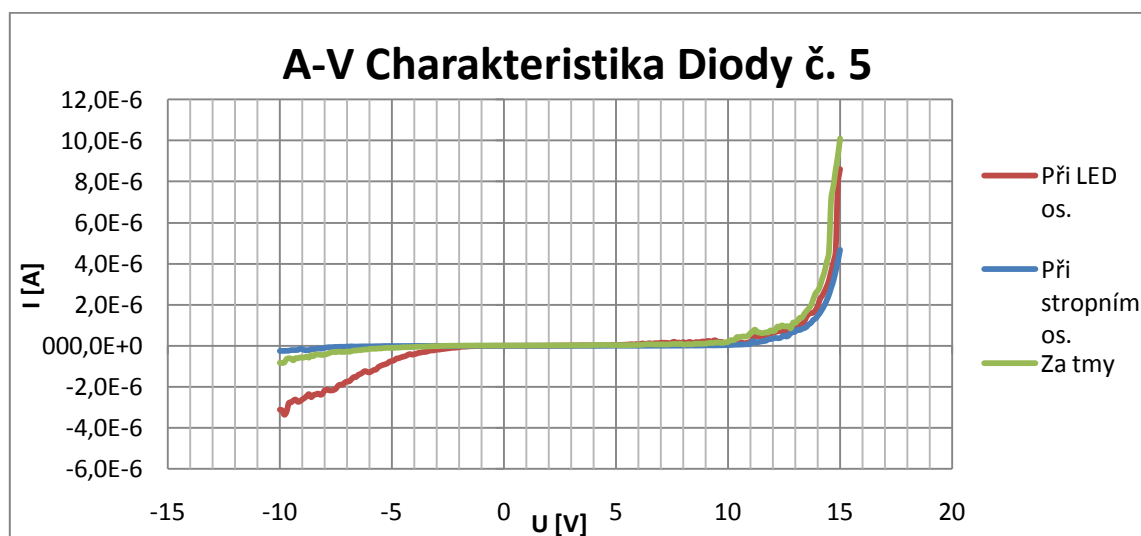
Obr. 6.2: A-V charakteristiky Diody č. 2 při LED os., při stropním os., z tmy.



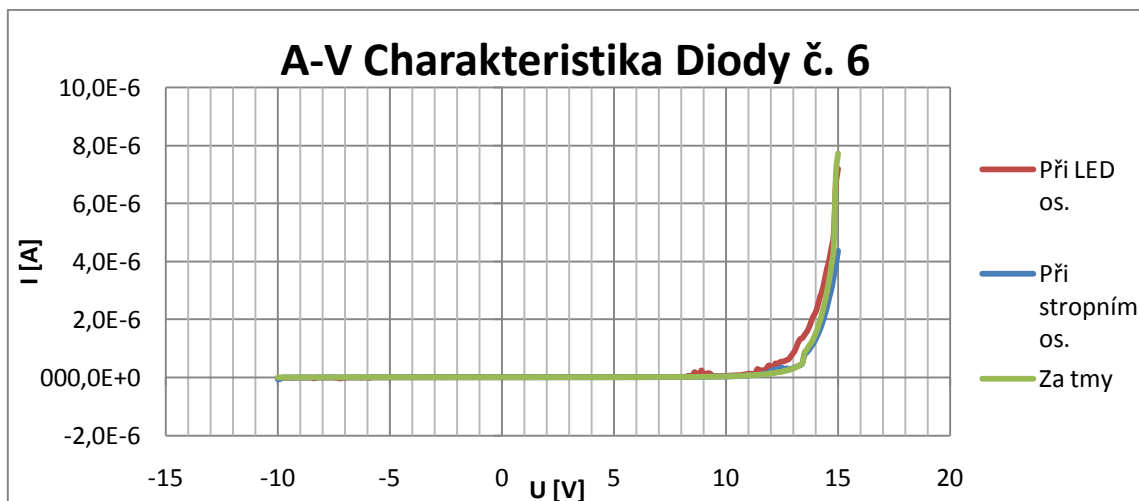
Obr. 6.3: A-V charakteristiky Diody č. 3 při LED os., při stropním os., za tmy.



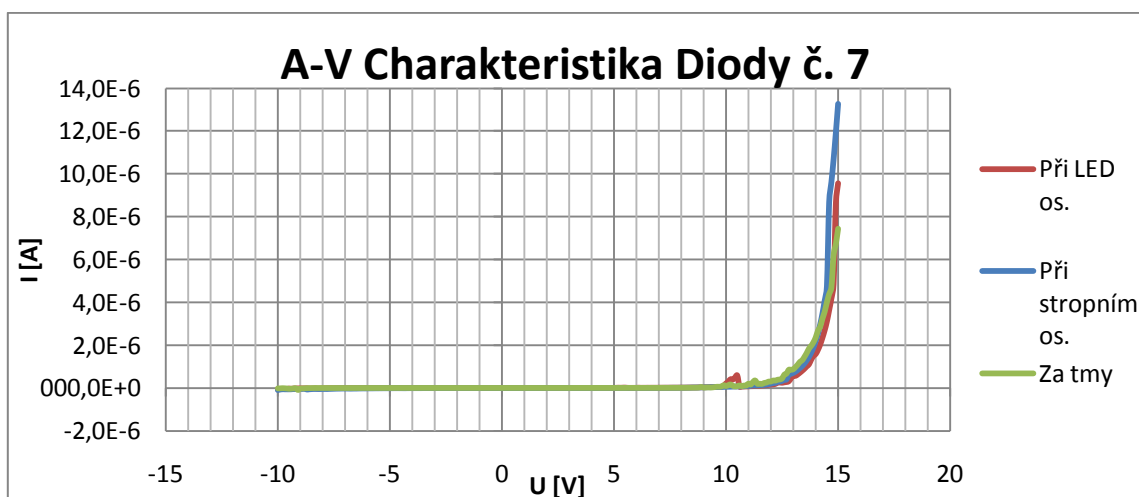
Obr. 6.4: A-V charakteristiky Diody č. 4 při LED os., při stropním os., za tmy.



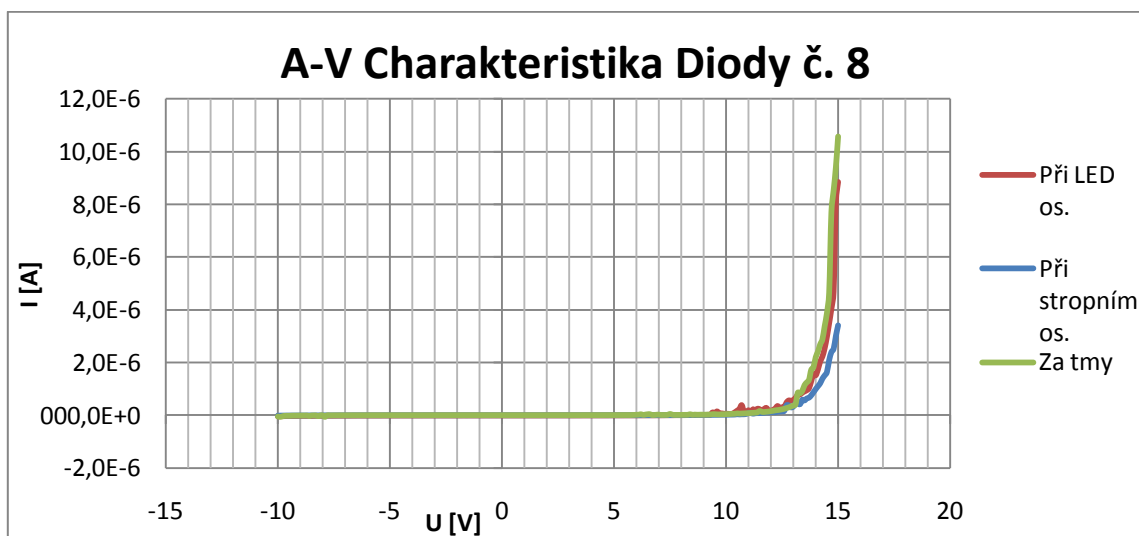
Obr. 6.5: A-V charakteristiky Diody č. 5 při LED os., při stropním os., za tmy.



Obr. 6.6: A-V charakteristiky Diody č. 6 při LED os., při stropním os., za tmy.

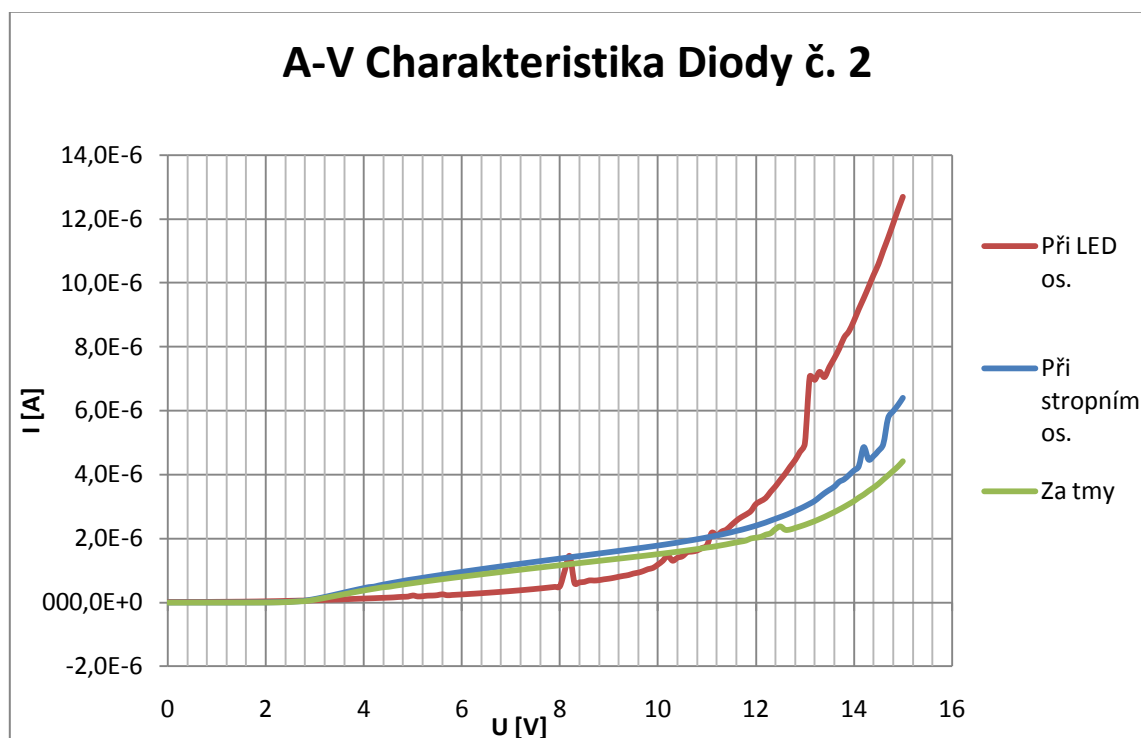


Obr. 6.7: A-V charakteristiky Diody č. 7 při LED os., při stropním os., za tmy.

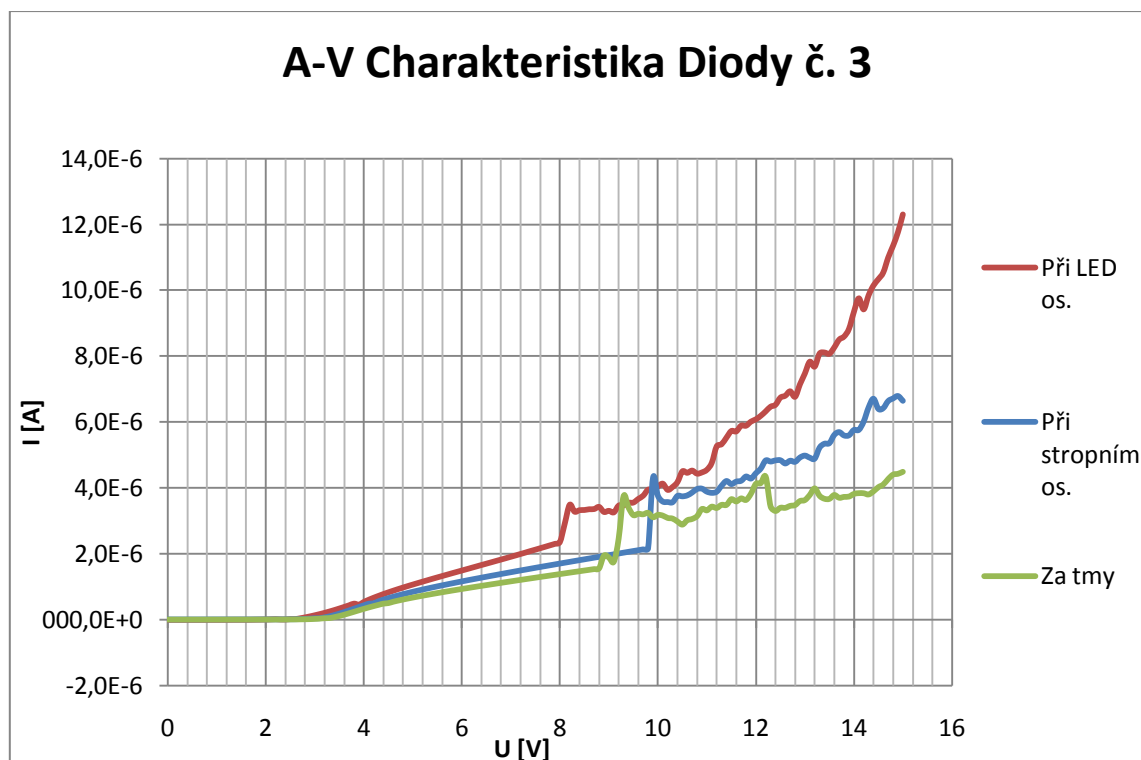


Obr. 6.8: A-V charakteristiky Diody č. 8 při LED os., při stropním os., za tmy.

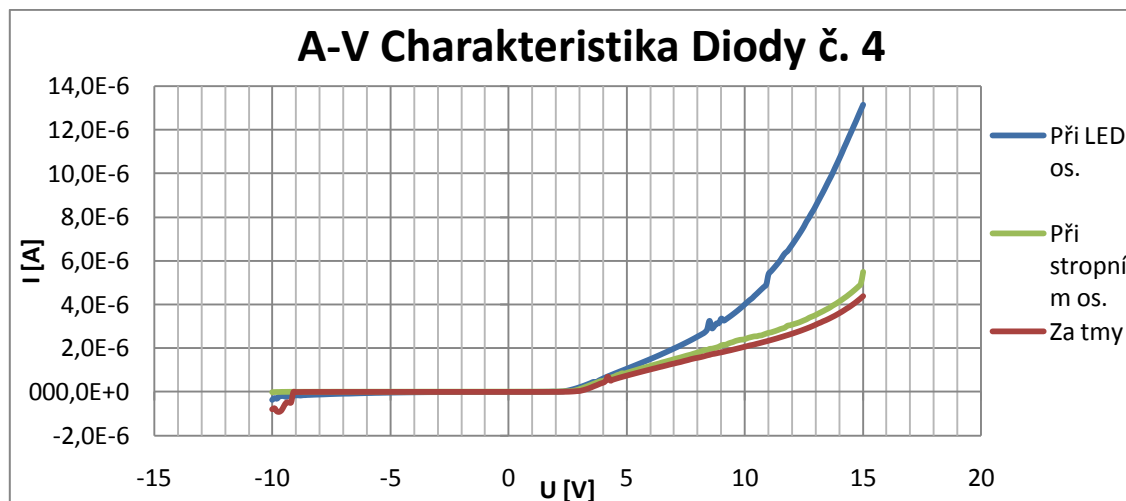
A.2 A-V Charakteristika diod [2. vzorek]



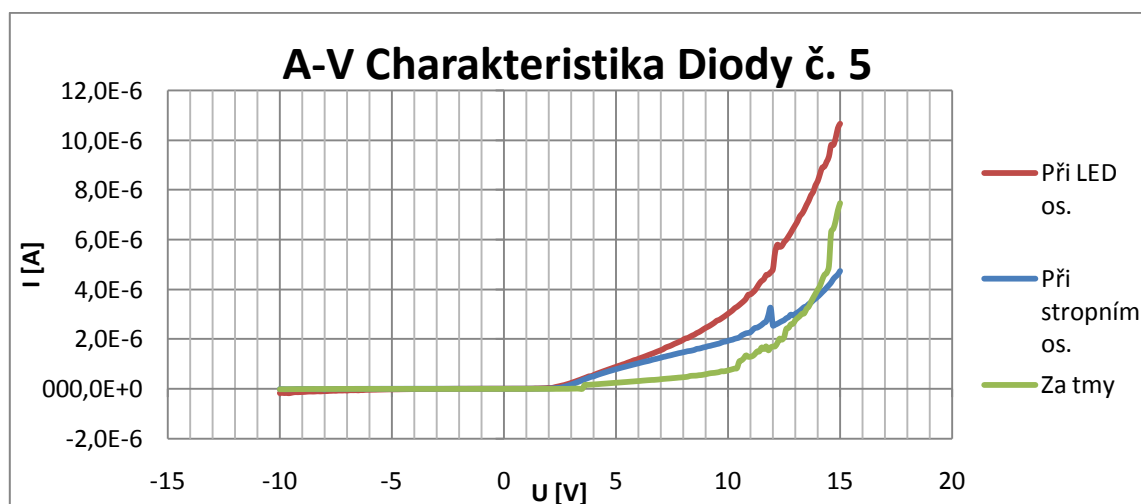
Obr. 6.9: A-V charakteristiky Diody č. 2 při LED os., při stropním os., za tmy.



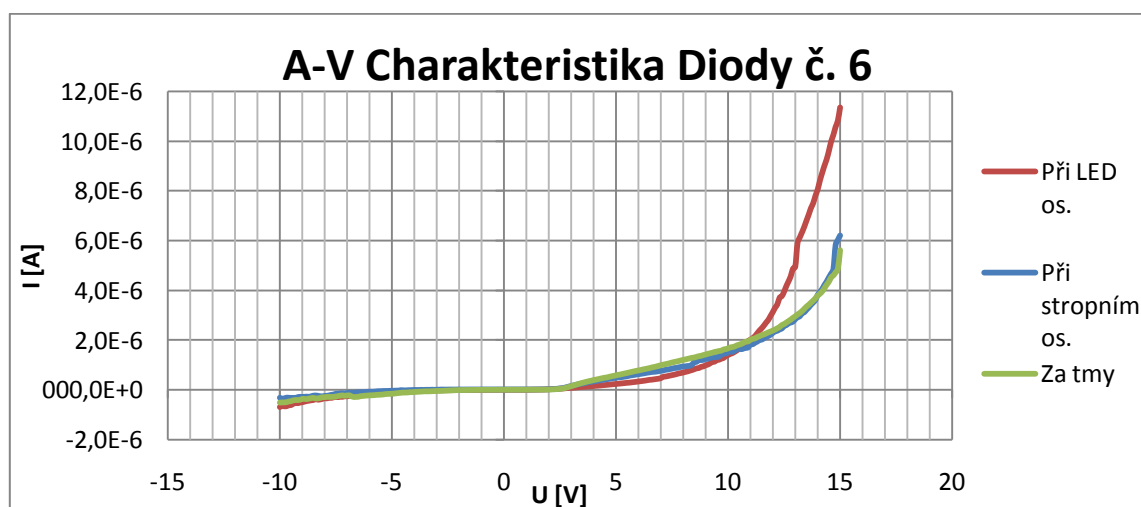
Obr. 6.10: A-V charakteristiky Diody č. 3 při LED os., při stropním os., za tmy.



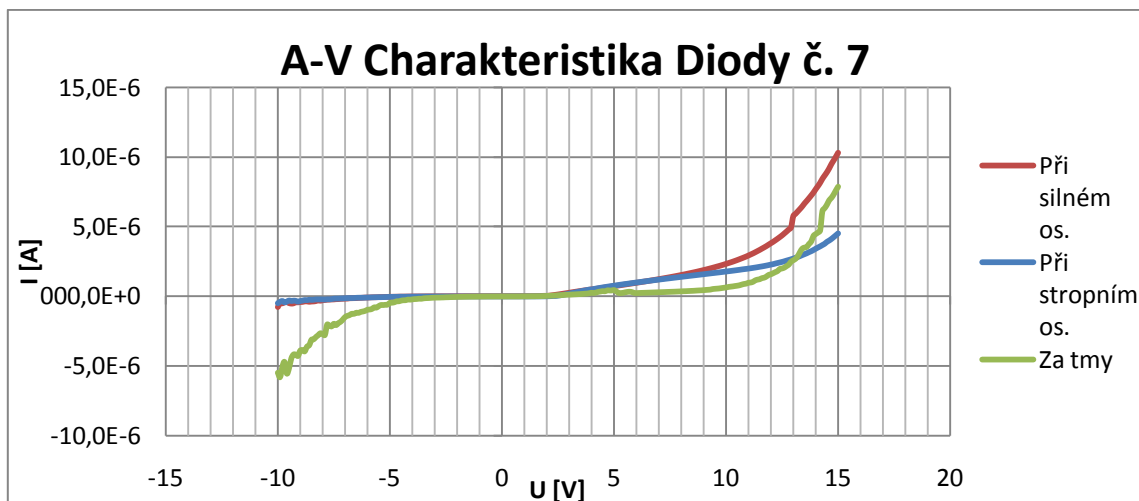
Obr. 6.11: A-V charakteristiky Diody č. 4 při LED os., při stropním os., za tmy.



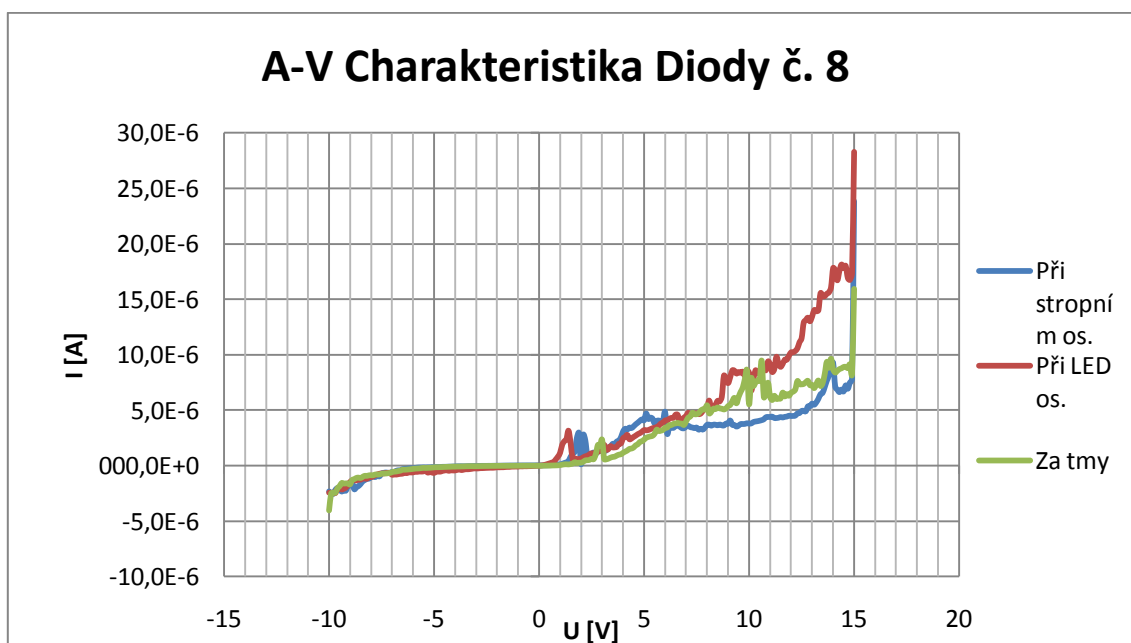
Obr. 6.12: A-V charakteristiky Diody č. 5 při LED os., při stropním os., za tmy.



Obr. 6.13: A-V charakteristiky Diody č. 6 při LED os., při stropním os., za tmy.

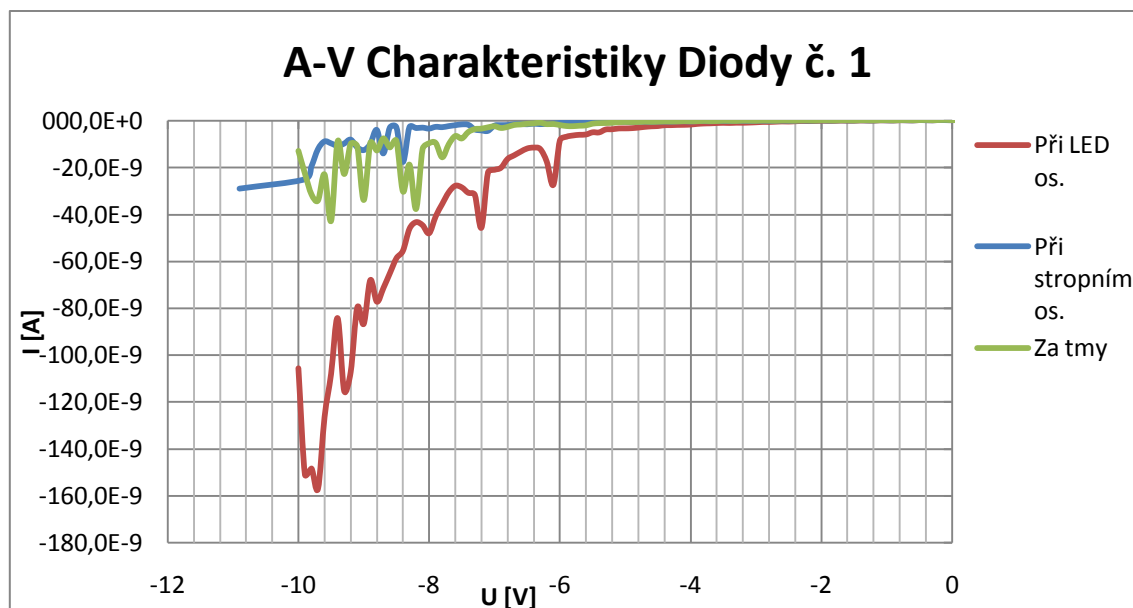


Obr. 6.14: A-V charakteristiky Diody č. 7 při LED os., při stropním os., za tmy.

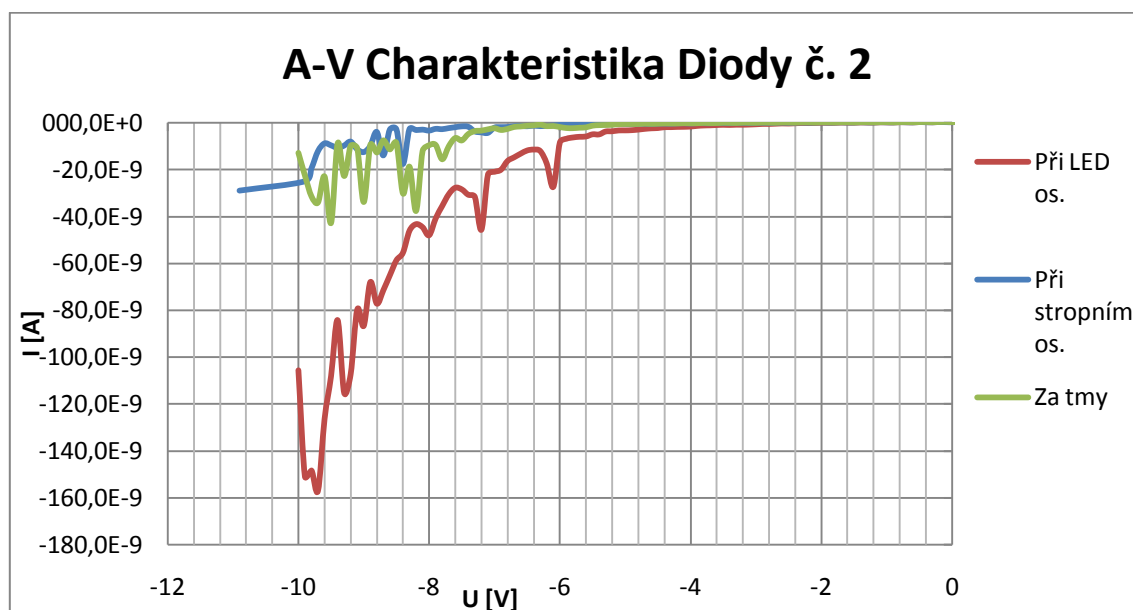


Obr. 6.15: A-V charakteristiky Diody č. 8 při LED os., při stropním os., za tmy.

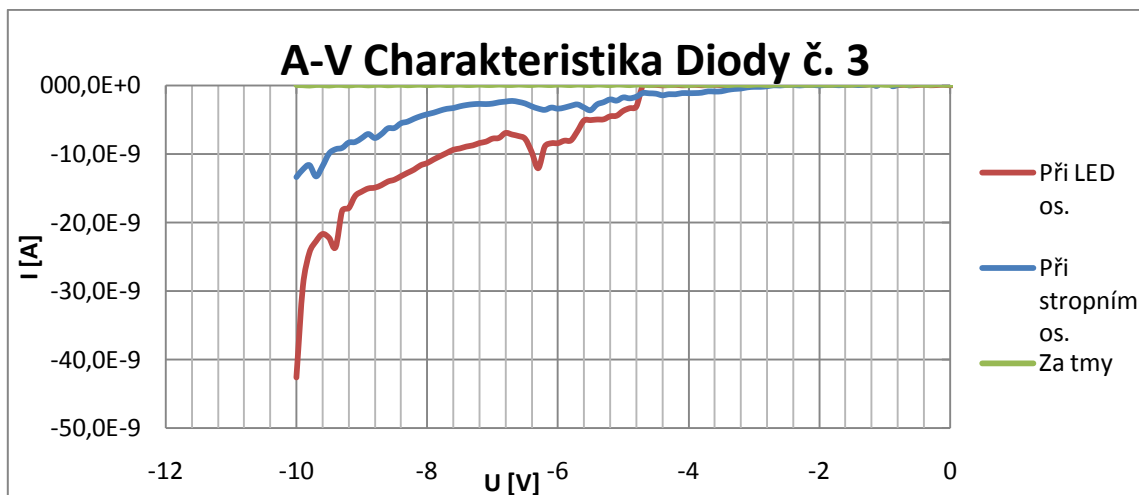
A.3 A-V Charakteristiky diod, závěrný směr[1. vzorek]



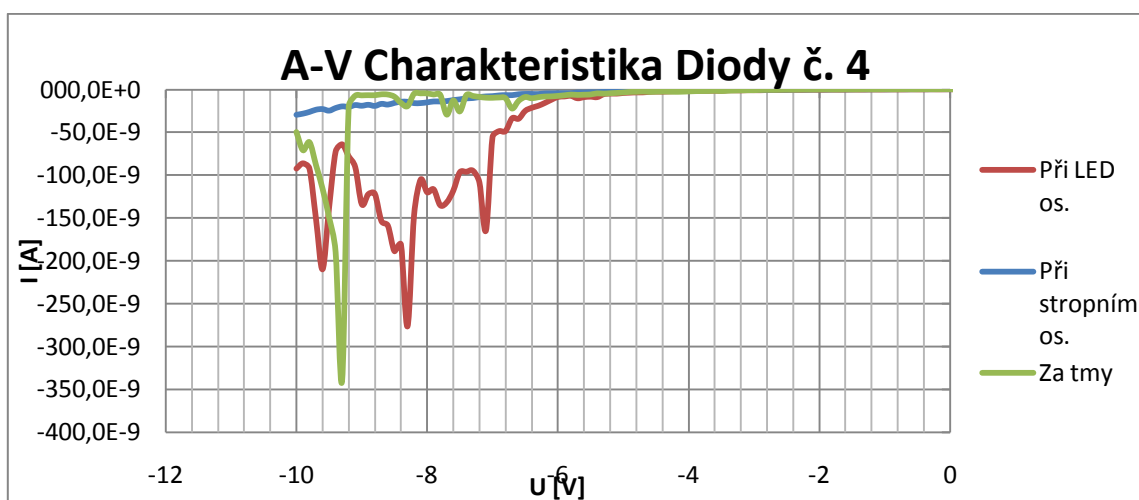
Obr. 6.16: A-V charakteristiky Diody č. 1 závěrný směr, při LED os., při stropním os., za tmy.



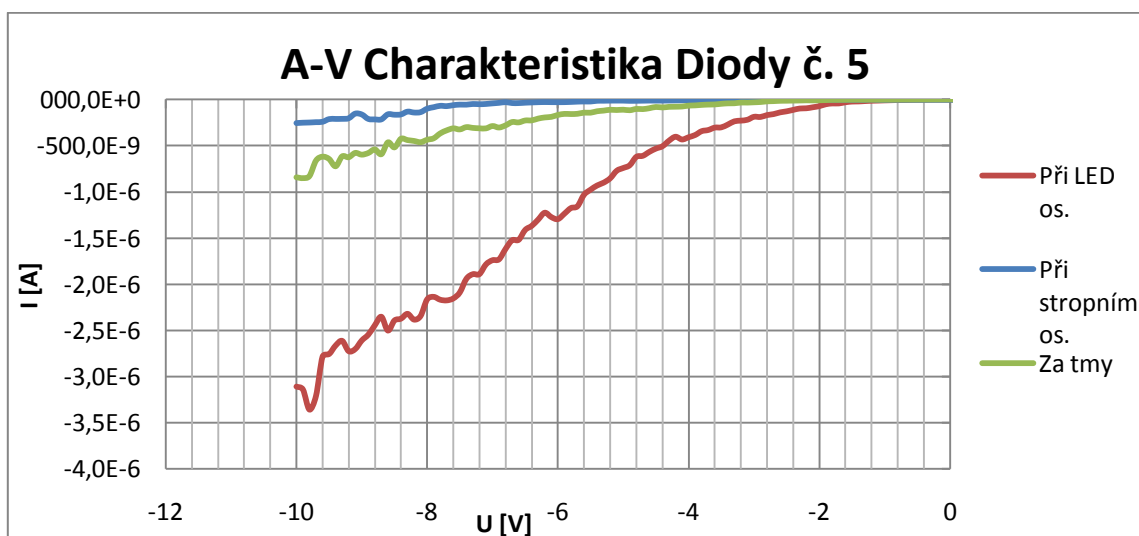
Obr. 6.17: A-V charakteristiky Diody č. 2 závěrný směr, při LED os., při stropním os., z tmy.



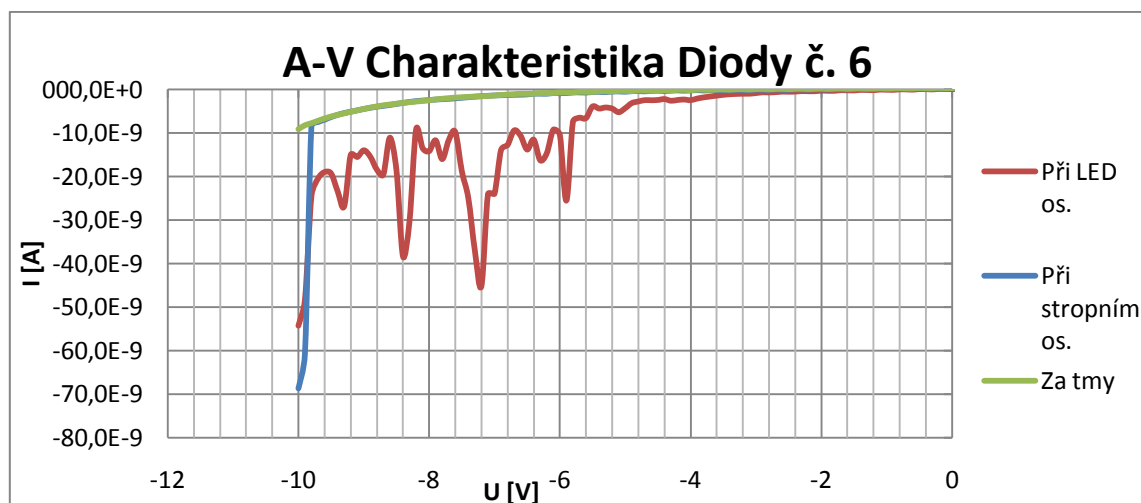
Obr. 6.18: A-V charakteristiky Diody č. 3 závěrný směr, při LED os., při stropním os., za tmy.



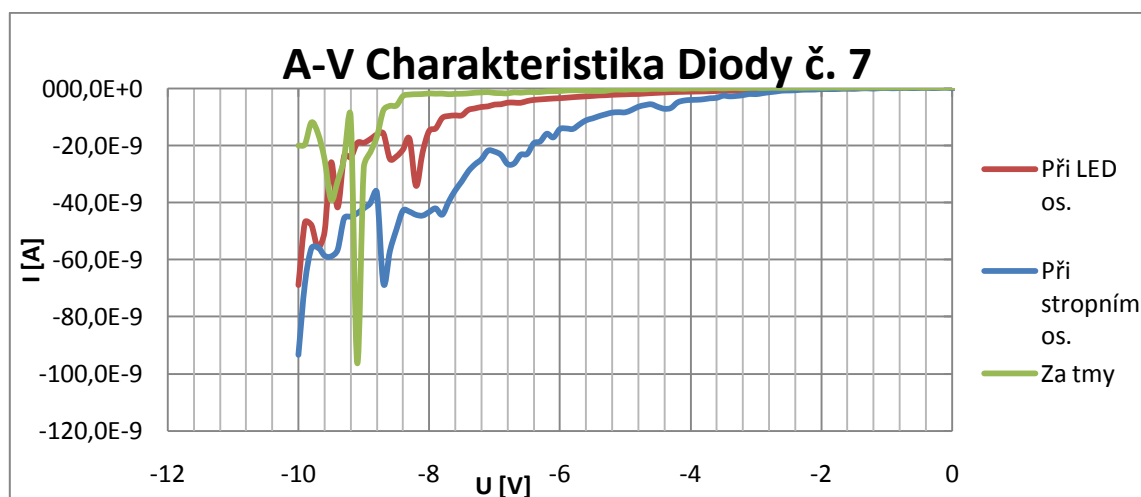
Obr. 6.19: A-V charakteristiky Diody č. 4 závěrný směr, při LED os., při stropním os., za tmy.



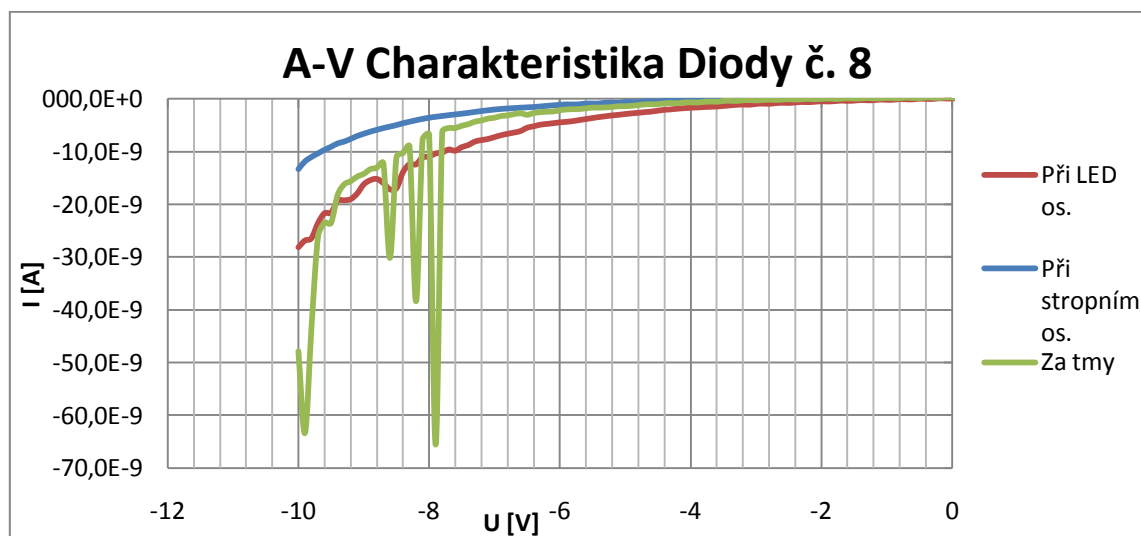
Obr. 6.20: A-V charakteristiky Diody č. 5 závěrný směr, při LED os., při stropním os., za tmy.



Obr. 6.21: A-V charakteristiky Diody č. 6 závěrný směr, při LED os., při stropním os., za tmy.

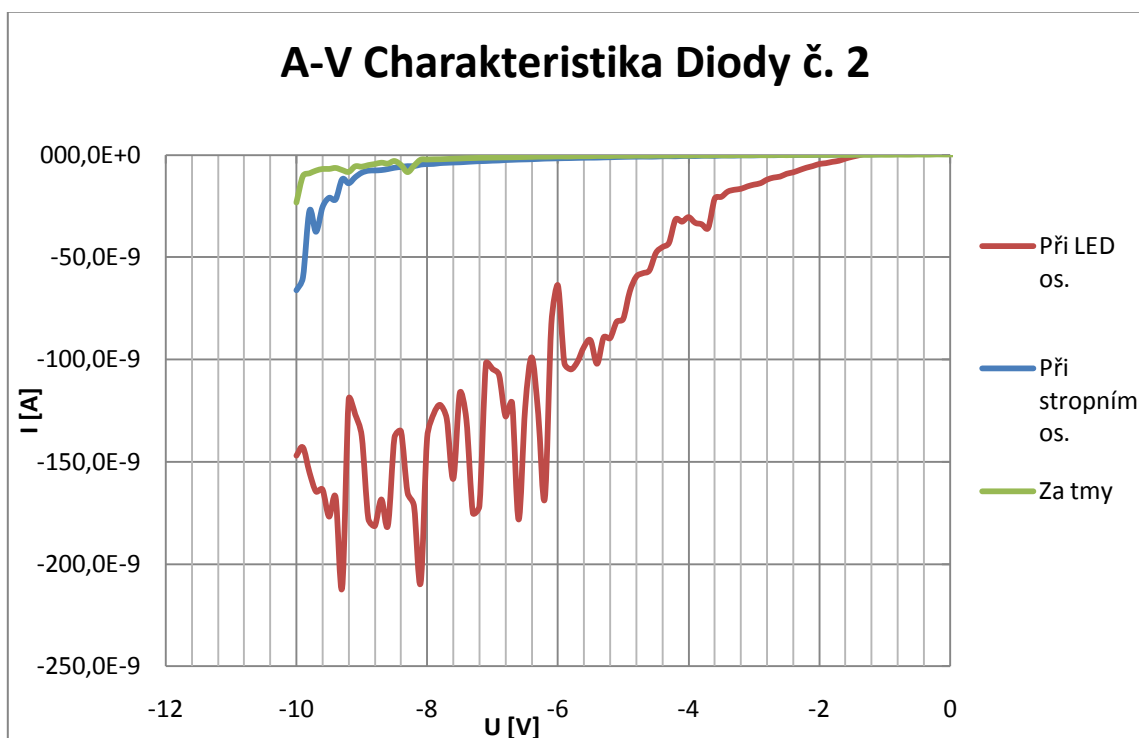


Obr. 6.22: A-V charakteristiky Diody č. 7 závěrný směr, při LED os., při stropním os., za tmy.

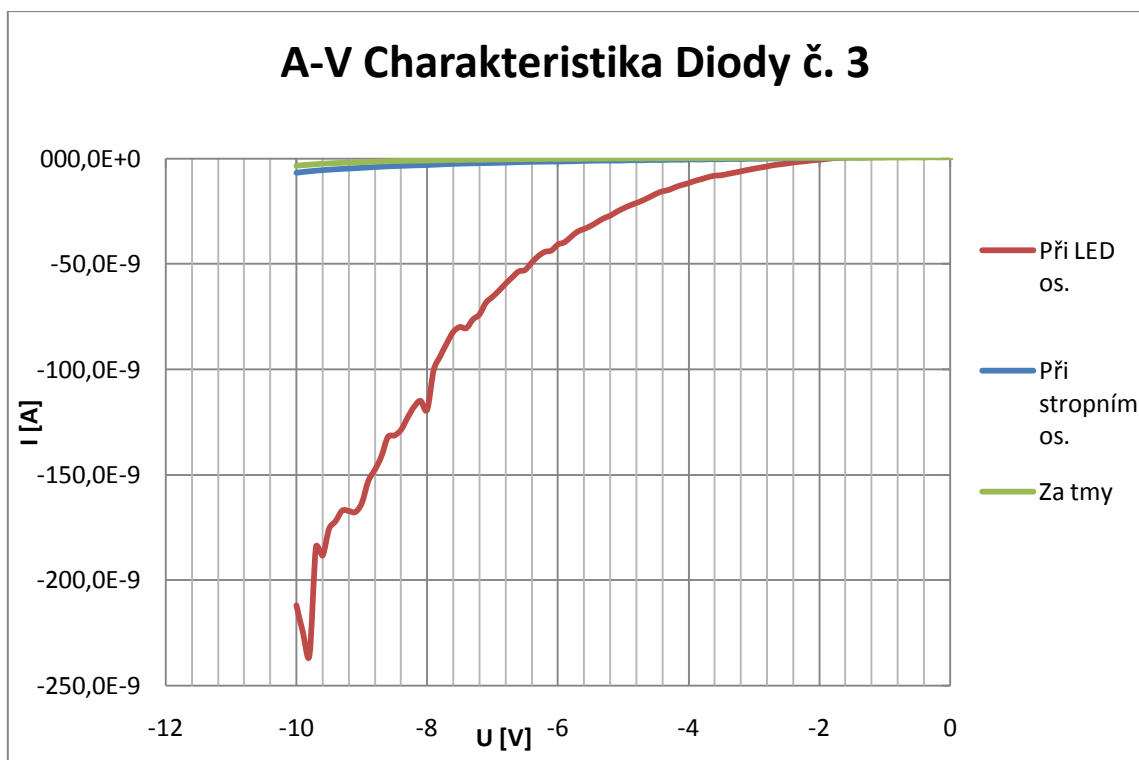


Obr. 6.23: A-V charakteristiky Diody č. 8 závěrný směr, při LED os., při stropním os., za tmy.

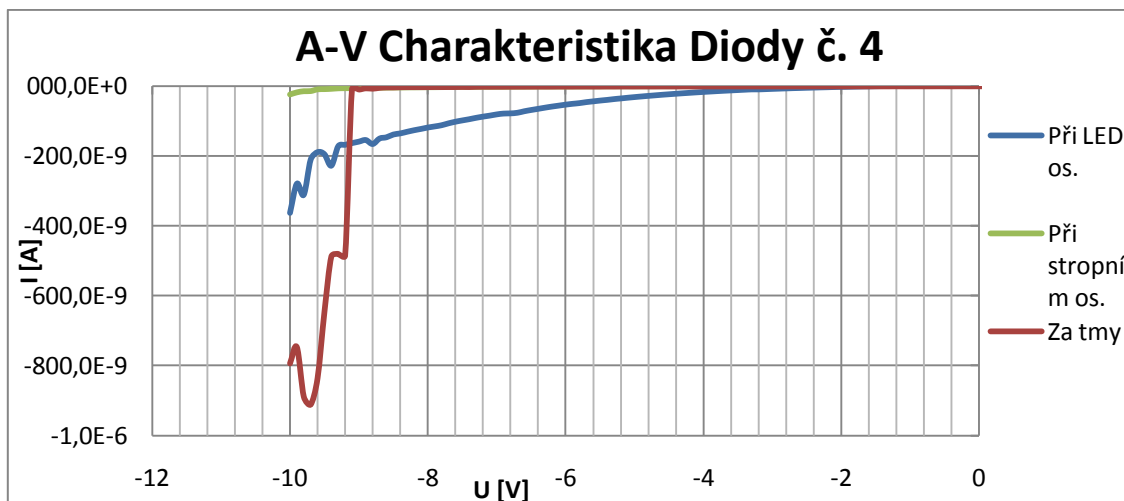
A.4 A-V Charakteristiky diod, závěrný směr [2. vzorek]



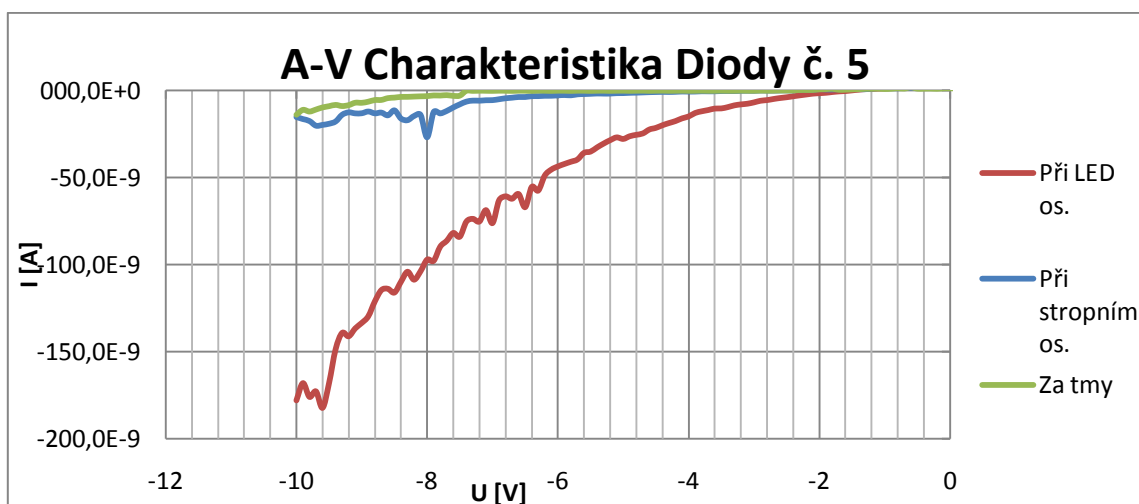
Obr. 6.24: A-V charakteristiky Diody č. 2 závěrný směr, při LED os., při stropním os., za tmy.



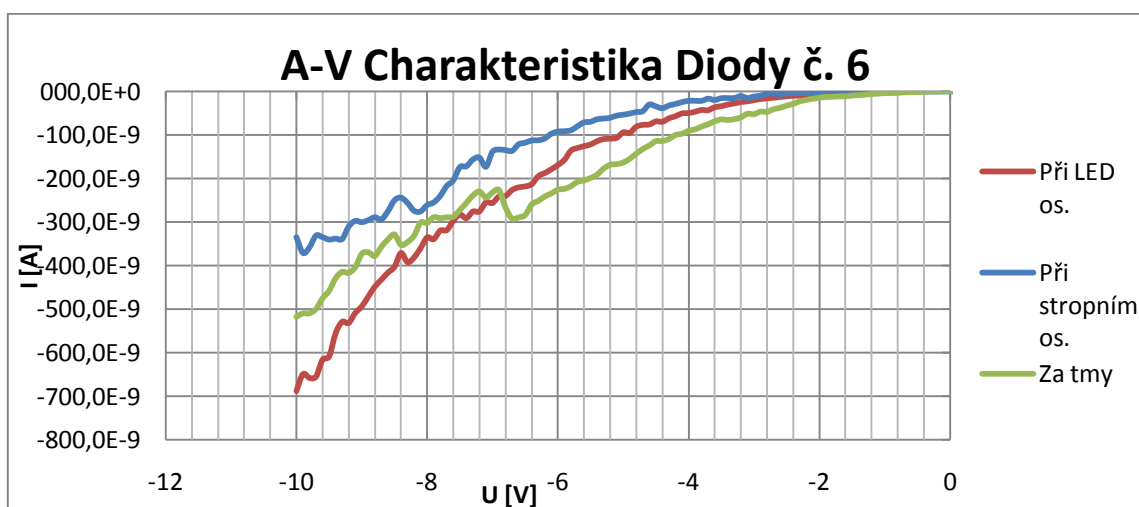
Obr. 6.25: A-V charakteristiky Diody č. 3 závěrný směr, při LED os., při stropním os., za tmy.



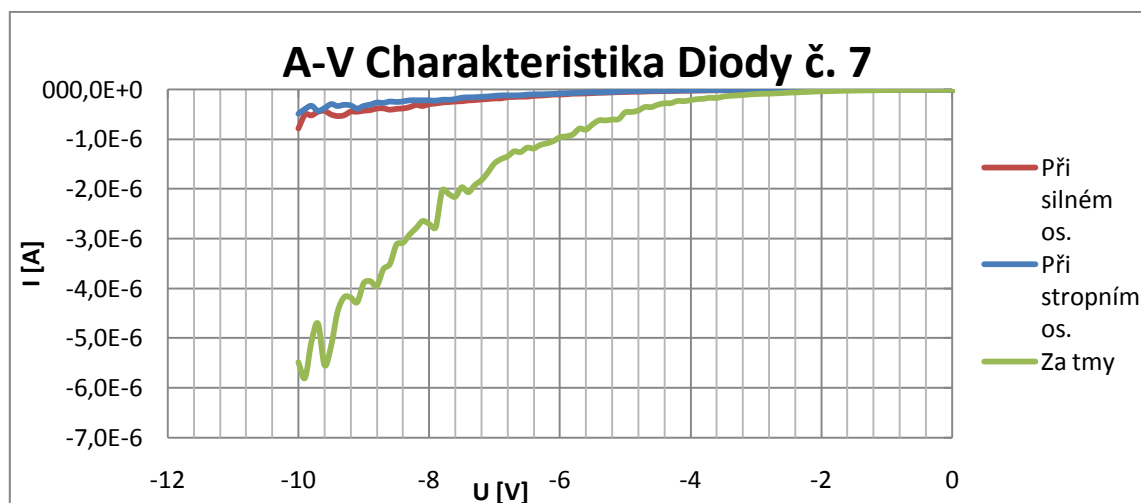
Obr. 6.26: A-V charakteristiky Diody č. 4 závěrný směr, při LED os., při stropním os., za tmy.



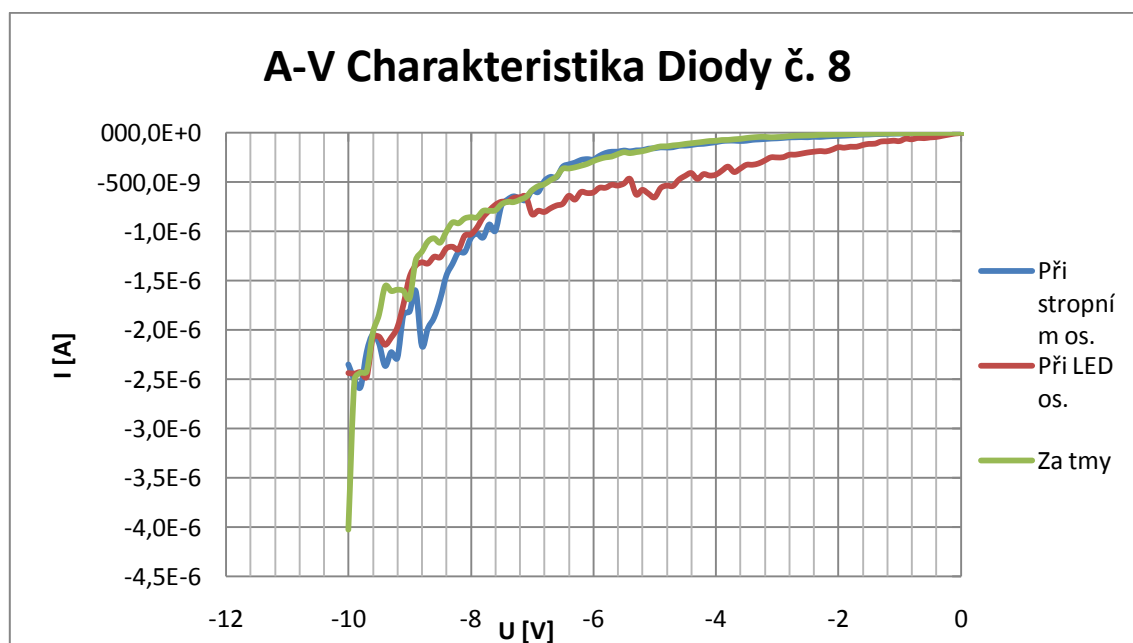
Obr. 6.27: A-V charakteristiky Diody č. 5 závěrný směr, při LED os., při stropním os., za tmy.



Obr. 6.28: A-V charakteristiky Diody č. 6 závěrný směr, při LED os., při stropním os., za tmy.



Obr. 6.29: A-V charakteristiky Diody č. 7 závěrný směr, při LED os., při stropním os., za tmy.



Obr. 6.30: A-V charakteristiky Diody č. 8 závěrný směr, při LED os., při stropním os., za tmy.