

UNIVERZITA PARDUBICE  
Fakulta elektrotechniky a informatiky

Využití LED jako senzorů  
Lukáš Volek

Bakalářská práce  
2010

Univerzita Pardubice  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Akademický rok: 2009/2010

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Lukáš VOLEK**  
Osobní číslo: **I07488**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Komunikační a mikroprocesorová technika**  
Název tématu: **Využití LED jako senzorů**  
Zadávací katedra: **Katedra elektrotechniky**

### Zásady pro vypracování:

Cílem práce je ověření možnosti použití LED jako světelných čidel a snímačů barev. Práce bude obsahovat popis principu činnosti LED jako zdroje světla vs. popis činnosti LED jako čidla citlivého na světlo a popis možností využití. Součástí práce je ověření spektrální citlivosti vybraného souboru LED a jeho porovnání s diodami prodávanými jako fotocitlivé případně s jinými senzory světla. Na závěr bude zkonstruováno jednoduché zařízení využívající LED jako senzoru.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

Master Book of senzore; Ripka P., Típek A.; nakladatelství BEN 2003;  
ISBN: 80-7300-129-2

Datasheety jednotlivých LED

B.A. Saleh a M.C. Teich: Základy fotoniky, svazek 3, Matfyzpress, Praha,  
1995

E. Majerníková: Fyzika pevných látek, UP, Olomouc, 1999

Vedoucí bakalářské práce:

**Ing. Pavel Rozsival**  
Katedra elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **15. ledna 2010**

Termín odevzdání bakalářské práce: **14. května 2010**

  
prof. Ing. Simeon Karamazov, Dr.  
děkan



  
Ing. Zdeněk Němec, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 31. března 2010

## **Prohlášení autora**

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.  
V Pardubicích dne 12. 5. 2010

Lukáš Volek

## **Poděkování**

Na tomto místě chci poděkovat vedoucímu práce Ing. Pavlu Rozsivalovi za odborné vedení mé práce, za potřebné rady a poskytnutí některých měřicích přístrojů, především spektrofotometru, na kterém byla provedena většina měření. Dále mé poděkování patří Mgr. Janu Mistríkovi, Ph.D za umožnění měření na přístroji VASE®Ellipsometer a za intenzivní pomoc při tomto měření. Děkuji také Ing. Karlu Horákovi, Ph.D za dlouhodobější zapůjčení spektrometru USB4000. Děkuji ing. Martinu Hájkovi za zapůjčení vývojové desky s procesorem ATmega32. Děkuji všem, kteří mi odpověděli při náročném shánění měřicích přístrojů. A nakonec, o to však srdečněji, velice děkuji svým rodičům a přítelkyni, kteří respektovali a trpělivě snášeli mé věčné zapojení do vytváření této práce, a kteří mne velmi podporovali.

## **Anotace**

Tato práce pojednává o možnostech využití svítivých diod jako senzorů světla. Záměrem je ověření předpokladů o spektrální citlivosti v závislosti na konstrukční svítivé barvě. Dále je uveden měřicí přístroj vyvinutý konkrétně pro účely těchto měření. Připojen je i popis a schéma zapojení měřicího přístroje. Jako důkaz využitelnosti LED pro snímání světla je předložen senzor čáry. Pro jeho funkci je využito svítivých diod ve funkci jak zářičů, tak i snímačů. Senzor je plně funkční a kompatibilní s logickými úrovněmi.

## **Klíčová slova**

LED, svítivá dioda, senzor, snímač, záření, vlnová délka, citlivost, UV, viditelné světlo, IR

## **Title**

Using LEDs as sensors

## **Annotation**

This thesis concerns about using of the LEDs as sensors. All the results of my measurements are published here. The measuring of the light emitting diodes as sensors is aimed at the spectral sensitivity in dependence on the structural colour of the LED. By me designed device, which was inevitable for most of the measurements and which was purposely developed for these ones, is closely defined here. The description and the scheme of the device are enclosed. The functional sensor of a line for robotics, where the LEDs are used for sensing, is submitted. The proposed sensor demonstrates and proves the real functionality of the LEDs as the light sensors depending on colour.

## **Keywords**

LED, light-emitting diode, sensor, emission, wavelength, sensitivity, UV, visible light, IR

## Obsah

<b>Seznam zkratk</b> .....	<b>8</b>
<b>Seznam obrázků</b> .....	<b>9</b>
<b>Seznam tabulek</b> .....	<b>9</b>
<b>Úvod</b> .....	<b>10</b>
1.1 Typy snímačů .....	11
1.2 Používání LED jako senzorů v současné praxi .....	16
<b>2 Princip funkce svítivé diody jako zdroje záření</b> .....	<b>17</b>
2.1 Uspořádání čipu .....	17
2.2 Materiály pro LED.....	20
2.3 Vlastnosti emitovaného záření .....	21
<b>3 Princip funkce svítivé diody jako snímače záření</b> .....	<b>22</b>
<b>4 Poloaautomatický měřicí systém „nA a mV meter“</b> .....	<b>24</b>
4.1 Motivace k návrhu .....	24
4.2 Analogová část systému .....	24
4.3 Digitální část systému.....	26
4.4 Softwarové ovládání .....	26
<b>5 Parametry testovaných LED</b> .....	<b>28</b>
5.1 LED ve viditelné oblasti záření .....	28
5.2 LED v oblasti UV záření .....	29
5.3 LED v oblasti IR záření .....	29
<b>6 Výsledky měření</b> .....	<b>30</b>
6.1 Skutečná spektra testovaných LED .....	30
6.2 Odezva LED na jednotlivé vlnové délky.....	31
6.3 Odezva LED typu Rebel na záření emitované LED stejné řady .....	31
<b>7 Výrobek – senzor čáry pro robotiku</b> .....	<b>34</b>
<b>8 Závěr</b> .....	<b>35</b>
8.1 Dosažení cílů .....	35
8.2 Ověření předpokladů .....	35
8.3 Použitelnost LED jako senzorů světla .....	35
<b>Literatura</b> .....	<b>37</b>
<b>Seznam příloh</b> .....	<b>38</b>

## Seznam zkratk

A/D	Analog to Digital	analogově-číslicový (převodník)
FET	Field effect transistor	tranzistor řízený polem
IO	Input-Output	vstupně-výstupní
IR	Infra Red	infra červená
IrDA	Infrared Data Association	komunikační infračervený port
JTAG	Joint Test Action Group	standard definovaný normou IEEE 1149.1
LED	Light-Emitting Diode	svítivá dioda
RAM	Random Access Memory	paměť s náhodným přístupem
PC	Personal Computer	osobní počítač
PIN	Positive-Intrinsic-Negative	přechod v polovodivém materiálu
PN	Positive-Negative	přechod v polovodivém materiálu
R, G, B	Red, Green, Blue	červená, zelená, modrá – základní barvy
RS232		standard pro sériovou komunikaci
SRAM	Static Random Access Memory	statická paměť typu RAM
SW	Software	programové vybavení počítače
USART	Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter	Synchronní a asynchronní sériové rozhraní
USB	Universal Serial Bus	univerzální sériová sběrnice
UV	Ultra Violet	ultra fialová



## Seznam obrázků

Obrázek 1 – Strom druhů fotocitlivých součástek .....	11
Obrázek 2 – Fotorezistor NORPS-12 .....	12
Obrázek 3 – Fotodioda EPD-365-0 .....	13
Obrázek 4 – Fotodioda S1223 .....	13
Obrázek 5 – Fotodioda EPD-470-5 .....	13
Obrázek 6 – Fotodioda S5971 .....	13
Obrázek 7 – Fototranzistor TEPT5600.....	14
Obrázek 8 – Fototranzistor TEMT6200FX01 .....	14
Obrázek 9 – Fototranzistor SFH3410 .....	14
Obrázek 10 – Fototranzistor PT4800E0000F .....	15
Obrázek 11 – Fototranzistor BPV11F .....	15
Obrázek 12 – Struktura čipu LED s viditelným spektrem.....	17
Obrázek 13 – Struktura čipu LED s IR spektrem.....	18
Obrázek 14 – Úprava na bílou LED .....	19
Obrázek 15 – Ukázky bílých led s luminoforem.....	19
Obrázek 16 – Bílá LED Rebel v řezu.....	19
Obrázek 17 – Blokové schéma modré LED při příjmu světelného záření .....	22
Obrázek 18 – Struktura IR LED při příjmu záření s připojenou zátěží.....	23
Obrázek 19 – OZ v zapojení "převodník proud/napětí" .....	24
Obrázek 20 – Použité zapojení OZ pro převod proudu na napětí .....	25
Obrázek 21 – Okno ovládacího programu.....	27
Obrázek 22 – Náhled do výstupního souboru .....	27
Obrázek 23 – Skutečná naměřená spektra LED řady Rebel.....	30
Obrázek 24 – Spektra LED řady Rebel udaná výrobcem Philips.....	30
Obrázek 25 – Graf odezvy LED typu Rebel.....	31
Obrázek 26 – Senzor čáry – osazovací schéma .....	39
Obrázek 27 – Senzor čáry – řídicí deska – strana součástek.....	39
Obrázek 28 – Senzor čáry – řídicí deska – strana spojů.....	39
Obrázek 29 – Senzor čáry – deska s 4x LED .....	39
Obrázek 30 – Senzor čáry – předloha 1:1 .....	39

## Seznam tabulek

Tabulka 1 – Kombinace polovodičových materiálů.....	20
Tabulka 2 – Parametry testovaných LED ve viditelné oblasti .....	28
Tabulka 3 – Parametry testovaných LED v oblasti UV záření .....	29
Tabulka 4 – Parametry testovaných LED v oblasti IR záření .....	29
Tabulka 5 – Napěťová odezva LED Rebel na záření z LED Rebel .....	33
Tabulka 6 – Proudová odezva LED Rebel na záření z LED Rebel.....	33

## Úvod

Tato práce je výsledkem rozšířených pokusů započatých při vývoji senzorů pro autonomního robota. Prvním impulsem byla potřeba senzoru, který spolehlivě rozezná černou vodící čáru na tmavě modrém podkladu. Volba modrého podsvícení senzoru vedla ke zjištění, že citlivosti dostupných optosnímačů v oblasti krátkých vlnových délek světla nejsou dobré. Vzpomněl jsem si na své pokusy s měřením reakce svítivých diod (Light Emitting Diodes – LED) na dopadající světlo a vydal se tímto směrem.

Z fyzikálního principu vykazuje svítivá dioda podobné vlastnosti jako fotodioda a solární článek, jen vyniká vlastností, pro kterou je konstruována – dokáže světlo vydávat. Svou konstrukcí však nebrání využití i dalších průběhů VA charakteristik ve 3. a 4. kvadrantu a z toho neoddělitelně vyplývajících dvou dalších možností zapojení – jako spektrálně závislá fotodioda ve 3. kvadrantu a jako spektrálně závislý solární článek ve 4. kvadrantu.

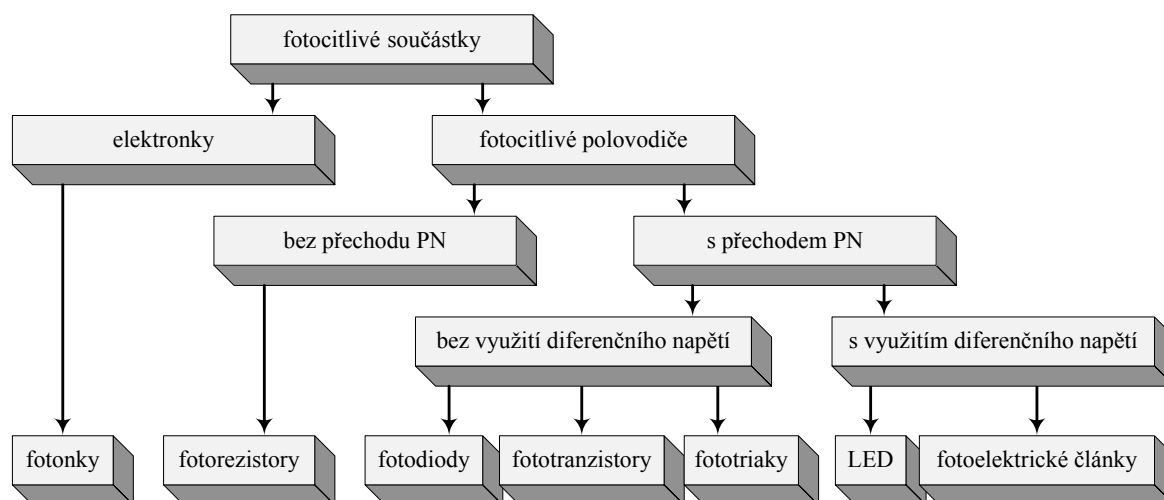
První část je věnovaná současným trendům a možnostem v jednoduché optické sensorice, kde jsou svítivé diody doposud používány téměř výhradně jako zdroje světla. Existuje pouze málo zmínek o schopnosti svítivých diod světlo také přijímat, převádět na elektrický signál a tak sloužit taktéž jako senzory.

Dále jsou uvedeny principy funkce svítivých diod v režimech emise i příjmu světelného záření, příklady konstrukce a vlastnosti světla samotného.

Hlavním cílem bylo ověření předpokládaných spektrálních vlastností LED. Za tímto účelem byl sestaven citlivý měřicí přístroj pro poloautomatické měření proudu od jednotek nano ampér a pro funkci oddělovacího napětíového zesilovače. Přístroj je pro účely těchto měření propojen s počítačem vývojovou deskou s mikrokontrolérem.

Na důkaz funkčnosti uvádím testovanou konstrukci senzoru čáry určeného pro robotiku. Tento je založen právě na využití LED jako zdrojů světla a rovněž jako senzorů odrazu od podložky.

## 1.1 Typy snímačů



Obrázek 1 – Strom druhů fotocitlivých součástek

### Základní typy součástek citlivých na světlo jsou:

- fotorezistor – pomalá součástka, dobrá citlivost od zelené po blízké IR,
- fotodioda – rychlá součástka nyní již dostupná i v oblasti UV, standardně IR,
- fototranzistor – v provedení pro viditelné a IR záření,
- fototristor – pouze spínání, nevhodný pro spojitě snímání plynulých změn,
- fotovoltaický článek, principiálně shodný solární článek,
- svítivá dioda – LED – v oblasti snímání téměř zapomenutá součástka; katalogové listy bez charakteristik ve 3. a 4. kvadrantu, bez časů reakce,
- fotonka – ke své funkci vyžaduje vysoké napětí, příkon pro žhavení.

### Základní vlastnosti a použití

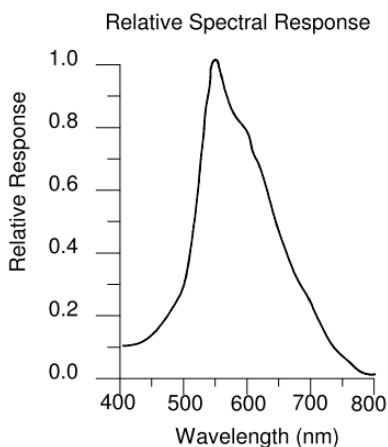
V této práci jsem zaměřen na spektrální vlastnosti součástek, proto zde nebudu popisovat principy funkce jednotlivých typů součástek, ale porovnáám právě spektrální možnosti snímání a případně rychlosti reakce. Použití fotonek je kvůli nutnosti vysokého napětí a velkému příkonu žhavení katody v přenosných zařízeních nezajímavé, proto je uvádím pouze v souhrnu fotocitlivých součástek.

## **Fotorezistor**

Jedná se o pomalý polovodičový prvek s dobou odezvy v řádech jednotek až desítek sekund. „Pro výrobu fotorezistorů, které mají pracovat ve spektrální oblasti viditelného světla, používáme sulfid kademnatý (CdS) a selenid kademnatý (CdSe). Spektrální citlivost fotorezistor ze sulfidu olovnatého (PbS) a indiumantimonu InSb má proti tomu maximum citlivosti v infračervené oblasti.“ (Frohn, a další, 2006)

Fotorezistory jsou svou pomalou reakcí předurčeny k využití v procesech, kde buď prodleva nevadí, nebo kde je dokonce potřebná. Nalezneme je například v automatickém pouličním osvětlení, hračkách, regulaci svítivosti žárovky, měřidlech osvětlení atp.

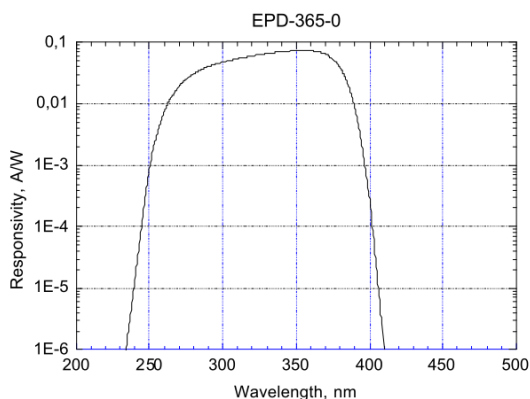
Jako ukázka poslouží fotorezistor NORPS-12 pro viditelné spektrum od firmy Silonex s materiálem CdS.



**Obrázek 2 – Fotorezistor NORPS-12**

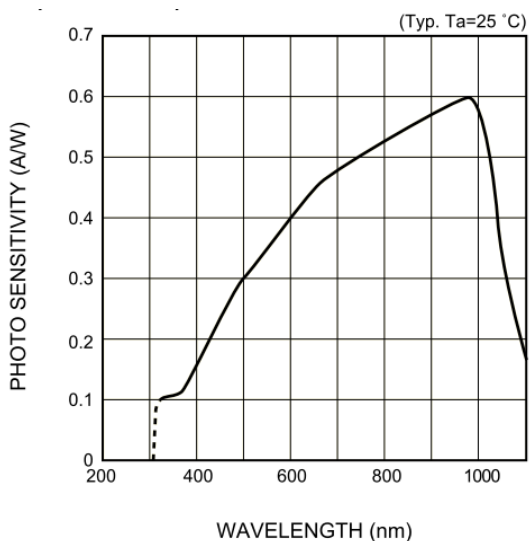
## Fotodioda

V současné době nejrychlejší fotocitlivé součástky jsou právě fotodiody. Stejně jako u diod v neprůsvitném pouzdře existuje několik základních variant: PN, PIN, Shottky, lavinová. Ať jako přijímače dálkových ovladačů nebo v transceiverech IrDA v mobilních telefonech, počítačích nebo mini vrtulnicích jsou určeny pro přenos dat velkou rychlostí. Několik charakteristik spektrální citlivosti naleznete v následujících grafech.



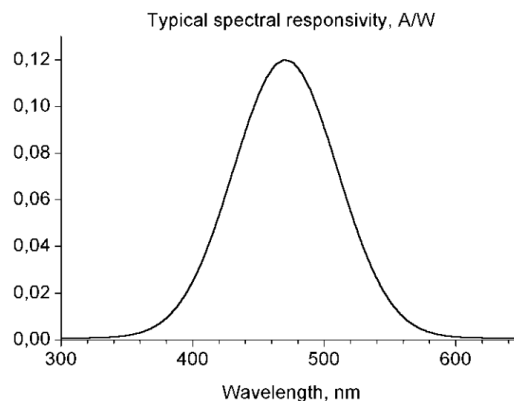
Obrázek 3 – Fotodioda EPD-365-0

Označení: EPD-365-0  
Cena: 695 Kč  
Čip: GaP, UV 245 - 400 nm  
Shottky bariérový  
 $t_r = 0,8 \text{ ns}$ ,  $t_f = 30 \text{ ns}$



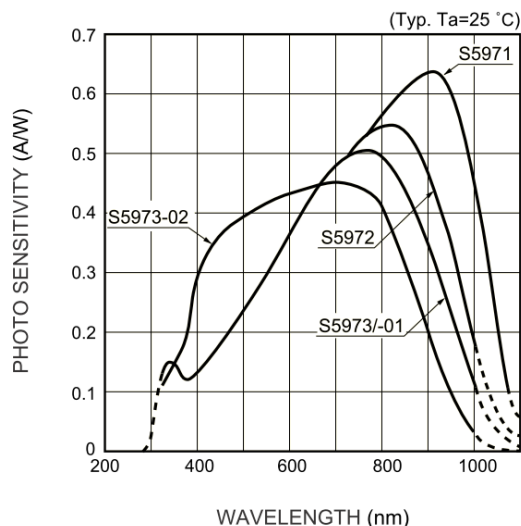
Obrázek 4 – Fotodioda S1223

Označení: S1223  
Cena: 216 Kč  
Čip: PIN, 960 nm  
 $t_r = t_f = 50 \text{ ns}$



Obrázek 5 – Fotodioda EPD-470-5

Označení: EPD-470-5  
Cena: 108 Kč  
Čip: GaP, Blue-green 470 nm  
 $t_r = t_f = 200 \text{ ns}$



Obrázek 6 – Fotodioda S5971

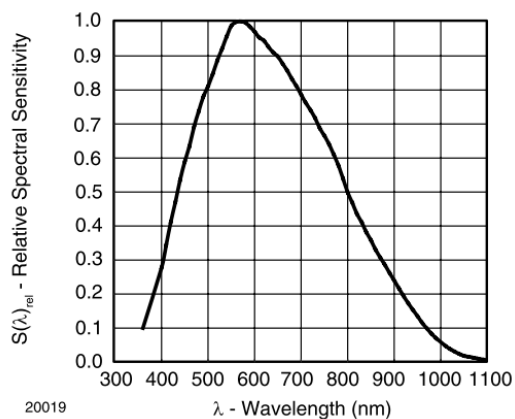
Označení: S5971  
Cena: 103 Kč  
Čip: PIN, 900 nm  
 $t_r = 5 \text{ ns}$

## Fototranzistor

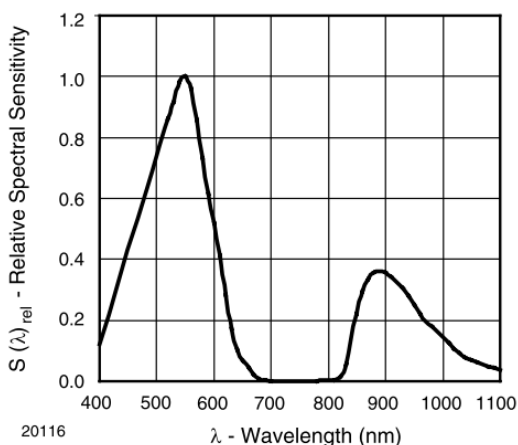
Fototranzistory jsou také děleny na součástky určené pro práci ve viditelném spektru a jiné pro IR.

Pro fototranzistory citlivé na viditelné spektrum (často označované jako „snímače okolního osvětlení“) většinou není udávána doba odezvy, protože se nepředpokládá využití v datových přenosech a pro snímání okolního osvětlení například pro přizpůsobení svítivosti displeje mobilního telefonu není potřeba rychlejší reakce, než s jakou je schopno lidské oko zaznamenat změnu. Takové pochody jsou mnohem pomalejší, než odezva fototranzistoru. (Při regulaci svítivosti displeje přidává programátor zpoždění uměle.)

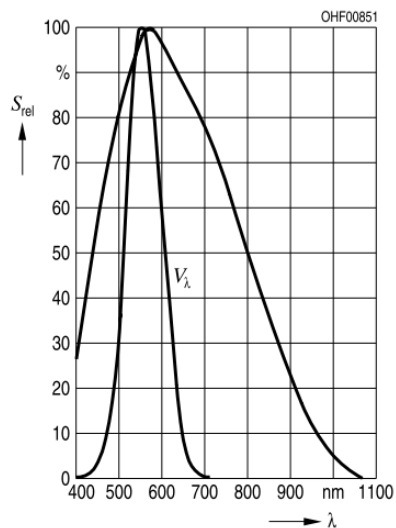
Všechny uvedené fototranzistory jsou označeny: „Speciálně přizpůsobeno citlivosti lidského oka“



Obrázek 7 – Fototranzistor TEPT5600

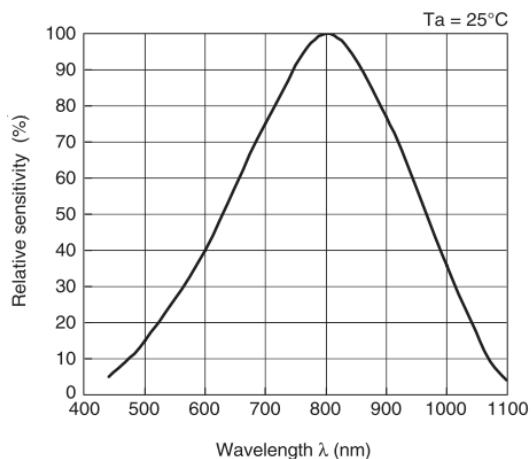


Obrázek 8 – Fototranzistor TEMT6200FX01



Obrázek 9 – Fototranzistor SFH3410

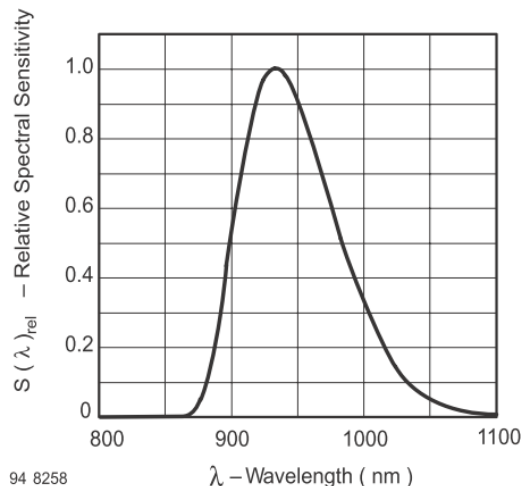
Fototranzistory pro oblast IR jsou přibližně 100x – 1000x pomalejší než IR fotodiody, ale své využití také naleznou – například v pomalejších optických spojích a především ve většině optických bran, kde jednoduchost zpracování výstupu (přímé připojení k logickému vstupu, nebo jednostupňové zesílení) hovoří právě pro ně.



**Obrázek 10 – Fototranzistor PT4800E0000F**

Označení: PT4800E0000F

Čip: 800 nm,  $t_r = 3 \mu s$ ,  $t_f = 3,5 \mu s$



**Obrázek 11 – Fototranzistor BPV11F**

Označení: BPV11F

Čip: 930 nm,  $t_r = 6 \mu s$ ,  $t_f = 5 \mu s$

pouzdro je zároveň IR filtr propouštějící  $\lambda > 900 \text{ nm}$

### **Fotovoltaický článek, solární článek, LED**

Běžné fotovoltaické články jsou konstruovány pro blízkou infračervenou oblast. To se projeví jako výhoda při oblačnosti, kdy mraky nejlépe prochází záření IR. Nevýhodou této spektrální závislosti je, že energetičtější vlnové délky nepředávají strukturu energii světelnou, ale pouze tepelnou a zhoršují tak účinnost článku. Princip funkce bude vysvětlen dále (3. Kapitola: Princip funkce svítivé diody jako snímače záření), neboť je shodný s funkcí LED jako snímače.

## 1.2 Používání LED jako senzorů v současné praxi

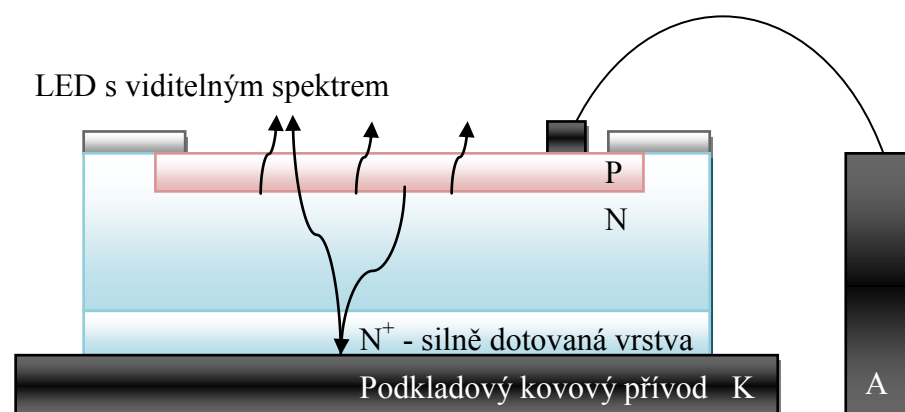
Po dobu přípravy a tvorby této práce jsem se setkal s mnoha součástkami a zařízeními pro detekci světla či rozeznávání barev. Většina pro snímání záření využívá fotodiodu připojenou na vstup operačního zesilovače. Méně často jsem se setkával s fototranzistory. Pro změnu spektrální odezvy jsou využívány barevné filtry buďto umístěné přímo na ploše snímacího čipu, nebo v optické soustavě, kde je možná výměnná konstrukce. Na použití LED jako senzorů jsem narazil až při vytváření této práce a to na třech místech. První zmínku jsem našel v pokusu jednoho kutila o snímání dotyku. Tento kutil naznačil způsob konstrukce, ale výsledky práce nepředložil. Druhý výskyt je zmínka o díle amatérského vědce (Forrest M. Mims III), které prý téma snímání pomocí LED popisuje (nedostupná literatura) a do třetice dokument „Very Low-Cost Sensing and Communication Using Bidirectional LEDs“ trojice autorů z MITSUBISHI ELECTRIC RESEARCH LABORATORIES (Paul Dietz, William Yerazunis, Darren Leigh). Jejich práce byla zaměřena na náhradu RFID bezpečnější (ale méně pohodlnou) klíčenkou s optickým přenosem, k němuž využívali i vlastnosti LED jako senzoru. Zmiňují se ovšem o možnosti, že každá LED je potencionálním vstupem. To je sice zajímavé tvrzení, ale nikde neřeší spektrální závislost příjmu LED. Tvrdí, že by mohl být příjem dálkového ovladače (jejich identifikační klíčenky) možný pomocí signální LED na monitoru a při podpoře výrobců monitorů a implementaci snímání dat ze signalizační LED by tak mohlo dojít například k přihlášení na uživatelský účet v počítači. Výsledky mé práce však znamenají, že pokud by klíčenky používaly například IR LED (jako s největší pravděpodobností používají), nebylo by možné komunikovat s modrými signalizačními LED, které jsou nyní běžné na mnoha zařízeních. V této problematice je tedy stále co zkoušet a bohužel i má práce se dotýká pouze jednoho kritéria pro použití LED v sensorice. Dosažitelné rychlosti případné obousměrné komunikace jsem sice zhruba testoval, ale tato oblast vlastností LED by vyžadovala testy a přístroje přesahující téma a rozsah této práce.



## 2 Princip funkce svítivé diody jako zdroje záření

### 2.1 Uspořádání čipu

Svítivá dioda (anglicky Light Emitting Diode, odtud LED) je polovodičový prvek s jedním přechodem polovodič typu P a polovodič N. Od usměrňovací diody se však odlišuje fyzickou konstrukcí, použitými polovodiči i jejich dotováním. Vyzáření energie způsobuje volba silného dotování polovodiče typu  $N^+$  a slabého dotování polovodiče typu P. Průchod proudu je tak realizován převážně volnými elektrony z vrstvy  $N^+$  injektovanými do přechodu po přiložení napájecího napětí. K rekombinaci volných elektronů dochází až ve vrstvě P s přítomnými děrami. Tento děj je doprovázen uvolněním energie, kterou potřebujeme vyzářit z přechodu. Jedná se o energii ve formě světelných fotonů (zářivý přechod – požadovaná forma) a tepelných kmitů krystalové mřížky (nezářivý přechod – vedlejší produkt způsobující potíže a omezení) Pro snazší vyzáření fotonů viditelného světla je přechod PN u LED pro viditelné spektrum umístěn co nejbližší povrchu čipu (Obrázek 12 – Struktura čipu LED s viditelným spektrem).

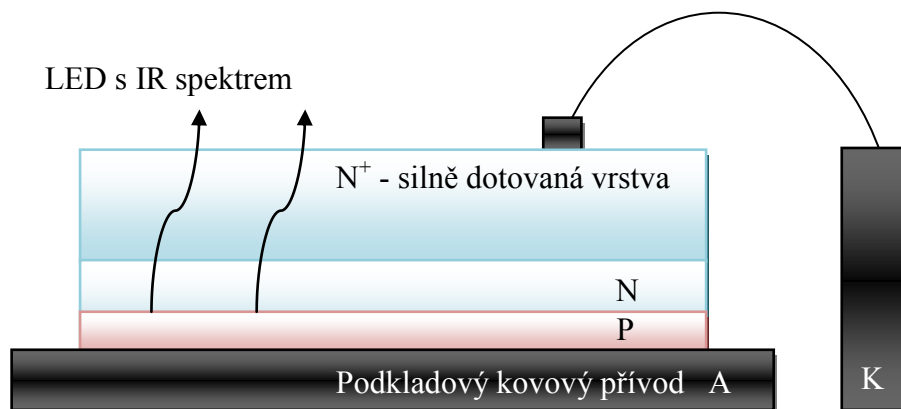


Obrázek 12 – Struktura čipu LED s viditelným spektrem

Tato volba je nutná, jelikož materiál polovodiče pohlcuje vlnové délky viditelného světla. Další úskalí ve vyzáření světla do okolí je na rozhraní polovodič-vzduch. Velký rozdíl indexů lomu způsobuje totální odraz a velkou část záření vrací zpět do prostoru polovodiče. Řešením je zalití (zastříknutí ve formě) celé konstrukce včetně části kovových vývodů do optického pouzdra s vhodným indexem lomu. Omezení výše zmíněným tepelným zářením spočívá ve volbě optického materiálu s vysokou možnou provozní teplotou<sup>1</sup>. Dříve používané epoxidové pryskyřice a akrylátový polyester jsou dnes proto postupně u výkonových diod nahrazovány silikonovými materiály. Druhé a výraznější omezení je způsobeno volbou tloušťky polovodičového čipu, blízkostí PN přechodu k povrchu čipu a vzdáleností PN od podkladové chladičské destičky. Jak je zřejmé, umístění PN přechodu k povrchu čipu zhoršuje odvod tepla a tak snižuje maximální povolený provozní výkon.

<sup>1</sup> Čip modré supersvítivé LED Rebel LXML-PR01-xxxx smí v provozu dosáhnout 135°C.

U LED emitujících infra (z angličtiny Infra Red, dále jen IR) záření se využívá dobré průchodnosti větších vlnových délek materiálem diody (polovodič je pro IR záření „průhlednější“) a pro účinnější chlazení čipu je PN přechod umístěn blízko kovové podložky (Obrázek 13 – Struktura čipu LED s IR spektrem). Díky této úpravě IR LED dosahují větších povolených výkonů ve stejném pouzdře (kolem pětinasobku).



Obrázek 13 – Struktura čipu LED s IR spektrem

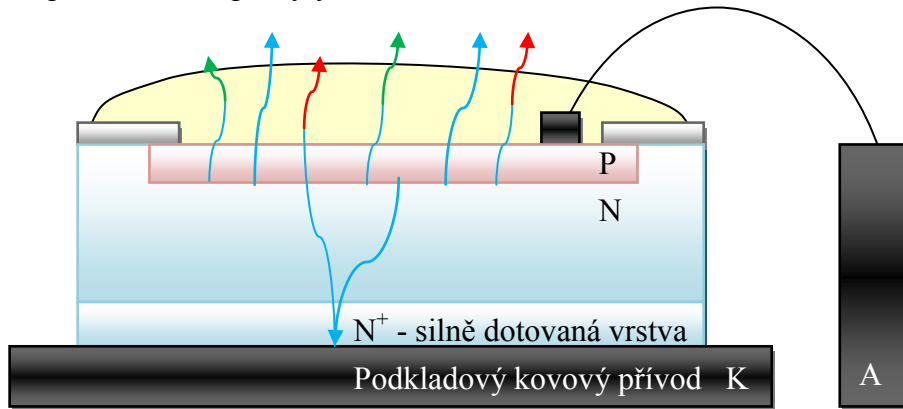
Velmi mladou verzí LED je bílé provedení. Vzhledem k principu vzniku záření v LED a tedy vzhledem k relativní<sup>2</sup> monochromatickosti spektra LED nelze předpokládat vznik bílého světla. Bílé světlo je přirozeně složeno z rovnoměrně rozprostřených barev od modré po červenou; lidské oko však obsahuje nervová zakončení (čípky) citlivá pouze na červenou (anglicky Red, dále R), zelenou (anglicky Green, dále G) a modrou (anglicky Blue, dále B) složku světla. Toho se s výhodou využívá ve většině zobrazovačů a je možné takto obejít lidský vjem i při konstrukci bílé LED použitím právě R, G a B čipů. Pro LED s proměnnou barvou nebo nastavitelnou barevnou teplotou bílého světla je toto provedení – 3 čipy v jednom pouzdře – možné, ale pro použití jako náhradu jednoho bílého světelného zdroje by se výroba prodražila. Prakticky je většinou používán čip s energetičtějším zářením (nejčastěji modrá – oproti UV je levnější; energie světla – viz 2.3) pokrytý vrstvou luminoforu (

Obrázek 14). Tato propouští část budicího záření a část převádí na ostatní potřebné složky R a G v poměru odpovídajícím žádané barevné teplotě bílého světla. Převáděné složky již obsahují plynulejší rozložení energie na mnoho vlnových délek, nepříznivá je však nízká účinnost<sup>3</sup> mnohých luminoforů. Výrobci světových značek se stále předhánjí v účinnostech a výkonech bílých LED, protože se zvyšuje tlak veřejnosti na levnější a univerzálnější LED osvětlení schopné nahradit současné technologie.

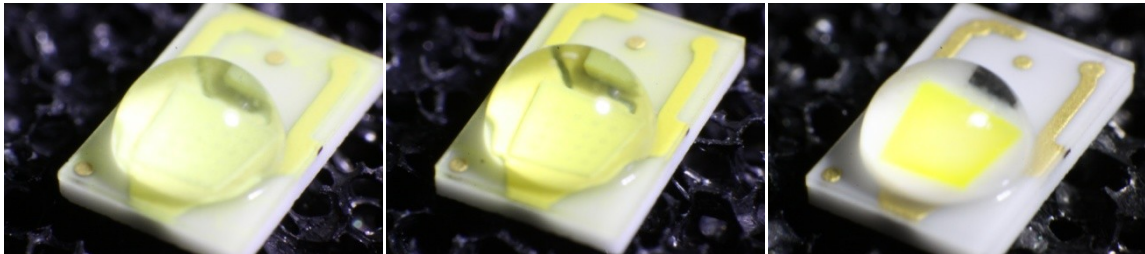
<sup>2</sup> Šíře spektra laserového záření může být 0,2 nm, šíře spektra červené LED bývá 65 nm a spektrum halogenové žárovky se rozprostírá na 700 nm

<sup>3</sup>Jedno z mých měření na LED se snímatelným luminoforem dokazuje snížení vyzářené energie po přiložení originálního luminoforu na 22,7%.

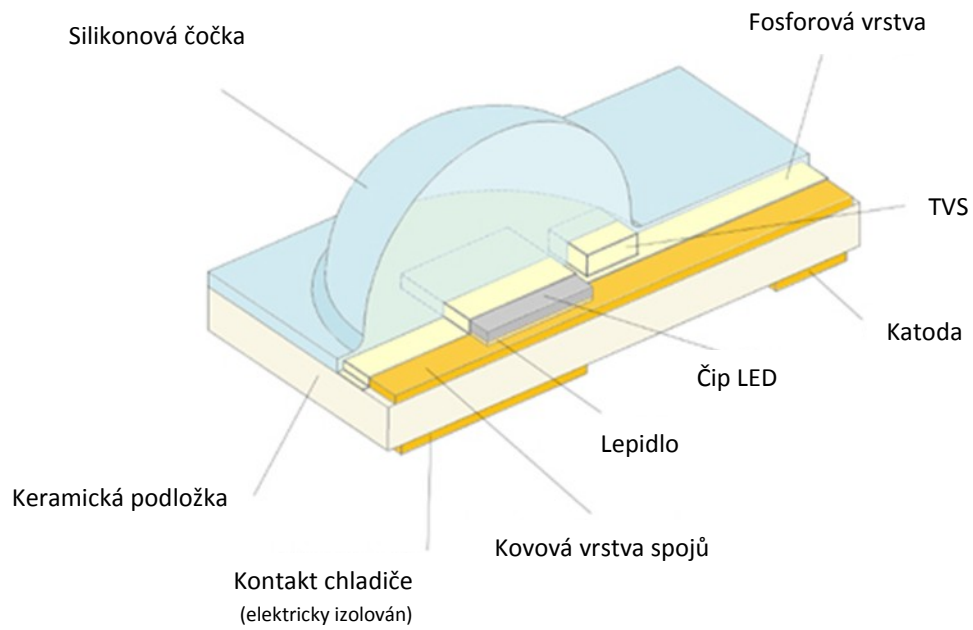
Čip modré LED pokrytý luminoforem



Obrázek 14 – Úprava na bílou LED



Obrázek 15 – Ukázky bílých led s luminoforem (zleva: studená bílá, neutrální bílá, teplá bílá)



Obrázek 16 – Bílá LED Rebel v řezu (zdroj [www.philipslumileds.com](http://www.philipslumileds.com))

## 2.2 Materiály pro LED

„Na výrobu LED je použitelný pouze materiál s vhodnou šířkou zakázaného pásma, přímou pásovou strukturou, který ještě umožní vytváření dokonalých PN přechodů. První dvě podmínky vylučují použití tradičních materiálů jako Ge a Si, třetí podmínka vylučuje materiály tvořené slitinami druhé a čtvrté skupiny periodické soustavy prvků. Používají se následující podvojně polovodičové materiály, které jsou slitinami prvků třetí a páté skupiny periodické soustavy prvků: GaAs, InP a CdTe, které mají přímou pásovou strukturu a širokou energetickou mezeru 1,5 eV, GaSb s přímou pásovou strukturou a středně širokou energetickou mezerou 0,8 eV, InSb a InAs s přímou pásovou strukturou a úzkou energetickou mezerou 0,2 až 0,4 eV, dále GaP s nepřímou velice širokou energetickou mezerou 2,2 eV a SiC s nepřímou velice širokou energetickou mezerou 2,5 eV. Materiál GaAs a z něj tvořené heterostrukтуры jsou vhodné pro výrobu IRED.

Čistý fosfid gália GaP je málo účinný zářič, ale po zabudování záchytných center na bázi dusíku N nebo kysličníku ZnO, kterými jsou nahrazeny pásy atomů Ga a P, lze získat vysoce účinné LED. GaP dotovaný N vyzařuje zelené světlo 0,565  $\mu\text{m}$ , při dotaci ZnO vyzařuje červené světlo 0,7  $\mu\text{m}$ .

Vedle podvojných polovodičů se používají ještě potrojně (ternární) polovodiče jako: GaAlAs, GaAsP, kde lze měnit poměrem nečistot šířku energetické mezery a tím i vlastnosti emitovaného záření.

Ternární heretostrukтуры (GaAl)As/GaAs jsou vhodné pro výrobu IRED vyzařujících v oblasti 0,8 až 0,9  $\mu\text{m}$ , kvaternární slitiny (InGa)(AsP)/InP jsou vhodné pro vlnové délky 1,3 a 1,55  $\mu\text{m}$ , na kterých mají minimální útlum optická vlákna.“ (Heřman, a další, 2008)

**Tabulka 1 – Kombinace polovodičových materiálů (Heřman, a další, 2008)**

Polovodič	Barva
AlGaAs	infračervená a červená
AlGaP	zelená
AlGaInP	vysoce jasná červenooranžová, oranžová, žlutá, zelená
GaAs	infračervená
GaAsP	červená, červenooranžová, oranžová, žlutá
GaP	červená, žlutá, zelená
GaN	zelená, modrá
InGaN	modrozelená, modrá, blízká ultrafialová
SiC	(jako substrát) modrá
Si	(jako substrát) modrá (ve vývoji)
Safir	(jako substrát) modrá
ZnSe	modrá
C (diamant)	ultrafialová
AlN	blízká až vzdálená ultrafialová
AlGaInN	blízká až vzdálená ultrafialová

## 2.3 Vlastnosti emitovaného záření

Emitované záření se liší frekvencí resp. vlnovou délkou (barvou) a současně i energií fotonu (částice reprezentující vyzářenou energii, můžeme uvažovat jeho vlnový i částicový charakter). Vztah mezi energií fotonu a jeho vlnovou délkou je určen vztahem:

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda}.$$

Kde je:  $E$ ..... energie fotonu,  
 $h$ ..... Planckova konstanta ( $h = 4,13566733 \cdot 10^{-15} \text{ eV}\cdot\text{s}$ ),  
 $f$ ..... frekvence,  
 $c$ ..... rychlost světla ve vakuu ( $c = 299\,792\,458 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ),  
 $\lambda$ ..... vlnová délka.

Vlnová délka záření závisí na velikosti zakázaného pásu použitého polovodičového materiálu, protože foton je vyzářen právě při přechodu elektronu z vodivostního pásu do valenčního. Energie fotonu odpovídá rozdílu energií vodivostního a valenčního pásu (tedy energii zakázaného pásu) a z toho podle výše uvedeného vzorce vyplývá vlnová délka záření.

LED jsou zdrojem nekoherentního záření, to znamená, že vyzářené světlo je rozbíhavé, s různou fází a různou polarizací. Mnoho pouzder LED je konstruováno přímo s lupou soustředující světlo z čipu do kuželu s různým vyzařovacím úhlem, ale nesetkal jsem se zatím s LED, která by výstupní paprsek soustředila souběžně.

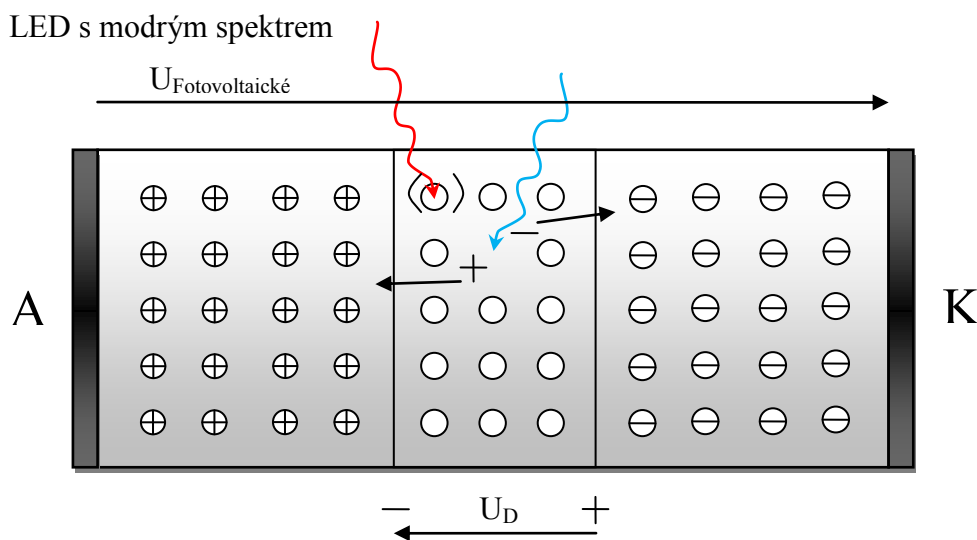
### 3 Princip funkce svítivé diody jako snímače záření

Opačný jev svítivých přechodů elektronů mezi energetickými hladinami v polovodiči je známý z principu funkce fotodiod a solárních článků. A přesně takový děj probíhá v čipu LED při dopadu světelného záření.

Do světlu vystaveného přechodu vnikají fotony s různou energií. Fotony s energií odpovídající energii zakázaného pásu vybudí valenční elektrony a uvolní je z vazby do vodivostního pásu (na Obr. 17 příjem modrého fotonu). Tyto elektrony se dále podílí na vedení proudu (vzniku rozdílu potenciálů na elektrodách), protože jsou potenciálovým spádem vtáženy do oblasti s vodivostí typu N. Zbývá díra v obalu atomu se posouvá přeskoky elektronů sousedních atomů směrem k oblasti s vodivostí typu P. Každý takto vytvořený pár je tedy okamžitě rozdělen a náboje přesunuty mimo vyprázdněnou oblast. Vzniká tak napětí na elektrodách, které při zapojení zátěže způsobí průtok proudu, úměrný počtu absorpcí fotonů (Obr. 18).

Druhá možnost je, že foton není schopen jednorázově vybudit elektron pro přeskok do vodivostního pásu a postupně ztrácí energii odrazy od krystalové struktury. Tím dochází ke kmitům krystalové mřížky (na Obr. 17 příjem červeného fotonu), zvýšení teploty krystalu a zhoršení vlastností součástky (podobně nevýhodné jako nežádivé přechody u svítivého provozu LED).

Třetí možnost je, že foton sice vybudí elektron do vodivostního pásu a vnikne pár elektron – díra, ale tyto náboje znovu rekombinují a k nárůstu napětí (proudu) nedojde také (Obr. 18).



Obrázek 17 – Blokové schéma modré LED při příjmu světelného záření

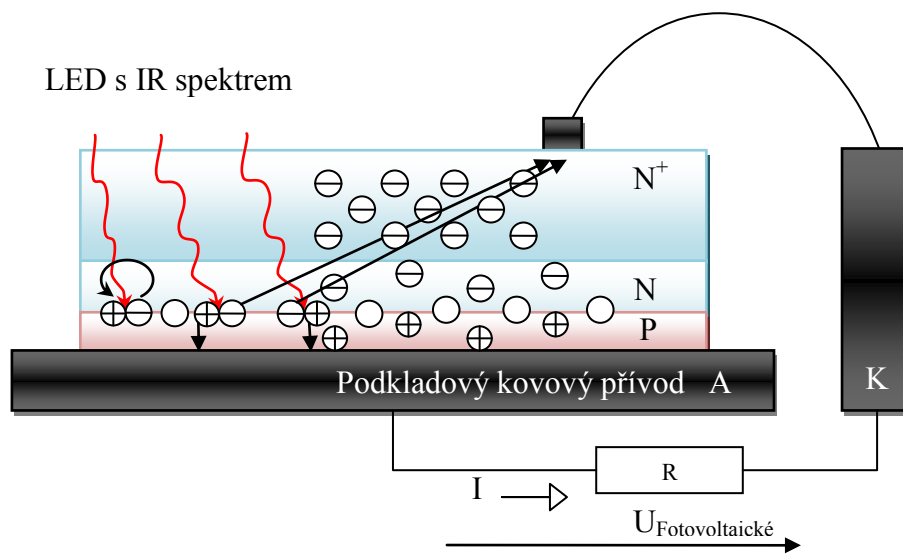
Vysvětlivky:

$U_D$  ..... bariérové napětí přechodu PN,

$U_{\text{Fotovoltaické}}$  ..... fotovoltaické napětí závislé na intenzitě osvětlení,

A ..... anoda,

K ..... katoda.



Obrázek 18 – Struktura IR LED při příjmu záření s připojenou zátěží

Vysvětlivky:

$U_{\text{Fotovoltaické}}$  ..... fotovoltaičné napětí závislé na intenzitě osvětlení,

A ..... anoda,

K ..... katoda,

R ..... zatěžovací rezistor

I ..... proud způsobený vnikem napětí mezi anodou a katodou

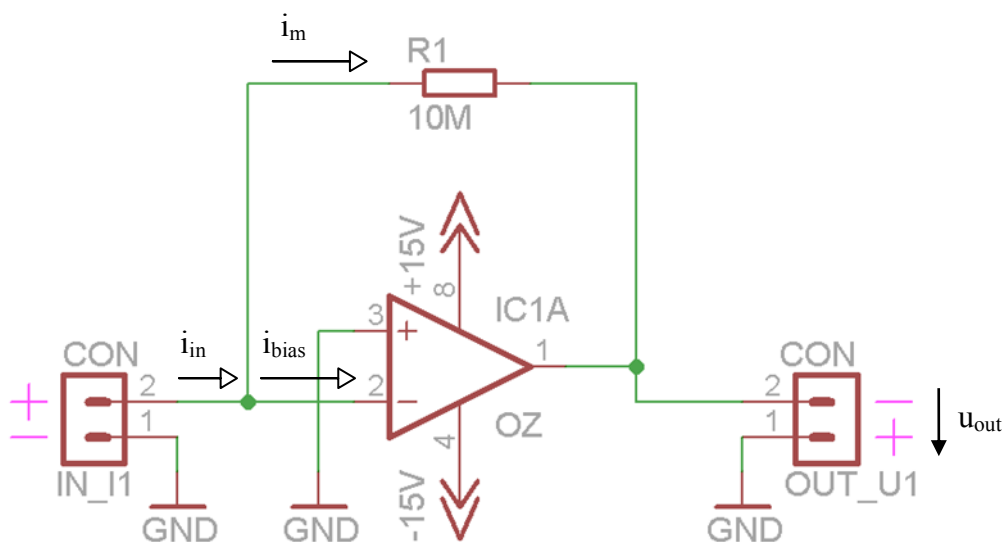
## 4 Poloautomatický měřicí systém „nA a mV meter“

### 4.1 Motivace k návrhu

Během přípravných měření jsem zjistil, že většina vzorků poskytuje pouze malou odezvu na testovací zdroj spektrálně úzkého zdroje záření. Odezva běžných SMD i 5 mm LED byla při tak malé intenzitě téměř neměřitelná i nejcitlivějšími dostupnými přístroji a odezva výkonových LED s velkým čipem navzdory očekávání byla zaznamenána pouze v napěťovém testu. Tento žalostný stav měřicí soustavy po dlouhém a mnohými jednáními náročném shánění přístrojů umocňovala představa plně manuálního nastavování a opisování několika tisíců hodnot. Rozhodnul jsem se tedy pro vývoj vlastního přístroje s připojením k PC včetně ovládacího software (dále jen SW) s ukládáním dat do souboru.

### 4.2 Analogová část systému

Základem analogové desky je zapojení operačního zesilovače (dále jen OZ) jako převodníku proudu na napětí (dále jen U/I).



Obrázek 19 – OZ v zapojení "převodník proud/napětí"

Významnou výhodou tohoto zapojení oproti snímání proudu měřením napěťového úbytku na rezistoru sériově zapojeném v měřeném obvodu je skutečnost, že se toto měřicí zapojení neprojeví změnou vnitřního odporu měřeného obvodu. Operační zesilovač zde vytvoří virtuální zemní potenciál a chová se tedy jako zkrat přes to, že proud protéká přes velký měřicí odpor určující zesílení zapojení podle vzorce:

$$u_{out} = -R_1 \cdot i_m.$$

Nevýhodná vlastnost vyplývá z nutnosti vedení měřeného proudu přes výstup OZ. Pro účel této aplikace postačí i OZ s povoleným výstupem v jednotkách mA (pozor, proud v závislosti na polaritě vstupu vtéká do výstupního vývodu nebo z něj vytéká), pro větší proudy by musel být zvolen výkonnější operační zesilovač (s větším povoleným výstupním proudem).



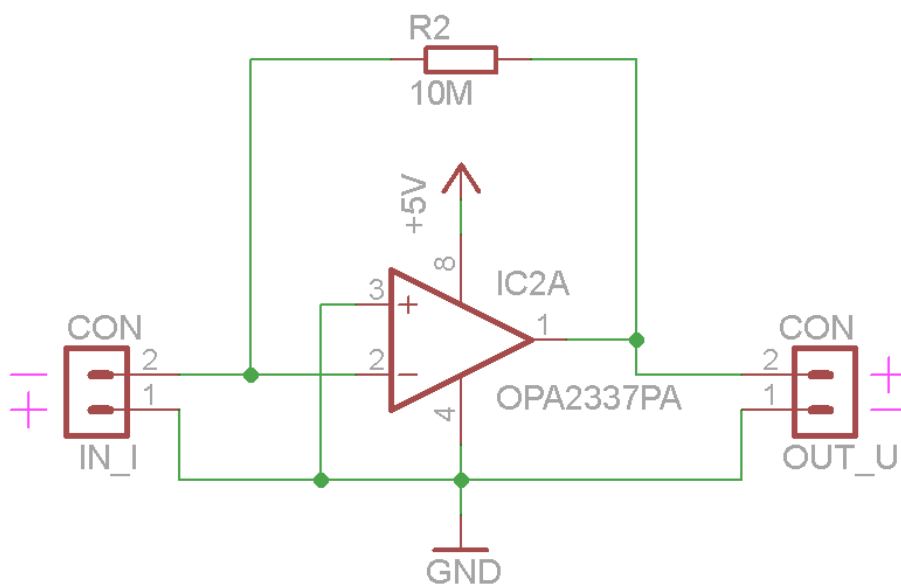
Protože se skutečný proud určený k převodu na napětí dělí na složku měřenou ( $i_{\text{měřený}}$ ) a složku tekoucí do vstupu OZ ( $i_{\text{bias}}$ ), je pro určitou přesnost měření nutné dosáhnout určitého poměru složek  $i_{\text{bias}}$  a  $i_{\text{měřený}}$ . Například pro relativní chybu měření maximálně  $\delta_x = -1\%$  musí být poměr 1:100.

$$\delta_x = \frac{\Delta_X}{X_s} = \frac{X_n - X_s}{X_s} = \frac{i_m}{i_{in}} = \frac{(i_{in} - i_{bias}) - i_{in}}{i_{in}} = \frac{-i_{bias}}{i_{in}} \stackrel{!}{\Rightarrow} -1\% \Rightarrow \frac{i_{bias}}{i_{in}} = \frac{1}{100}$$

Kde je:  $\delta_x$  .....relativní chyba měření,  
 $\Delta_X$  .....absolutní chyba měření,  
 $X_s$  .....skutečná hodnota,  
 $X_n$  .....naměřená hodnota,  
 $i_{in}$  .....skutečný proud,  
 $i_m$  .....měřený proud,  
 $i_{bias}$  .....vstupní proud OZ.

Tedy při  $i_{in} = 100 \text{ nA}$  smí při požadované přesnosti měření  $-1\%$  do OZ vstupovat  $i_{bias} = 1 \text{ nA}$ .

S úmyslem napájet celé zařízení z USB konektoru PC se omezil výběr operačního zesilovače na typy podporující nesymetrické napájení do 5 V, dále je výhodný OZ v provedení RAIL-TO-RAIL pro vstup i výstup, jelikož jej využívám od nuly a požaduji co největší rozsah. Ze vzorce pro výstupní napětí však vyplývá, že v provozu s nesymetrickým napájením měřiče je nutné připojovat měřený obvod na vstup s opačnou polaritou, tedy kladný vývod na zem měřiče a záporný na vstup. To dále znamená, že měřič musí mít zem napájení oddělenou od měřeného obvodu. Při měření LED jako nezávislých zdrojů toto nečiní žádný problém.



Obrázek 20 – Použité zapojení OZ pro převod proudu na napětí

Vybral jsem tedy OZ s označením OPA2338 firmy Burr-Brown (Texas Instruments), který v jednom pouzdře sdružuje dva nezávislé OZ s parametry:

- napájecí napětí  $2,7 \div 5,5 \text{ V}$ ,
- zkratový proud výstupu  $\pm 9 \text{ mA}$ ,
- vstupní proud  $\pm 10 \text{ pA}$ ,
- vstupní impedance  $10^{13} \Omega \parallel 2 \text{ pF}$ ,
- zesílení otevřené smyčky  $120 \text{ dB}$ .

Pro snazší měření průměrné hodnoty reakce jsem na výstupy obou bloků zesilovače umístil odpojitelné dolní propusti. Kompletní schéma je umístěno v příloze A.

### 4.3 Digitální část systému

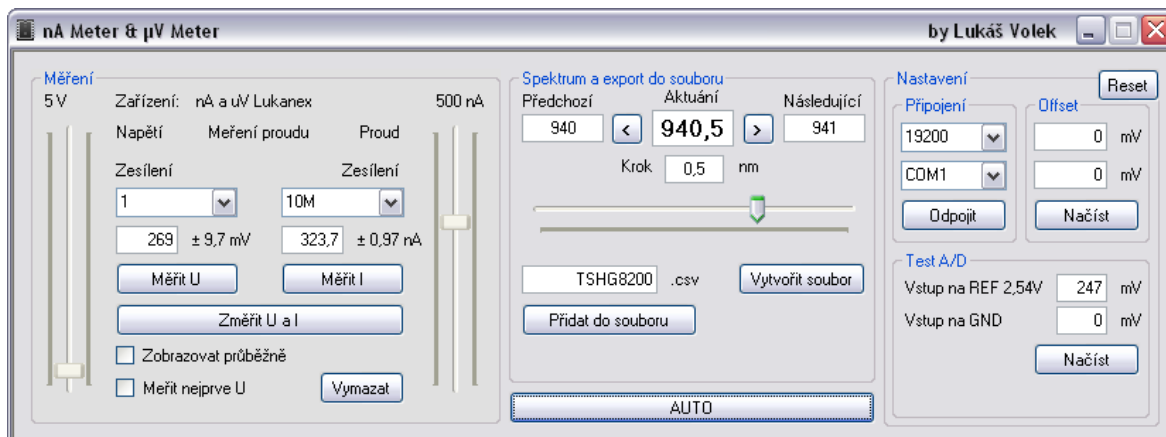
Pro snazší zpracování a rychlejší měření jsem se rozhodl využít výhod digitálních obvodů. Jejich úkolem je přepínání měřeného vzorku mezi proudovým a napěťovým vstupem analogového obvodu, převod napěťového výstupu analogové desky na data zpracovatelná počítačem, a jejich odesílání do počítače. K tomuto účelu jsem vybral vývojovou desku s mikrokontrolérem ATmega32. Tento mikrokontrolér obsahuje 32 kB programové paměti, 2 kB SRAM jeden desetibitový analogově-číslicový (anglicky analog/digital, dále jen A/D) převodník multiplexovaný z osmi vstupně-výstupních (anglicky input/output, dále jen IO), dále využívám USART, JTAG, několik IO pinů, šestnáctibitový timer a watchdog timer. Deska dále zvyšuje komfort převodníkem USART $\leftrightarrow$ RS232, díky němuž je možné přímé propojení desky k PC a krystalový oscilátor 14,7456 MHz vhodný pro správné generování přenosové rychlosti USART.

Aby bylo možné automatické přepínání, přidal jsem do řetězce tři relé s ovládací cívkou na 5 V. Jedno pro odpojení vzorku před přepínáním, druhé pro přepojení polarity vzorku (vstup U/I převodníku vyžaduje uzemnění kladného pólu) a třetí pro samotné přepínání vzorku mezi vstupy převodníku U/I a napěťového zesilovače. Relé ovládám třemi výstupy mikrokontroléru přes FET tranzistory s ochrannými diodami.

### 4.4 Softwarové ovládání

Pro plné a snadné využití poloautomatických operací soustavy analogové části systému ovládané digitální částí jsem vytvořil a naprogramoval uživatelské rozhraní. K programování jsem zvolil jazyk C# a pro vývoj jsem zvolil přívětivé prostředí Microsoft Visual Studio 2008. Zaměřil jsem se na automatické přepínání vstupů (ovládání relé), přepočítání hodnoty z rozsahu 0-1023 načtené A/D převodníkem na hodnotu odpovídající měřicímu zapojení a nastavenému zesílení, korekce offsetu OZ předchozím cejchováním, dále přehledné ukládání dat na pevný disk (náhled do výstupního souboru je na Obrázek 22), automatické počítání vlnové délky podle nastaveného kroku a zapouzdření celého jednoho kroku měření pod jedno tlačítko. Dále jsou implementovány funkce plynulého zobrazování hodnoty zvoleného vstupu (oba vstupy nelze zobrazovat současně z důvodu

softwarové koncepce zaměřené na měření LED, která nepředpokládá možnost validní hodnoty na obou vstupech současně), vizualizace hodnoty v měřeném rozsahu sloupcem, kontrola a výstraha přesažení maximální hodnoty rozsahu audiovizuálním alarmem, testovací režimy, nastavení připojení sériovou linkou s kontrolou na přítomnost měřicího zařízení a softwarový reset měřicího zařízení.



Obrázek 21 – Okno ovládacího programu

	A	B	C	D	E
1	Lambda [nm]	Napětí		Proud	
2	350	146 mV		0 nA	
3	355	142 mV		0 nA	
4	360	259 mV		0,5 nA	
5	365	1431 mV		2 nA	





Obrázek 22 – Náhled do výstupního souboru

Měření LED ozařováním na spektrofotometru tedy probíhalo tak, že po nastavení výchozí vlnové délky (inkrementuje se s každým provedeným měřením) a inkrementačního kroku jsem jen ručně nastavil novou vlnovou délku na spektrofotometru, jméno souboru dle typu LED, potvrdil vytvoření nového souboru naměřených dat a stisknul tlačítko AUTO. Ostatní proběhlo automaticky a na dokončení jednoho bodu měření mě program zvukově upozornil. V tom okamžiku jsem na spektrofotometru ručně nastavil hodnotu vlnové délky o v programu předdefinovaný krok větší a znovu potvrdil (nyní již pouze mezerníkem).

## 5 Parametry testovaných LED


### 5.1 LED ve viditelné oblasti záření

Tabulka 2 – Parametry testovaných LED ve viditelné oblasti

Výrobce	Pouzdro, Barva	Typická $\lambda$	Typický provozní proud	Typický světelný tok	Typ. pozor. úhel	$V_f$
Součástka		[nm]	[mA]	[mCd   lm   mW]	[°]	[V]
<b>LUMILEDS</b>	 Rebel					
LXML-PR01-0225	Royal-Blue	447,5	700	400 mW	120	3,15
LXML-PB01-0023	Blue	470	700	48 lm	120	3,15
LXML-PE01-0040	Cyan	505	700	80 lm	120	3,15
LXML-PM01-0040	Green	530	700	80 lm	120	3,15
LXML-PL01-0030	Amber	590	700	65 lm	120	2,9
LXML-PH01-0040	Red-Orange	617	700	85 lm	120	2,9
LXML-PD01-0040	Red	627	700	85 lm	120	2,9
LXML-PWC1-0070	Cool White	6500 K	700	130 lm	120	3,15
LXML-PWN1-0070	Neutral White	4100 K	700	130 lm	120	3,15
LXML-PWW1-0050	Warm White	3100 K	700	95 lm	120	3,15
<b>KINGBRIGHT</b>	 LED SMD 0805					
KPHCM-2012PBC-A	BLUE	470	20	80 mCd	110	3,3
KPHCM-2012SGC-T	GREEN	568	20	25 mCd	110	2,2
KPHCM-2012CGCK	GREEN	570	20	50 mCd	110	2,1
KPHCM-2012YC-T	YELLOW	588	20	8 mCd	110	2,1
KPHCM-2012SYCK	YELLOW	590	20	120 mCd	110	2,0
KPHCM-2012SECK	ORANGE	601	20	160 mCd	110	2,1
KPHCM-2012EC-T	RED	625	20	20 mCd	110	2,0
KPHCM-2012SURCK	RED	635	20	150 mCd	110	1,95
<b>OPTOFLASH</b>	 LED SMD 3020					
OF-SMD3020G	G	524	20	600 mCd	120	3,2
OF-SMD3020R	R	624	20	200 mCd	120	2,0
<b>AVAGO TECHNOLOGIES</b>	 LED PLCC4 0.5W RGB					
ASMT-QTB0-0AA02	R	621	50	620 mCd	120	2,1
	G	528	30	1200 mCd	120	3,2
	B	470	30	280 mCd	120	3,2



## 5.2 LED v oblasti UV záření

Tabulka 3 – Parametry testovaných LED v oblasti UV záření

Součástka	Barva	Typická $\lambda$ [nm]	Typický proud [mA]	Typický světelný tok [mCd/lm/mW]	Typ. pozor. úhel [°]	$V_f$ [V]
<b>OSA OPTO LIGHT</b>	 LED SMD CERAMIC					
OCU 400 403 OS	<b>UV 403NM</b>	403	30	4 mW/sr	120	3,2
OCU 400 411 OS	<b>UV 411NM</b>	411	30	4 mW/sr	120	3,2

## 5.3 LED v oblasti IR záření

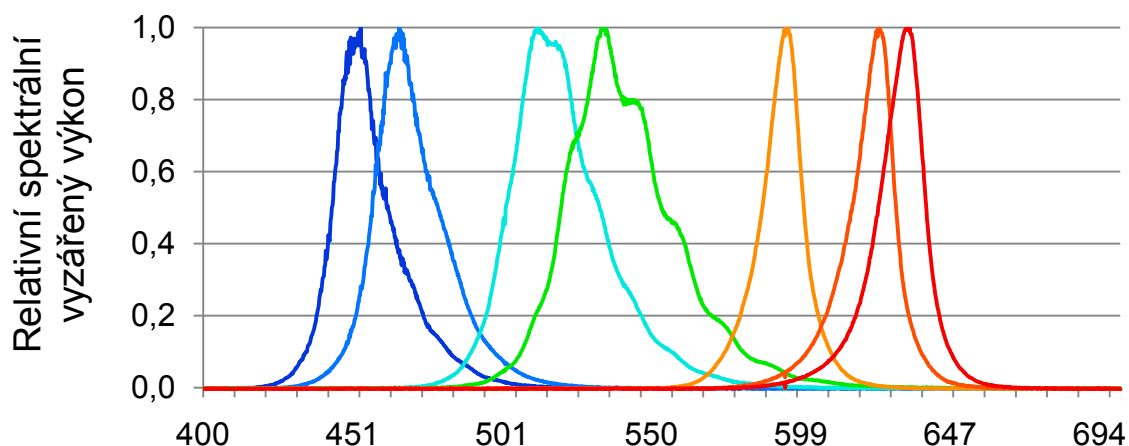
Tabulka 4 – Parametry testovaných LED v oblasti IR záření

Součástka	Popis	Typická $\lambda$ [nm]	Typický proud [mA]	Typický světelný tok [mCd/lm/mW]	Typ. pozor. úhel [°]	$V_f$ [V]
<b>OSA OPTO LIGHT</b>	 LED 0805					
OIS 170 880	<b>IR 880NM</b>	875	10	2,5 mW/sr	120	1,16
<b>VISHAY</b>	 LED 5 mm					
TSHG8200	<b>IR 830NM</b>	830	100	180 mW/sr	20	1,5
TSHA5502	<b>IR 3.2V</b>	875	100	30 mW/sr	48	1,5
TSHF5410	<b>IR 890NM</b>	890	100	70 mW/sr	44	1,4
TSAL7400	<b>IR 2.6V</b>	940	100	40 mW/sr	50	1,35
<b>KINGBRIGHT</b>	 LED 5 mm					
L-53F3BT	<b>IR 940NM</b>	940	20	30 mW/sr	30	1,2

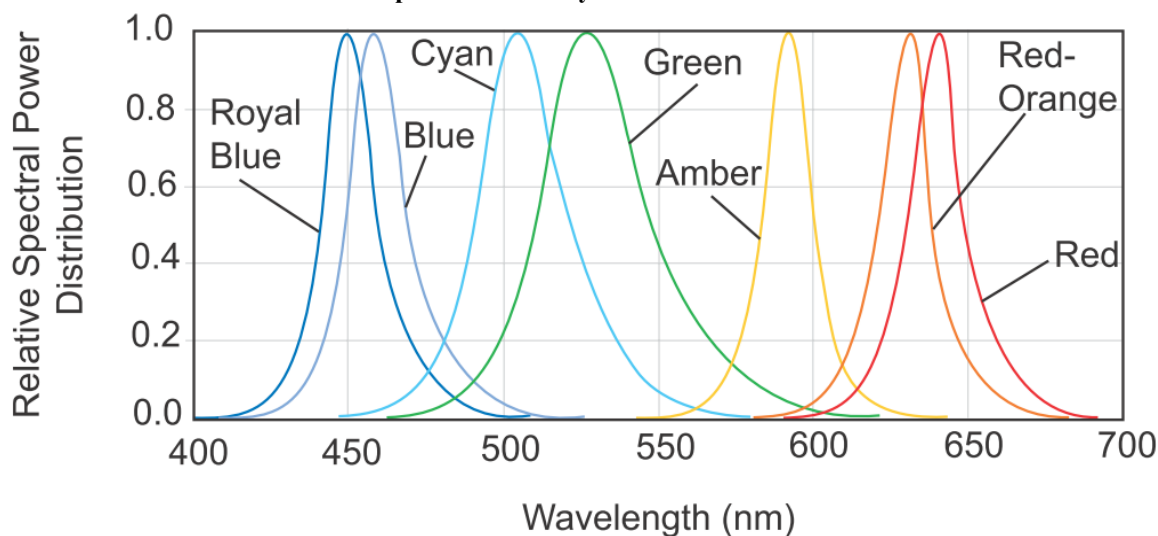
## 6 Výsledky měření

### 6.1 Skutečná spektra testovaných LED

Spektra téměř všech vzorků se vrcholovými hodnotami podle očekávání lišila od výrobcí udávaných hodnot jen v rozsahu udávané tolerance. Mimo toleranci pracuje pouze červeno-oranžová LED Rebel (min 613,5 nm; typ 617 nm; max 620,5 nm) s odchylkou 13,5 nm od hranice tolerance (naměřeno 634 nm).



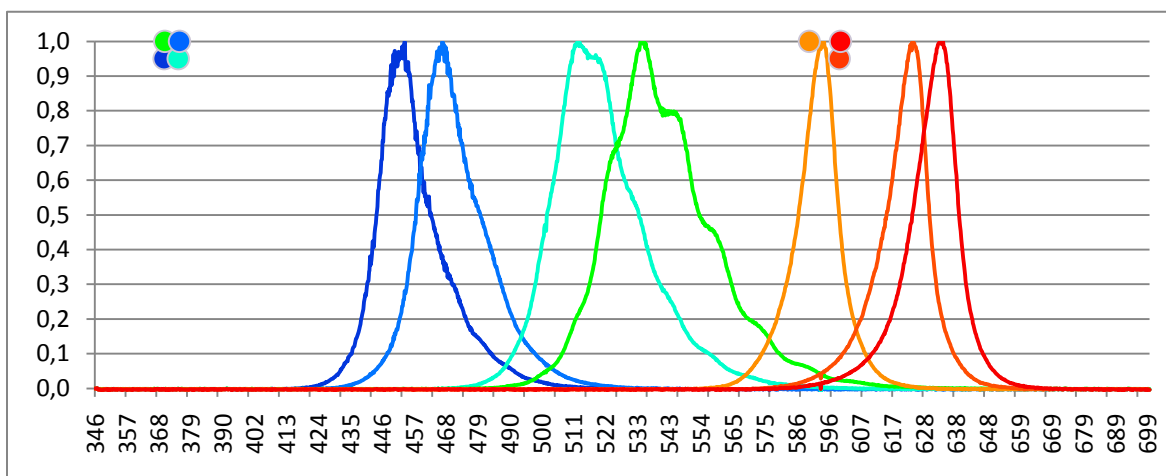
Obrázek 23 – Skutečná naměřená spektra LED řady Rebel



Obrázek 24 – Spektra LED řady Rebel udaná výrobcem Philips (zdroj: [www.philipslumileds.com](http://www.philipslumileds.com))

Naměřená spektra ostatních vzorků naleznete v příloze Příloha A – Skutečná naměřená spektra vzorků.

## 6.2 Odezva LED na jednotlivé vlnové délky



Obrázek 25 – Graf odezvy LED typu Rebel

Barevnými body jsou v grafu na Obrázek 25 vyznačeny vrcholy citlivostí daných barev při ozařování spektrálně úzkým paprskem spektrofotometru. Oproti očekávání, že vrcholy citlivostí budou ležet na stejné nebo blízké kratší vlnové délce charakteristické pro zářivý režim čipu se vrcholy citlivostí shlukují podle druhů použitých polovodičů<sup>4</sup>. V tomto smyslu se blíže předpokladu chovají IR LED. Odezvy mnoha vzorků není možné změřit s využitím spektrofotometru, neboť nejsou tak slabým zdrojem světla vybudeny.

Závislosti jednotlivých LED typu Rebel a naměřené odezvy ostatních vzorků naleznete v příloze „Příloha B – Odezvy LED na ozařování spektrálně úzkým paprskem s krokem 5 nm na 1 vzorek“.

## 6.3 Odezva LED typu Rebel na záření emitované LED stejné řady

Měření jsem provedl v následující konfiguraci: Vysílací LED napájená zdrojem konstantního proudu 400mA byla umístěná na chladiči ve vzdálenosti čipu 150 mm od čipu přijímací LED, oba ve výšce 20 mm nad deskou stolu. Prvky byly zakryty neprůsvitnou krabicí a měření bylo prováděno v temné místnosti.

Přes snahu vybrat LED se shodně účinnými čipy jsem se musel podřídit nabídce dodavatele a světelné toky odpovídající účinnosti se liší. Matematická normalizace podle známých účinností není možná, protože by teoreticky mohly být naměřeny hodnoty nasycených přechodů a další násobení či dělení výsledků pro korekci dle svítivosti vysílače by mohlo výsledek zkreslit. Stejně tak je předpoklad, že přijímací čip s jinou účinností by měl jinou účinnost generace napětí a tedy jinou odezvu než čip použitý.

Pro přesnější měření obecnějších závislostí čipů na barvě zářiče by bylo třeba změřit spektrálním analyzátozem spektra všech vysílacích LED při maximálním testovacím proudu, následně vypočítat integrál intenzit změřeného spektra, vybrat LED s nejmenším

<sup>4</sup> Sám výrobce dělí v katalogovém listu parametry pro čipy skupin královská modrá – zelená (InGaN) a jantarová – červená (AlInGaP).

integrálem a následně proudový zdroj nastavovat pro každou LED tak, aby se znovu měřený integrál intenzit všech vlnových délek spektra rovnal dříve vypočítanému nejmenšímu integrálu nejslabší LED. Tím bych eliminoval vliv různosti zářičů. Vliv přijímačů však dostupnými prostředky korigovat nelze. **Je tedy třeba výsledky tohoto měření považovat za platné pro konkrétní kombinace čipů!**

Zpracované výsledky měření jsou v tabulkách Tabulka 5 a Tabulka 6 s uvedenou nejistotou měření.



**Tabulka 5 – Napět'ová odezva LED Rebel na záření z LED Rebel**

U [mV]	±10 mV	Světelný tok [lm]	Přijímač									
			RB	B	C	G	A	RO	R	CW	NW	WW
Vysílač	RB	400 mW	1729	1665	1372	1186	298	449	44	1567	1396	888
	B	48	1504	1743	1401	1196	869	810	586	1123	415	24
	C	80	0	24	952	889	1133	1035	1049	0	0	0
	G	80	0	5	83	698	1182	1089	1143	0	0	0
	A	65	0	0	0	0	1192	1187	1201	0	0	0
	RO	85	0	0	0	0	1089	1155	1255	0	0	0
	R	85	0	0	0	0	1099	1192	1255	0	0	0
	CW	130	1548	1577	1206	1050	1270	1196	1240	1440	1284	351
	NW	130	1640	1616	1225	1054	1340	1201	1240	1572	1469	1201
	WW	95	1518	1538	1108	933	1231	1177	1221	1508	1416	1020

**Tabulka 6 – Proudová odezva LED Rebel na záření z LED Rebel**

I [nA]	±1 nA	Světelný tok [lm]	Přijímač									
			RB	B	C	G	A	RO	R	CW	NW	WW
Vysílač	RB	400 mW	7,3	107	232	248	0	0	0	2,9	0	0
	B	48	0	39,1	227	262	0	0	0	0	0	0
	C	80	0	0	0	7,8	12,2	12,2	4,9	0	0	0
	G	80	0	0	0	0	48,3	45,9	26,9	0	0	0
	A	65	0	0	0	0	51,3	254	116	0	0	0
	RO	85	0	0	0	0	6,3	365	357	0	0	0
	R	85	0	0	0	0	3,9	316	365	0	0	0
	CW	130	0,5	33,2	58,1	60,1	248	435	242	1	0	0
	NW	130	6,8	57,6	78,1	76,7	244	443	252	5,9	2,4	0
	WW	95	1,5	27,3	28,8	27	136	320	185	2,9	1	0

Z tabulek Tabulka 5 a Tabulka 6 vyplývá několik faktů:

1. Čipy LED jsou skutečně nejcitlivější poblíž své vlastní vlnové délky.
2. Bílé LED Rebel s luminoforem používají nejspíše čip barvy RB (královská modř) nebo s větší energií fotonu (krátkovlnější) – to vyplývá z nejlepší reakce na právě na testovaný čip barvy RB.
3. Při buzení přijímačů bílými LED s širokým spektrem je čip každé barvy dostatečně vybuzen a rozdíly v odezvách nejsou tak rozdílné jako u buzení jednobarevnou LED. Vliv na to má i vysoká svítivost vybraných bílých LED

## 7 Výrobek – senzor čáry pro robotiku

Jak již bylo řečeno v úvodu, hlavním impulsem k vývoji nového typu senzoru čáry byla potřeba senzoru schopného rozeznávat černou vodící čáru na tmavě modrém podkladu. To je nepříznivá kombinace pro běžně dostupné či konstruované senzory – většina pracuje na principu odrazu IR záření, které je černým i modrým nátěrem pohlcováno. Volba modrého podsvětlení senzoru vedla ke zjištění, že citlivosti dostupných optosnímačů v oblasti krátkých vlnových délek světla nejsou dobré. Rozdíl oproti fotodiodám či fototranzistorům je při využívání LED jako senzorů v tom, že PN přechod svítivé diody samotný se chová jako barevný filtr, takže v robotickém prostředí plném IR dálkoměrů je při použití modré LED eliminován vliv jiných měřidel. Citlivost LED na světlo také není velká, ale citlivost například modré LED na světlo stejného (modrého) čipu je výrazně větší, než na vlnové délky vzdálenější. Při ozáření plochy hřiště modrou LED se velká část světla odrazí na čip umístěný těsně vedle zářiče a vybudí na něm napětí. Od černé vodící čáry se odrazí minimum jakéhokoli světla a LED-senzor zůstává bez odezvy. Podobně bez odezvy je ozáření paprsky IR z jiného senzoru. Při použití IR zářiče a senzoru citlivého v IR oblasti by situace byla jiná. Při ozáření plochy hřiště IR LED se odrazí jen minimum záření na čip senzoru, ač umístěný těsně vedle zářiče, a prakticky jej nevybudí. Od černé vodící čáry se odrazí minimum jakéhokoli světla a senzor zůstává bez odezvy. Bez odezvy však nezůstane ozáření paprsky IR z jiného senzoru. Je tady jasně vidět důvod volby a výhody použití LED v režimu kdy přijímá energii světla a převádí ji na napětí. Měření proudu nebývá ve většině případů vhodné kvůli malému výkonu většiny LED jako elektrických zdrojů.

Ve výrobku je každý snímací prvek složen ze dvojice LED stejného typu a barvy (totožné nejsou pouze výrobními tolerancemi, v případě volných výrobních tolerancí je vhodné vybrat s podobnou skutečnou svítivostí, ale to platí u všech součástí při potřebě dosažení určité spolehlivosti a přesnosti). Jedna LED slouží jako osvětlení snímaného místa a druhá jako senzor. Na jedné desce pro snímání čáry jsou dva páry LED sloužící jako levý a pravý „doraz“. Soustava obsahuje celkem dvě takové snímací desky a jednu desku s řízením a převodem (driver). Na desce driveru jsou snímací LED anodami uzemněny a katodami připojeny na vstupy OZ MCP609 s povoleným nesymetrickým napájením do 7 V zapojeného jako komparátor s trimrem nastavitelnou rozhodovací úrovní od 0 V do 2,5V. Podsvětlovací LED jsou napájeny z 5V do katody a všemi anodami jsou přes rezistor 17  $\Omega$  zapojeny na drain FET tranzistoru spínaného externě logickým vstupem. Na gate tranzistoru je spínací napětí přiváděno přes odporový dělič s trimrem, kterým můžeme nastavit svítivost LED od nuly po maximální povolené provozní podmínky. Výstup komparátoru napájeného ze sítě logického napájení navazujících obvodů je možno připojit přímo na vstup logického obvodu, nebo lépe přes Schmidtův klopný obvod. Stejně tak je možné na výstup OZ zapojit přímo signalizační LED či jiné prvky s nižším odporem, neboť maximální povolený proud výstupem OZ je 30 mA a v rozsahu správného napájecího/připojeného napětí je vnitřně limitován. (Pozn.: Chybné připojení desky senzorů k driveru v žádné kombinaci nezpůsobí poškození ani jedné desky.)

Schéma je umístěno v příloze „Příloha D – Senzor čáry: schéma“.  
Další dokumentace následuje v příloze „Příloha E – Senzor čáry: DPS a FOTO“.

## **8 Závěr**

### **8.1 Dosažení cílů**

Podařilo se mi změřit požadované závislosti LED na příjmu různých vlnových délek záření, velikosti napěťové i proudové odezvy, navrhnul a sestrojil jsem měřicí zařízení, které zadáno nebylo, ale bylo nutné k dosažení nutné citlivosti pro měření proudů v řádech piko ampér. Pro ověření použitelnosti poznatků a podporu správnosti měření jsem navrhnul a vyrobil zařízení využívající LED jako zdroje světelného záření i jako senzoru světelného záření. Jedná se o senzor čáry určený pro robotiku. Obsahuje dvě senzorické desky plošných spojů osazené vždy levým a pravým „dorazem“ kolem šířky čáry, tedy 4 senzory bezproblémově využívající LED v režimu snímání.

Pro nedostupnost potřebných přístrojů nebyly změřeny některé zamýšlené závislosti zcela, měření pomocí buzení LED spektrofotometrem nejsou přesná, neboť jsem se při měření pohyboval na hranici citlivosti měřících přístrojů a na hranici citlivosti testovaných součástek samotných. Improvizace na přístrojích určených pro zcela odlišné úkoly byla náročná, přesto jsem se snažil dosáhnout co nejvěrohodnějších měření několikanásobným ověřováním prvotních měření.

### **8.2 Ověření předpokladů**

Měření mají větší informační hodnotu, než jsem očekával. Mnoho vzorků totiž nevykazuje předpokládaný průběh odezvy, tedy překrývající se průběh spektra vyzařovaného světla s průběhem spektrální citlivosti, ale na charakteristice jsou výrazné:

1. posuvy vlnové délky citlivosti od vlnové délky vyzařované (TSHA5502, Rebel),
2. několikanásobné vrcholy citlivosti oproti předpokládanému jednomu (TSHG8200, OF-SMD3020R),
3. úplná necitlivost i při experimentálních neoficiálních měřeních při vyšší intenzitě záření.

Ne všechna měření tedy vedla k potvrzení předpokladů – většinou se jednalo o součástky experimentálně prověřené na vyšších intenzitách záření a při dosažitelné intenzitě během měření nebylo možné změřit parametry vzorku. Dále se předpoklady liší kvůli odlišné konstrukci čipu LED od obecných koncepcí.

### **8.3 Použitelnost LED jako senzorů světla**

LED tedy lze používat jako senzory, ale je třeba respektovat specifické vlastnosti jednotlivých konstrukčních provedení čipů LED. Rozhodně tu existuje určitá úzkopásmovost v citlivosti na různé vlnové délky, ta je pro LED charakteristická oproti

spektrálně relativně široké citlivosti fotodiod a ostatních fotocitlivých prvků. Každé provedení čipu má však i v tomto směru velké odlišnosti.

Z grafů v příloze Příloha B – vyplývá, že čipy řady Rebel od královské modré po zelenou, mají sice jinou svítivou barvu, ale jejich odezva je téměř shodně nejlepší na 370-375 nm, což je oblast UV. Podobně reaguje skupina jantarová až červená z toho jantarová má vrchol citlivosti na 590,00 nm a červeno-oražová s červenou shodně na 600,00 nm.

## Literatura

**BEN. 2006.** *Elektrotechnická měření.* [editor] Hana Züglerová. Praha : BEN, 2006. str. 256. ISBN 80-7300-022-9.

**Frohn, Manfred, a další. 2006.** *ELEKTRONIKA polovodičové součástky a základní zapojení.* [překl.] Jiří Nobilis a Vlastislav Kazda. Praha : BEN, 2006. str. 480. ISBN 80-7300-123-3.

**Heřman, Josef, Trinkewitz, Zdeněk a autorů, kolektiv. 2008.** díl 2, Elektrické světelné zdroje. [autor knihy] kolektiv autorů. *Elektrotechnické a telekomunikační instalace.* 2008.

**Lipták, Jan a Sedláček, Josef. 2005.** Materiály pro optoelektroniku. *Úvod do elektronických materiálů.* Praha : ČVUT, 2005.

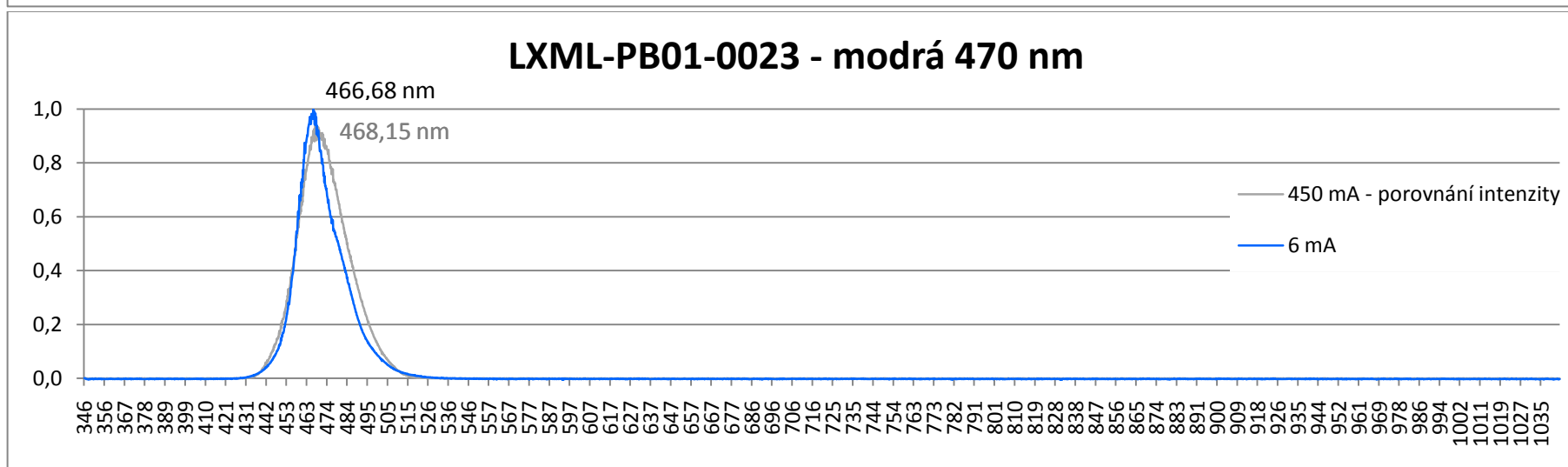
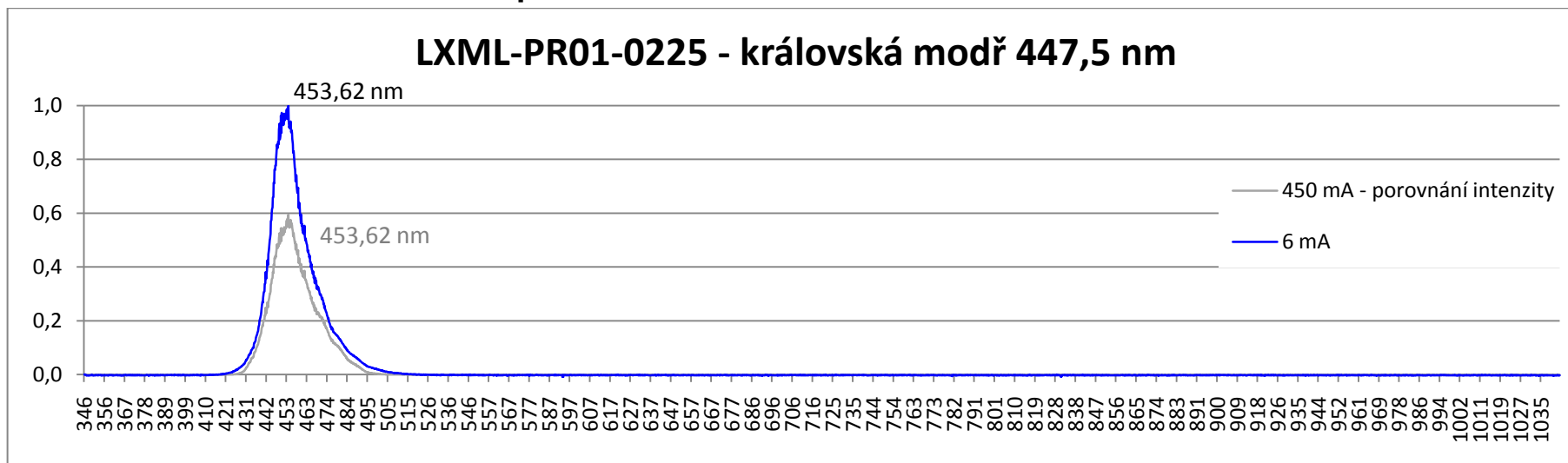
**Sochor, Václav. 1990.** *Lasery a koherentní svazky.* Praha : Academaca, 1990. str. 196. ISBN 80-200-354-1.

**Voves, Jan a Kodeš, Jiří. 1995.** *Elektronické součástky nové generace.* místo neznámé : GRADA Publishing, s.r.o., 1995. ISBN 80-7169-142-9.

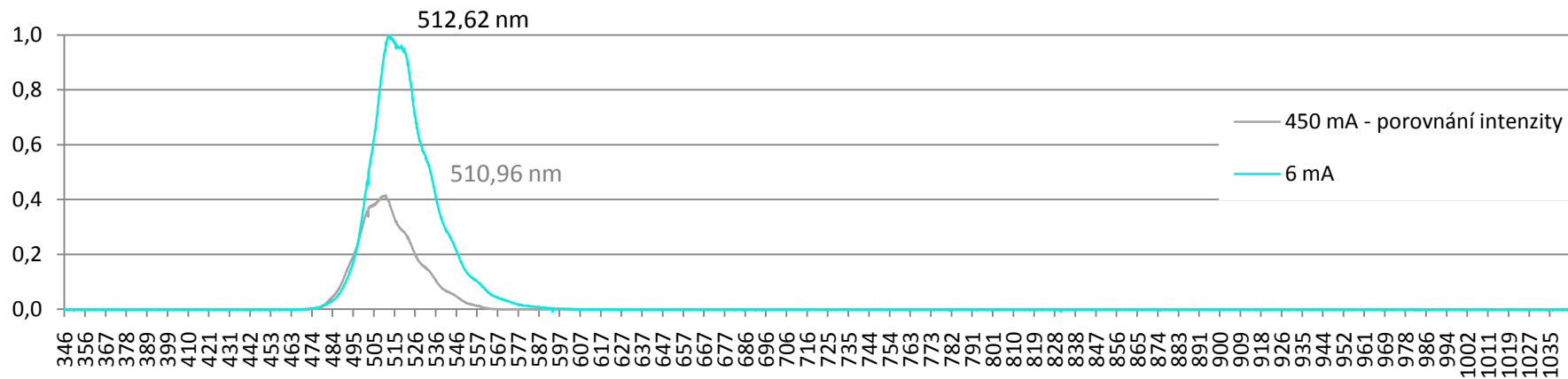
## Seznam příloh

- Příloha A – Skutečná naměřená spektra vzorků
- Příloha B – Odezvy LED na ozařování spektrálně úzkým paprskem
- Příloha C – nA a mV metr: schéma
- Příloha D – Senzor čáry: schéma
- Příloha E – Senzor čáry: DPS a FOTO
- Příloha F – FOTO

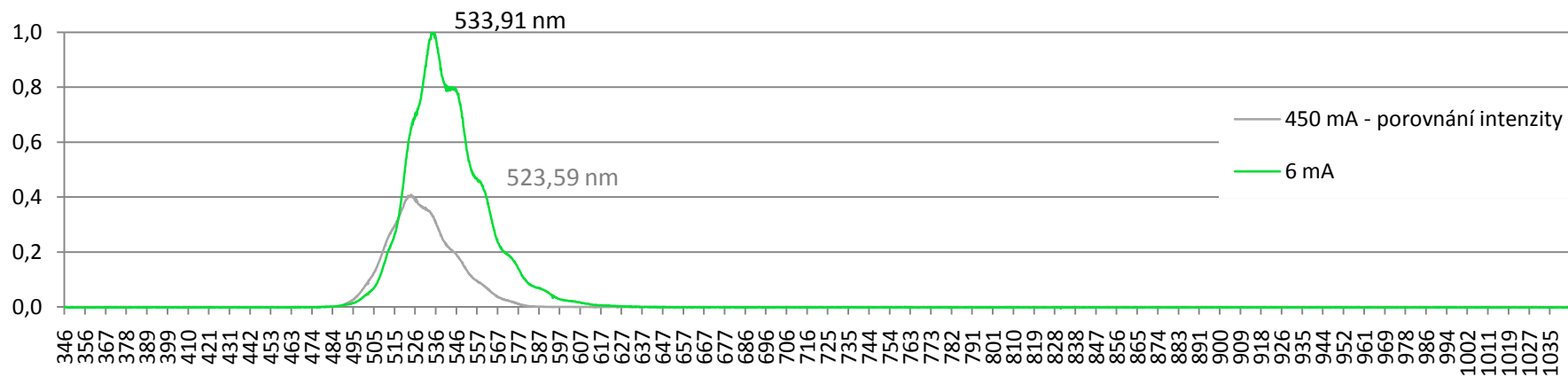
## Příloha A – Skutečná naměřená spektra vzorků



### LXML-PE01-0040 - azurová 505 nm

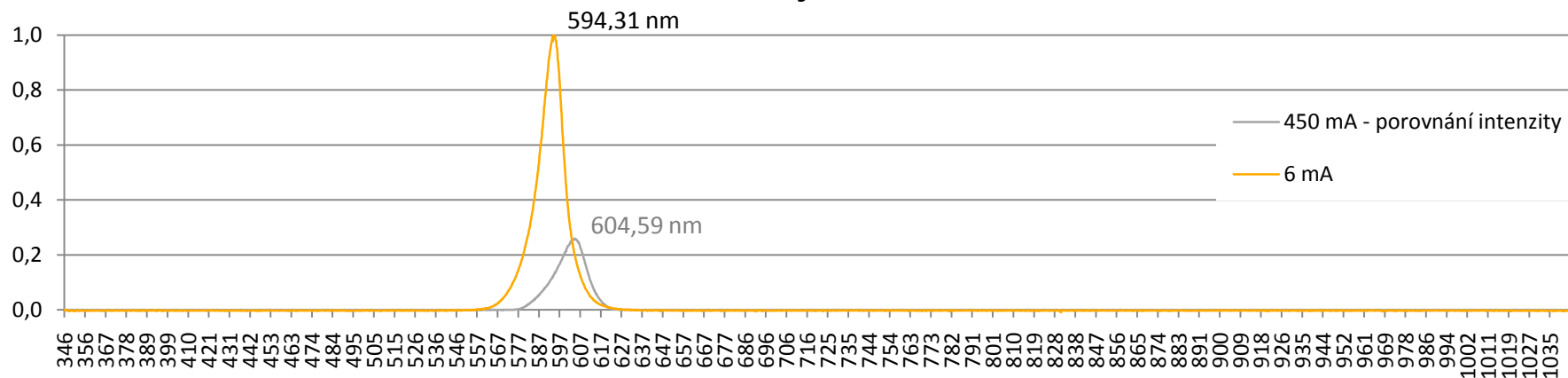


### LXML-PM01-0040 - zelená 530 nm

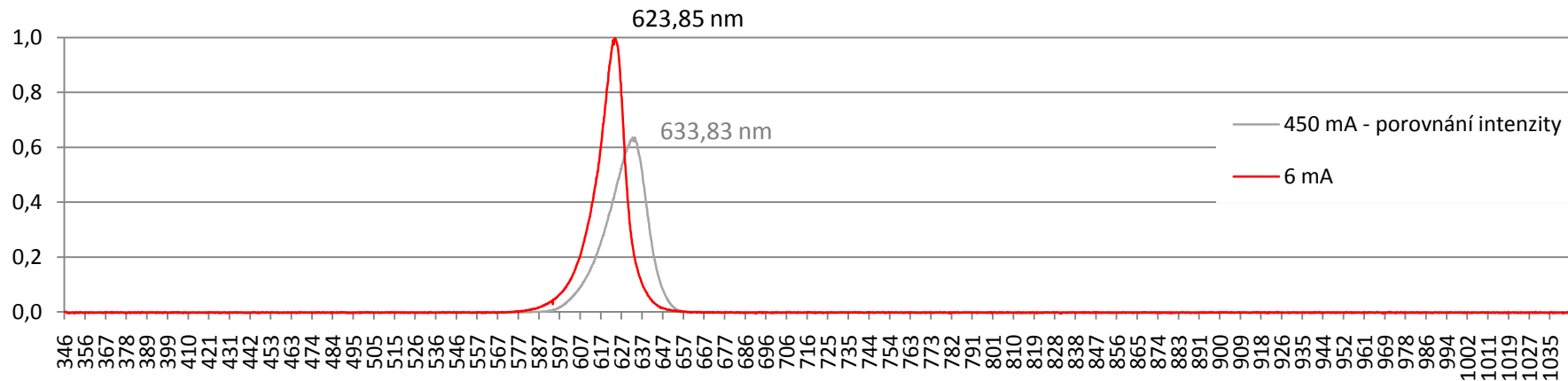




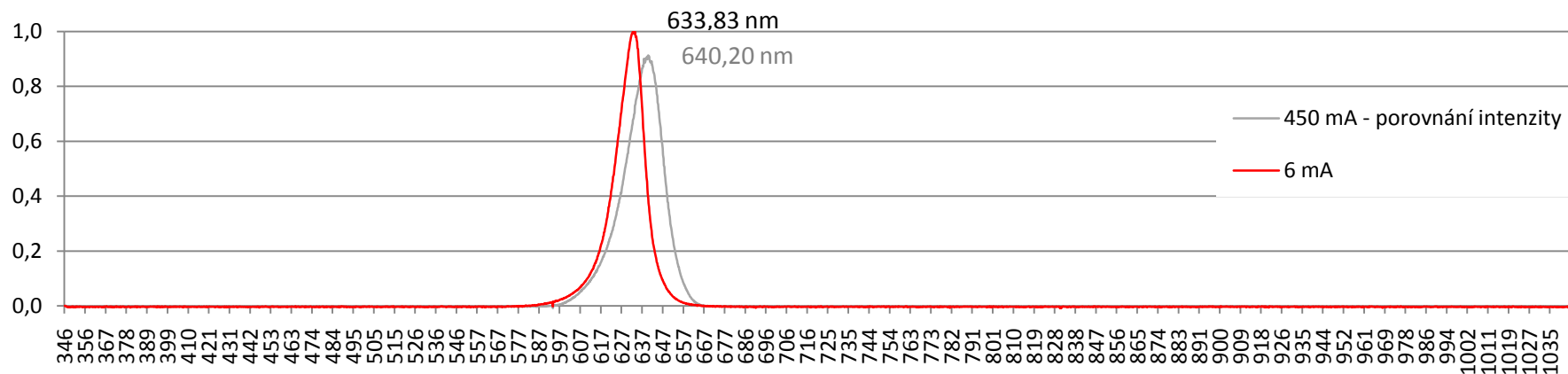
### LXML-PL01-0030 - jantarová 590 nm



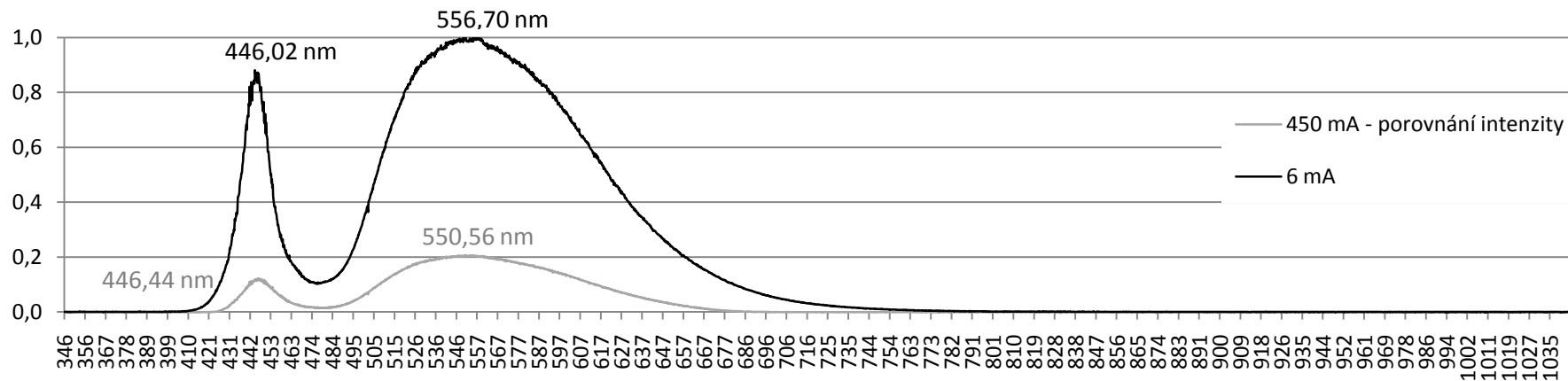
### LXML-PH01-0040 - červeno-oranžová 617 nm



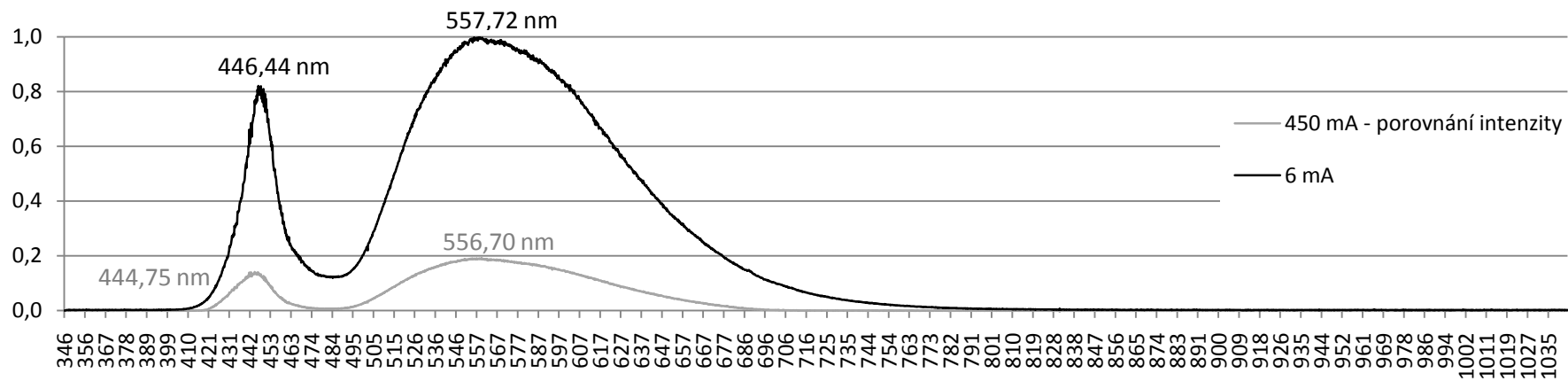
### LXML-PD01-0040 - červená 627 nm



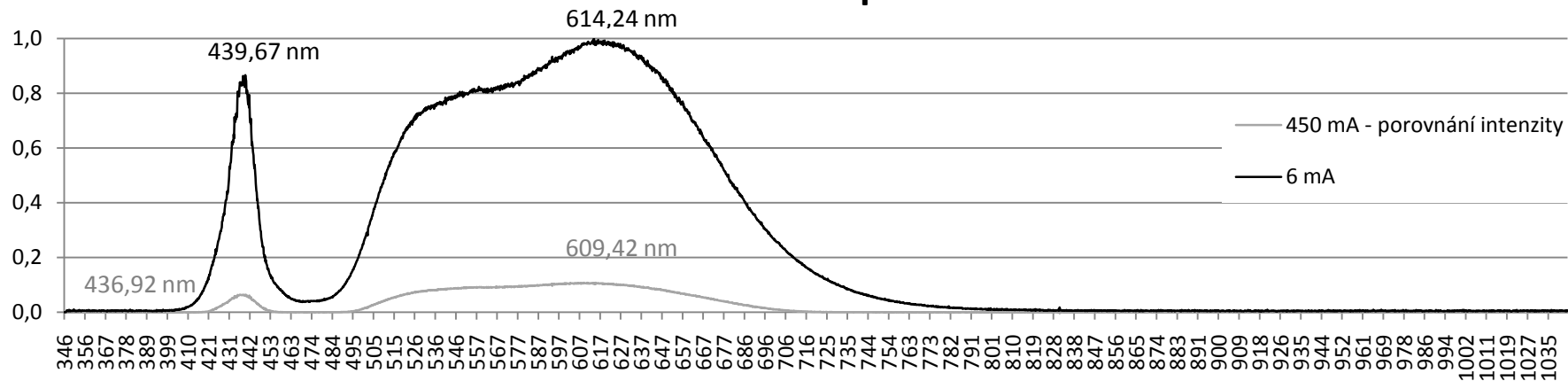
### LXML-PWC1-0070 - studená bílá 6500 K



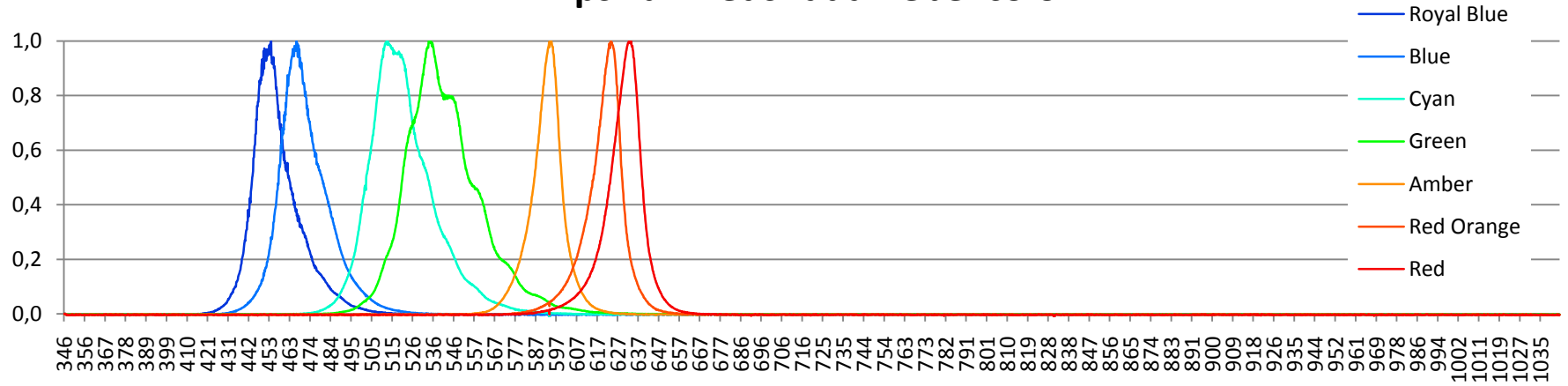
### LXML-PWN1-0070 - neutrální bílá 4100 K



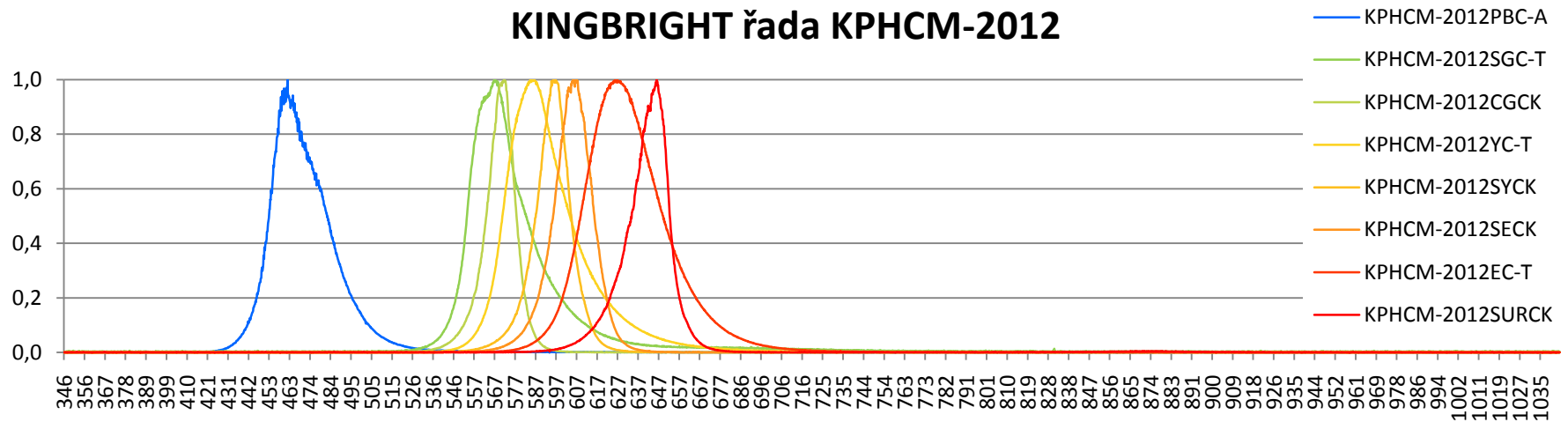
### LXML-PWW1-0050 - teple bílá 3100 K



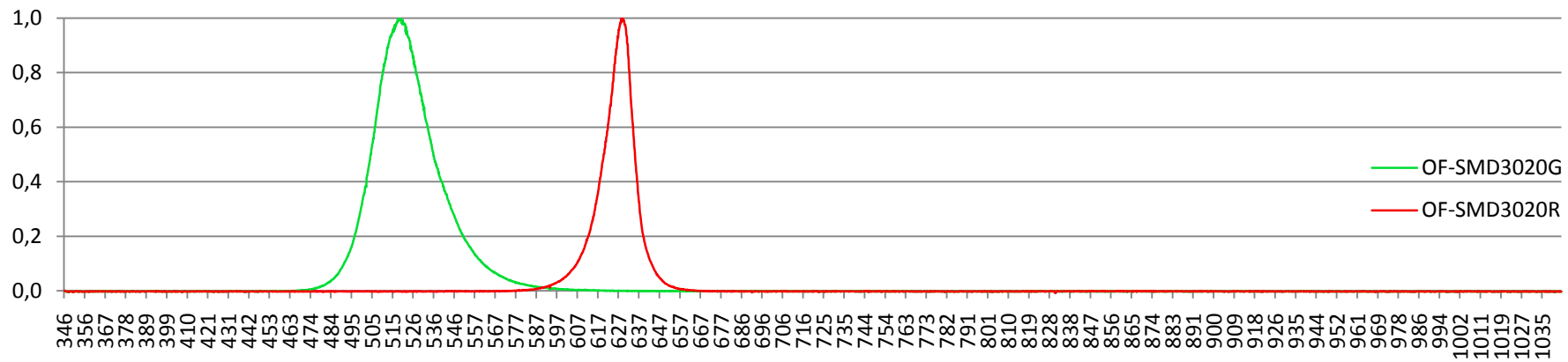
### Philips Lumileds řada Rebel color



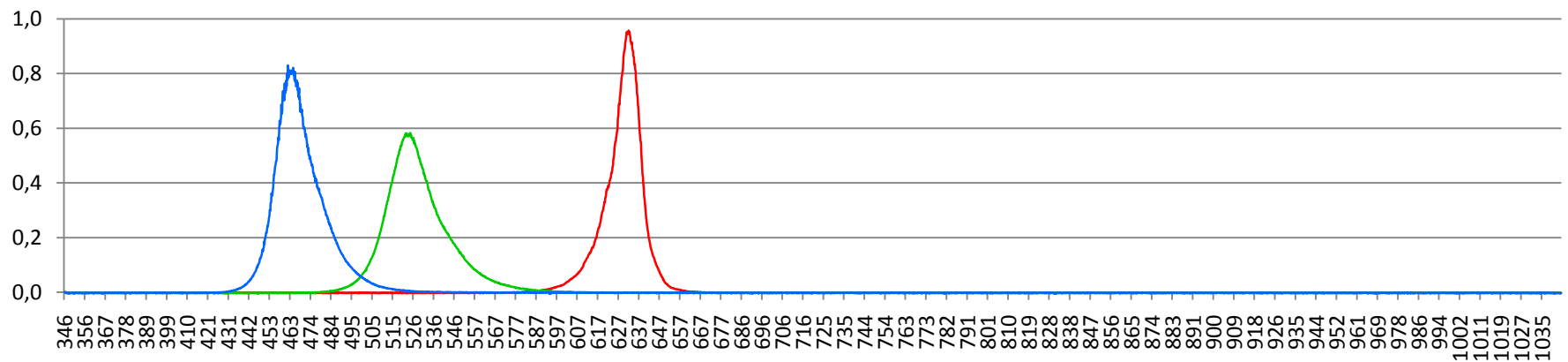
### KINGBRIGHT řada KPHCM-2012



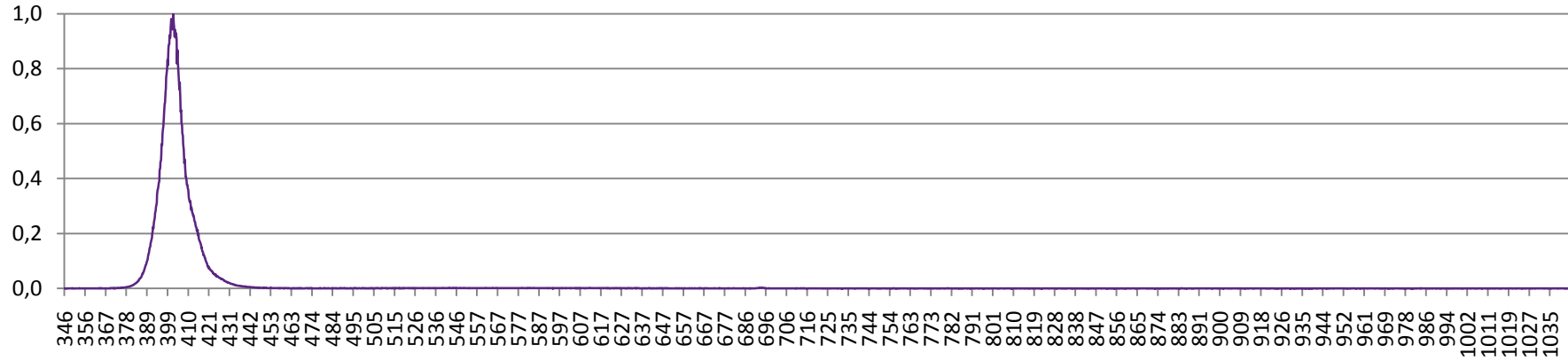
### OPTOFLASH řada OF-SMD3020



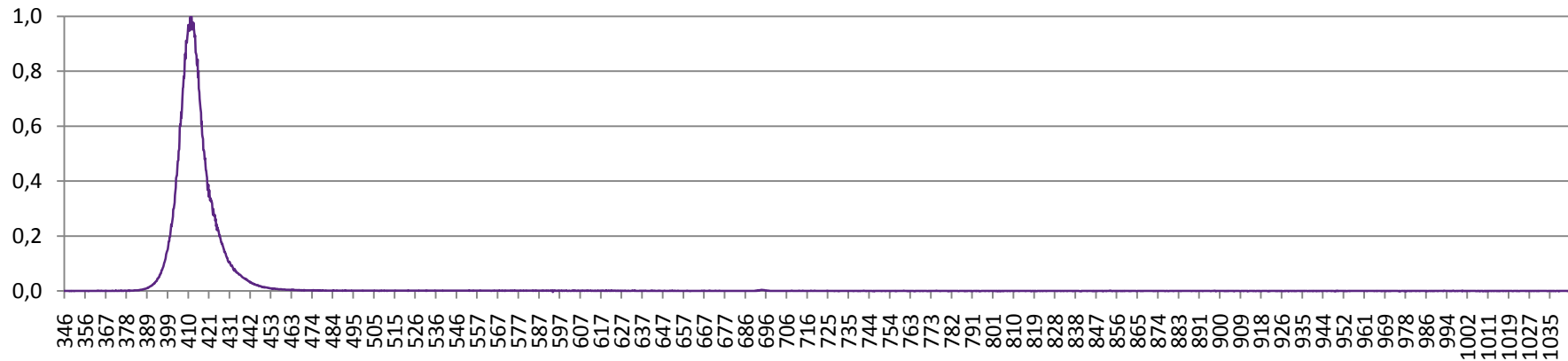
### ASMT-QTB0-0AA02 - RGB - Porovnání intenzit



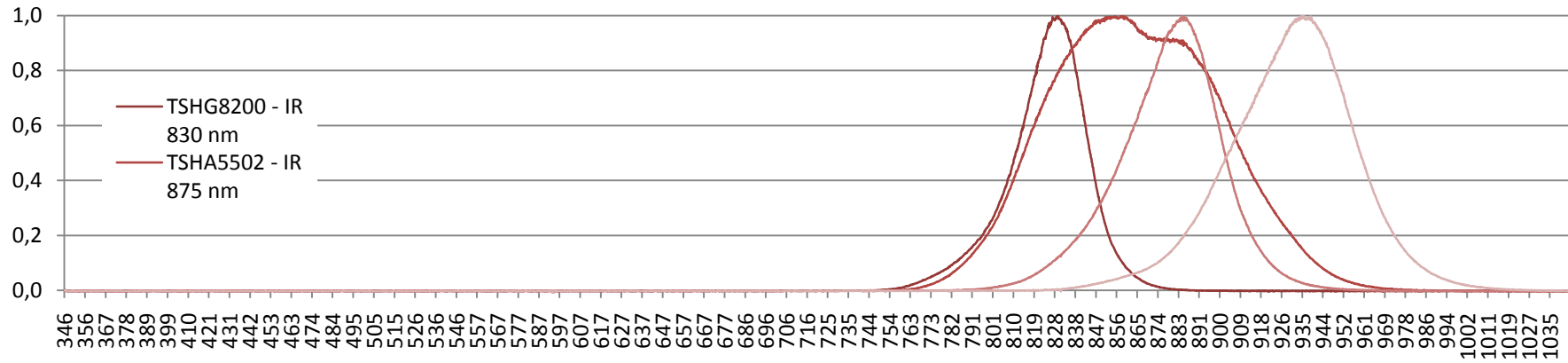
### OSA OPTO LIGHT - OCU 400 403 OS - UV 403 nm



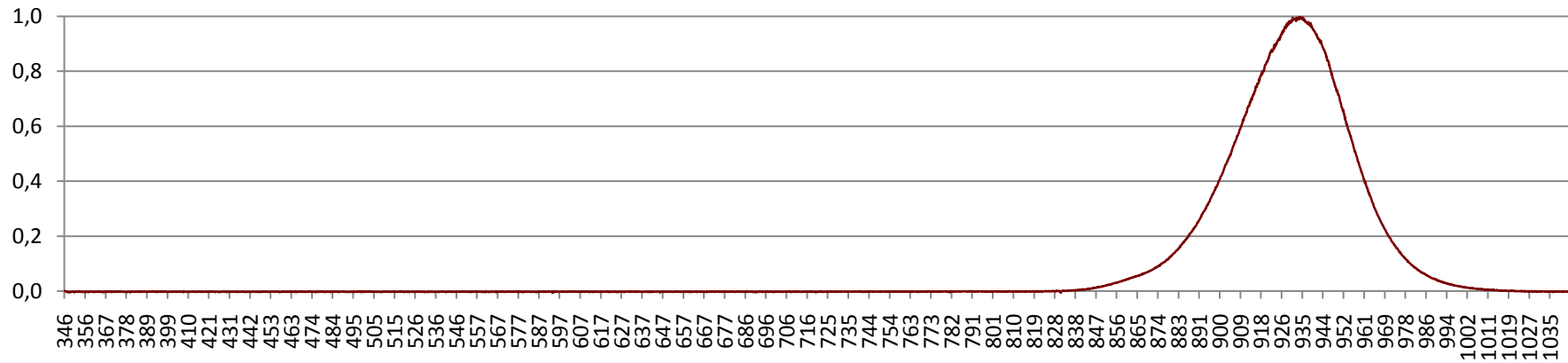
### OSA OPTO LIGHT - OCU 400 411 OS - UV 411 nm



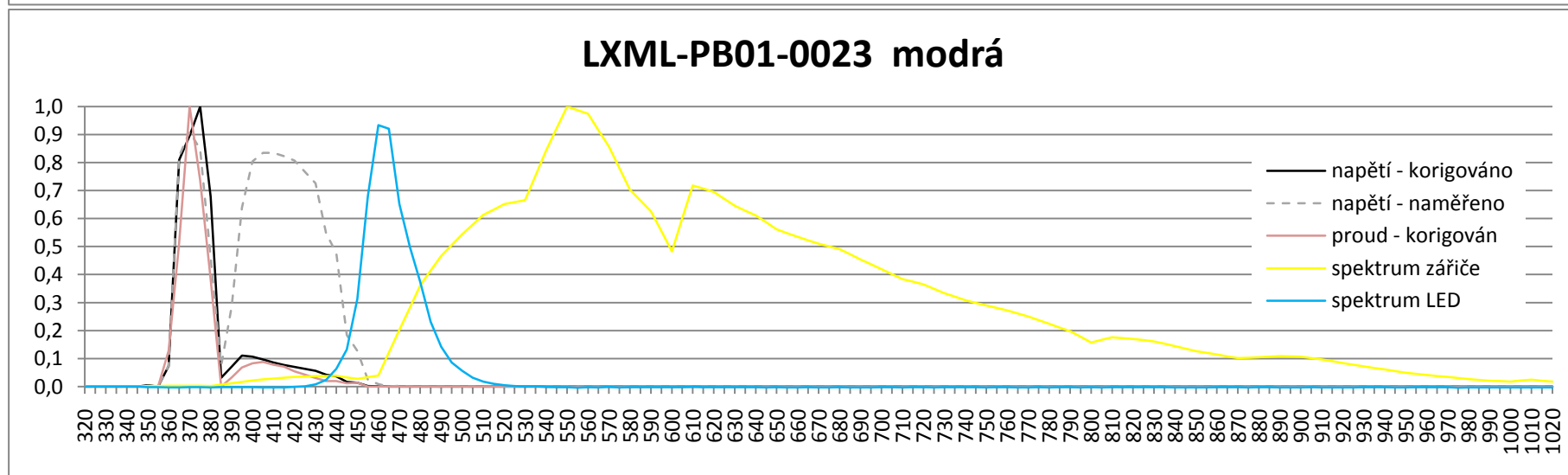
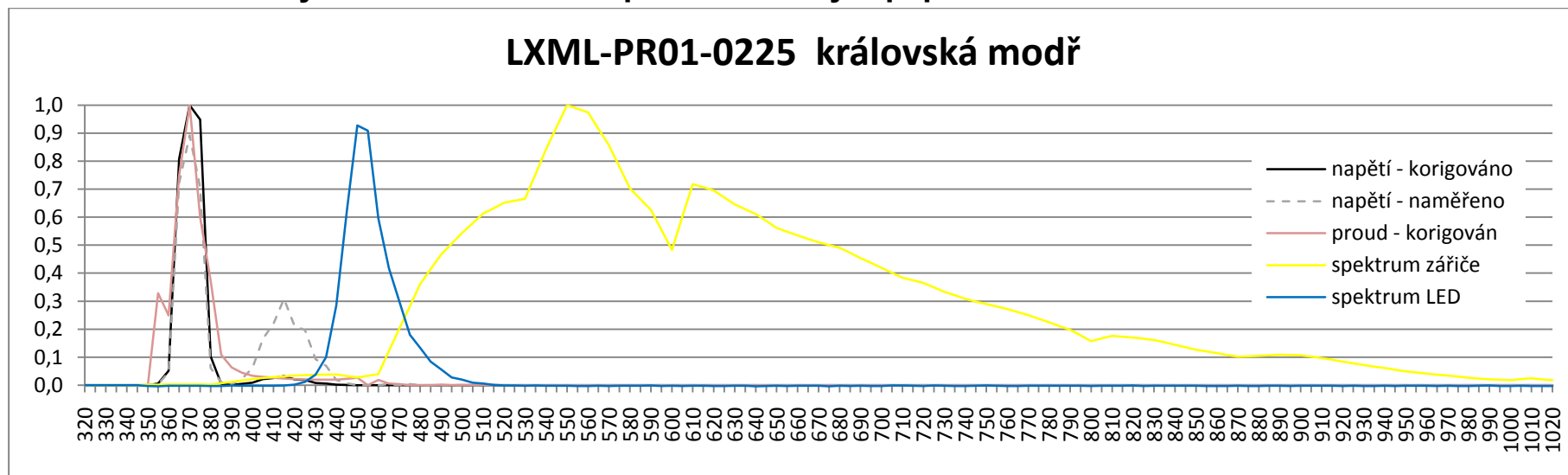
## VISHAY SEMICONDUCTOR



## Kingbright - L-53F3BT - IR 940 nm s filtrem



## Příloha B – Odezvy LED na ozařování spektrálně úzkým paprskem s krokem 5 nm na 1 vzorek

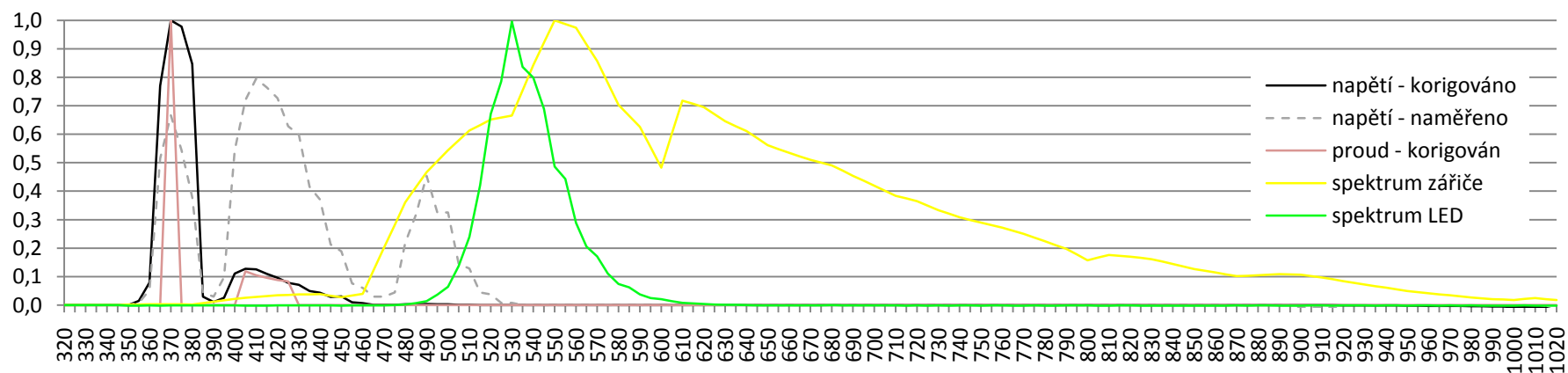




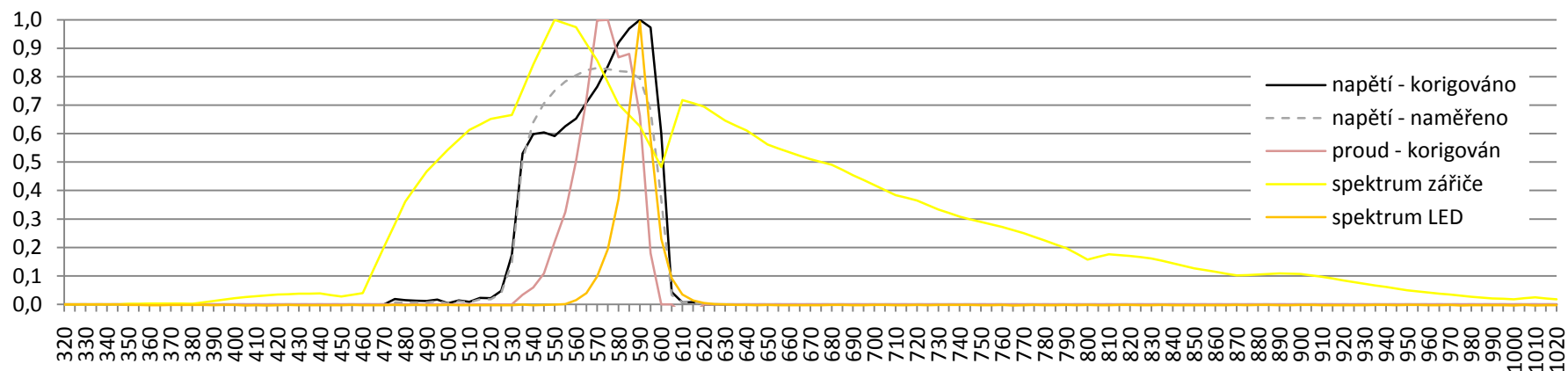
### LXML-PE01-0040 azurová



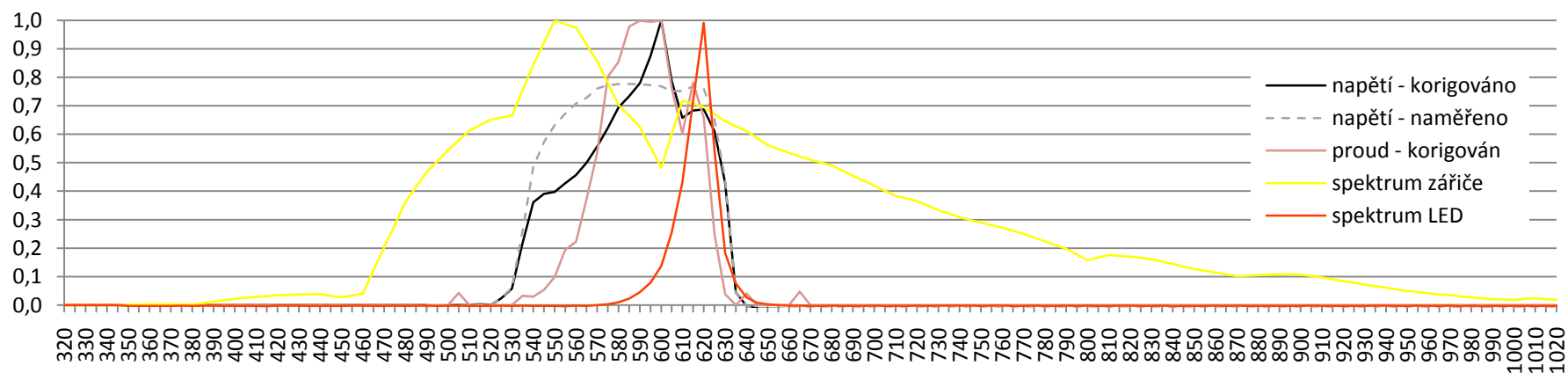
### LXML-PM01-0040 zelená



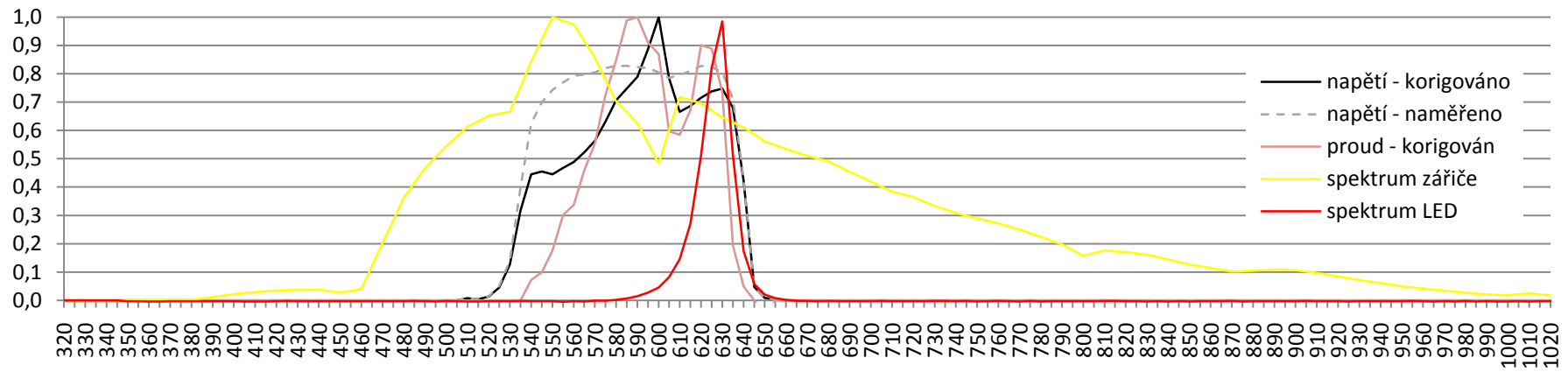
### LXML-PL01-0030 jantarová



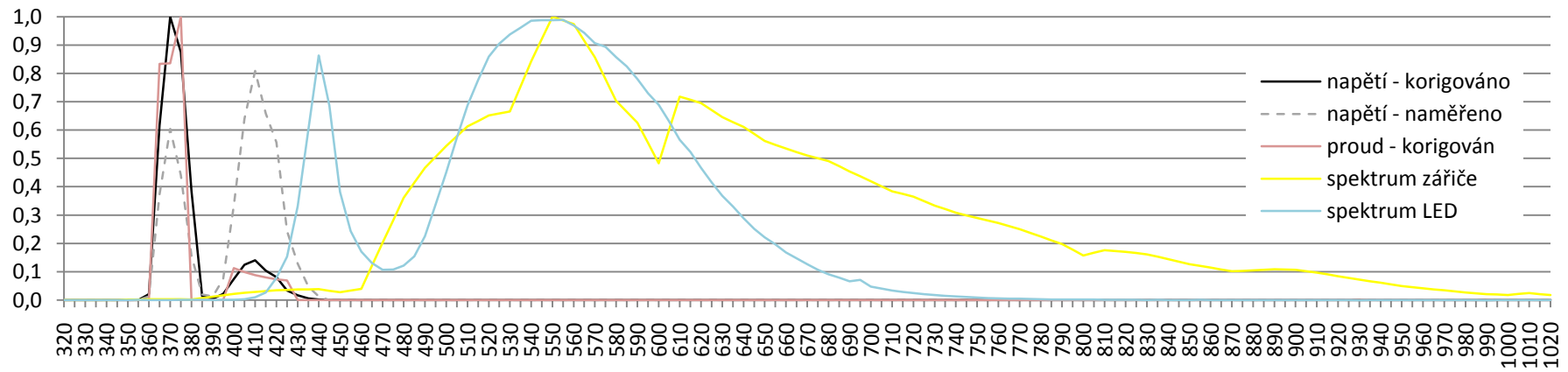
### LXML-PH01-0040 červeno-oranžová



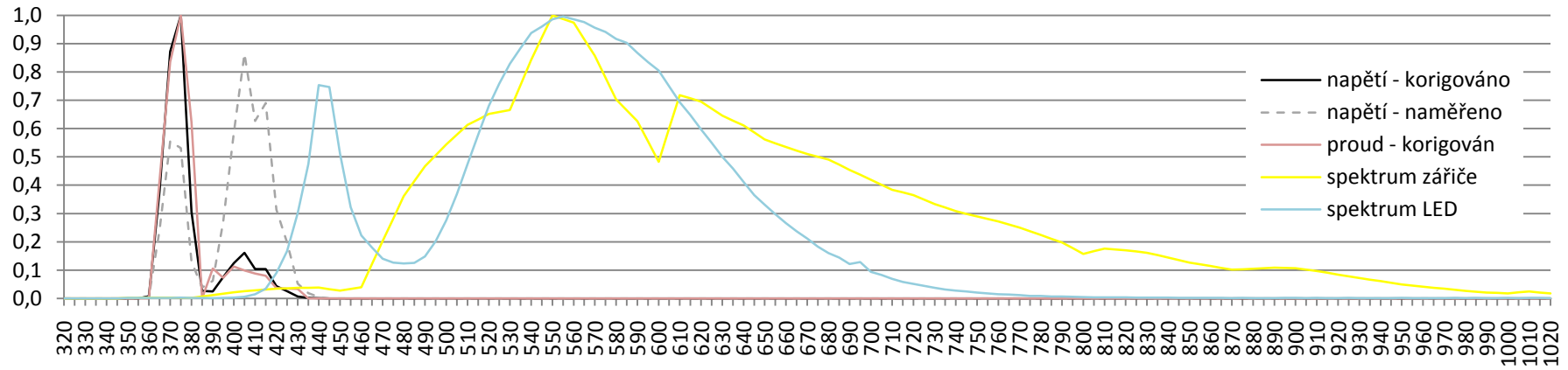
### LXML-PD01-0040 červená



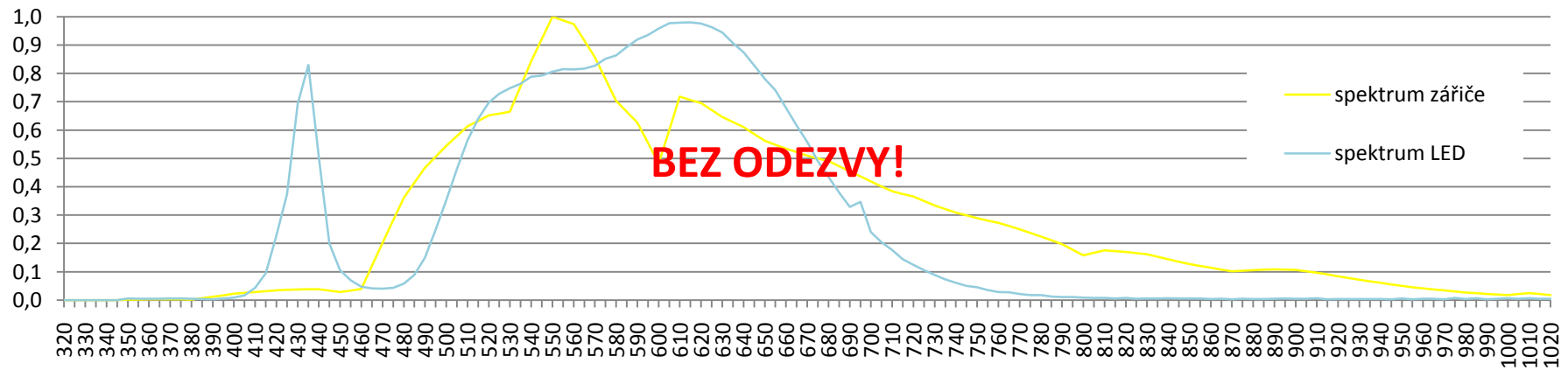
### LXML-PWC1-0070 studená bílá



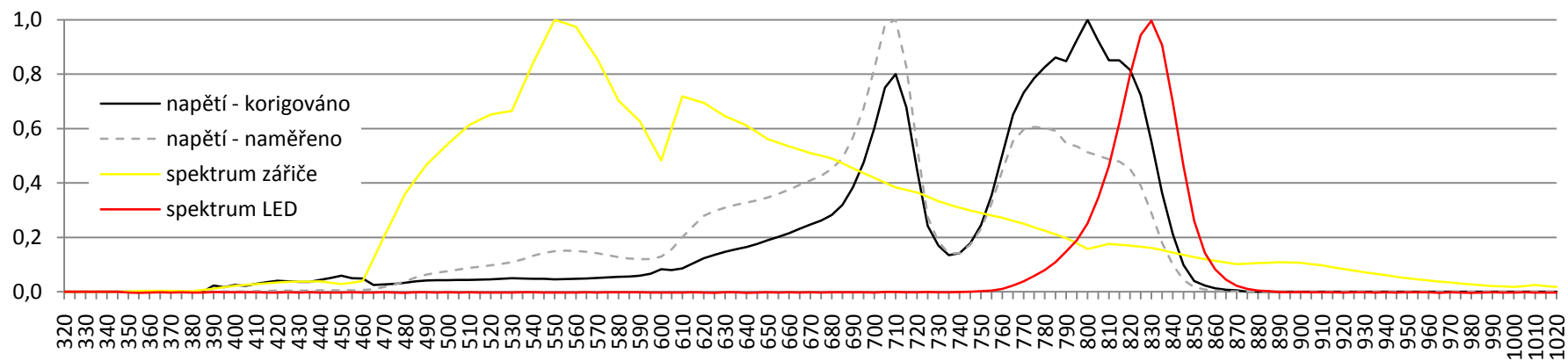
### LXML-PWN1-0070 neutrální bílá



### LXML-PWW1-0050 teplá bílá



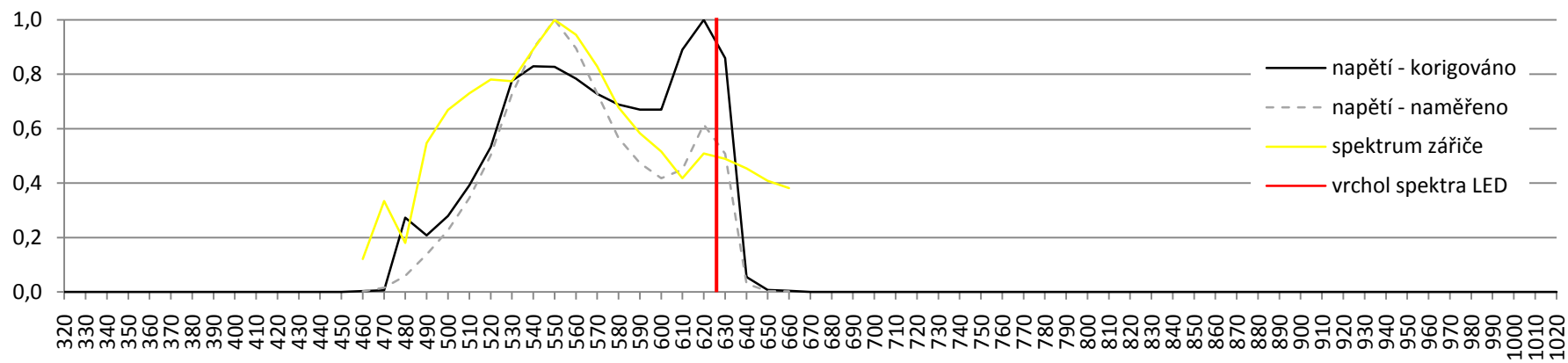
### TSHG8200 IR 830 nm



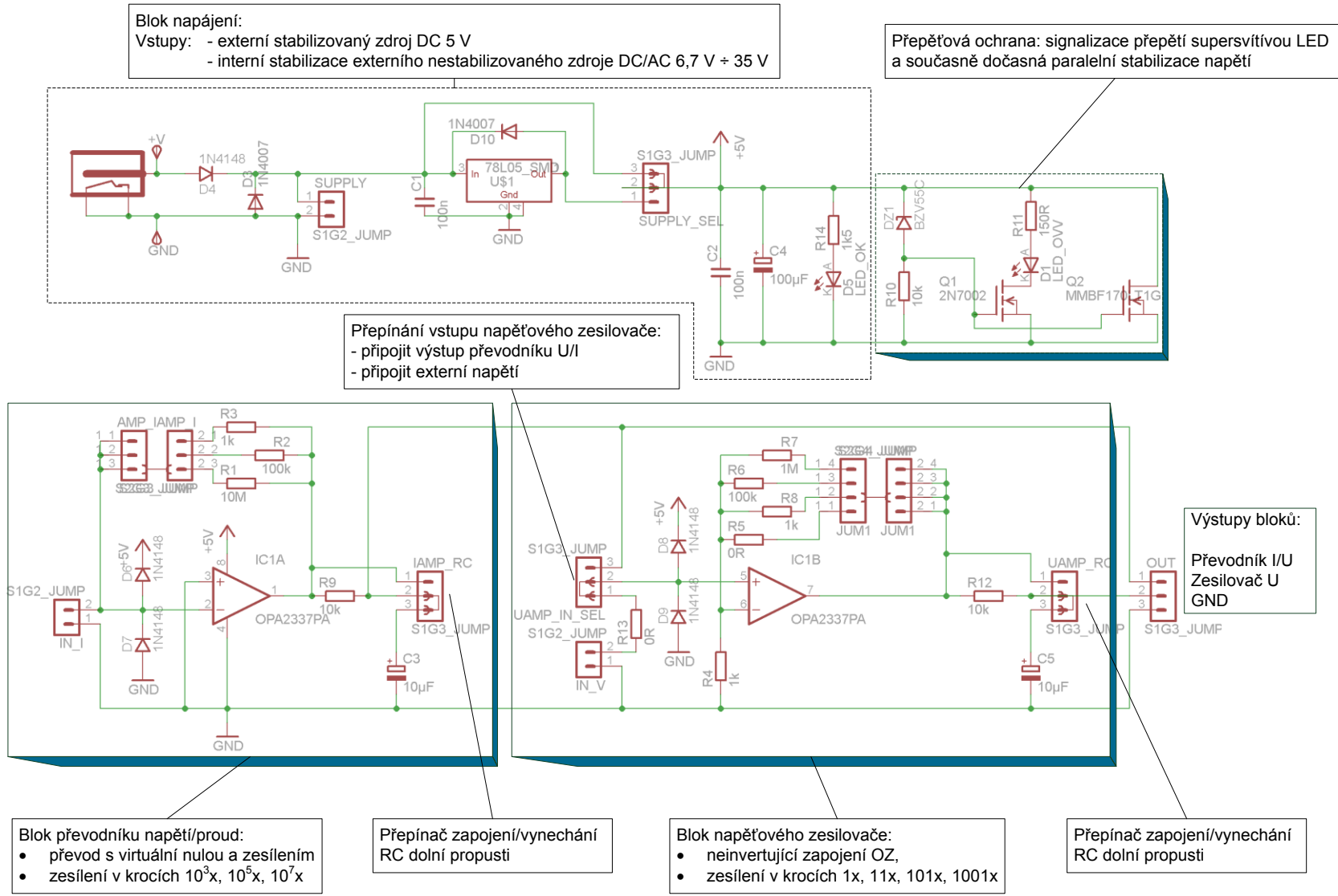
### TSHA5502 IR 875 nm



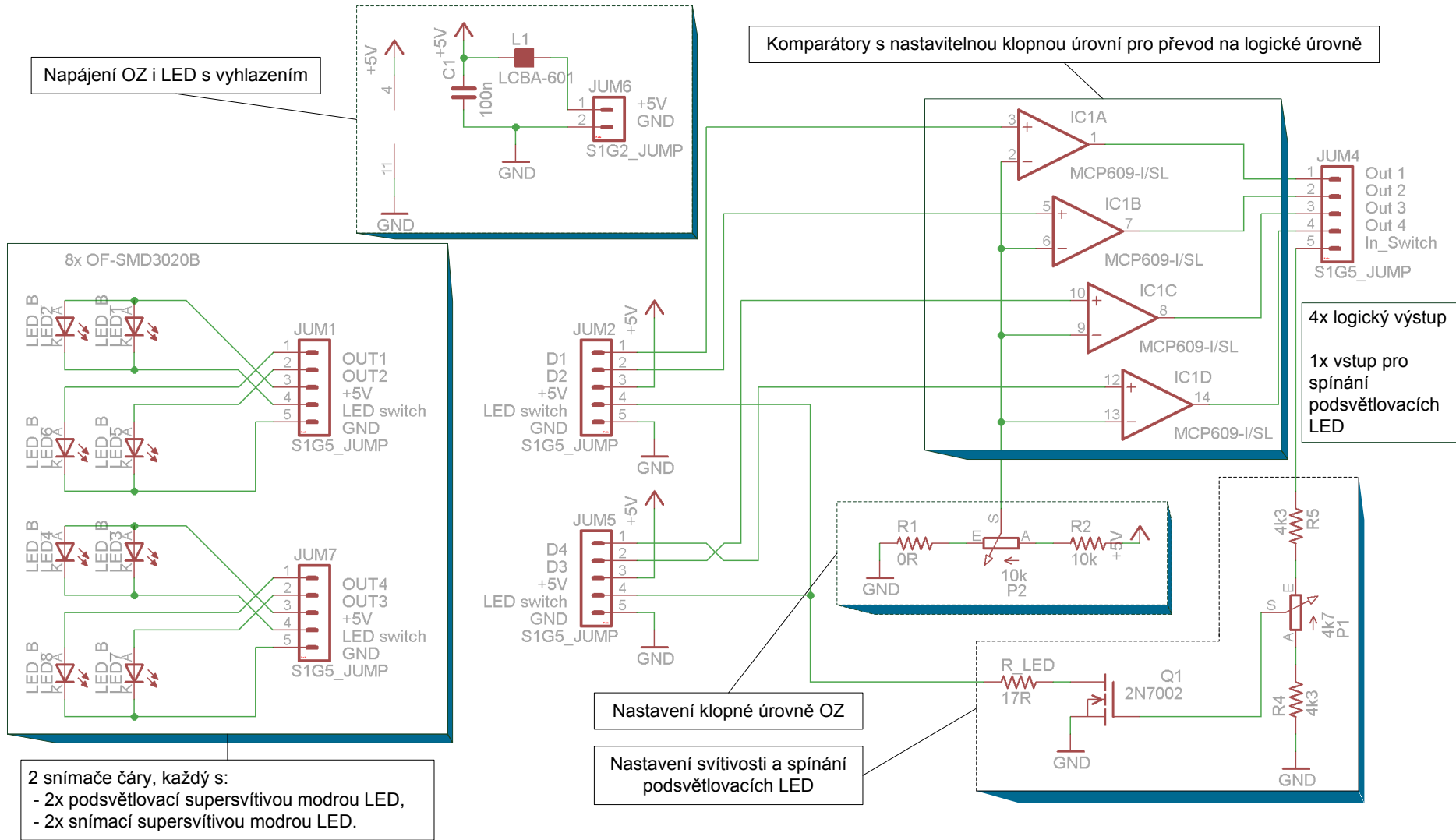
# OF-SMD3020R červená 624 nm



## Příloha C – nA a mV metr: schéma

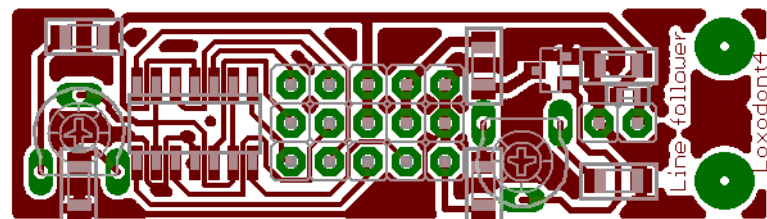


# Příloha D – Senzor čáry: schéma

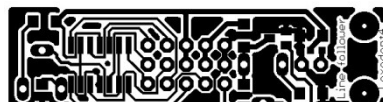




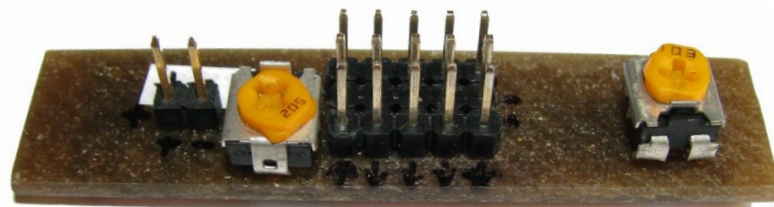
## Příloha E – Senzor čáry: DPS a FOTO



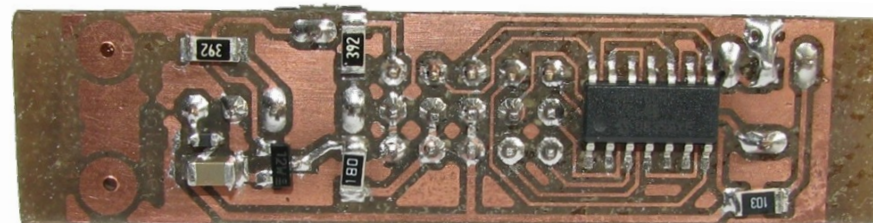
Obrázek 28 – Senzor čáry – osazovací schéma



Obrázek 30 – Senzor čáry – předloha 1:1



Obrázek 26 – Senzor čáry – řídicí deska – strana součástek



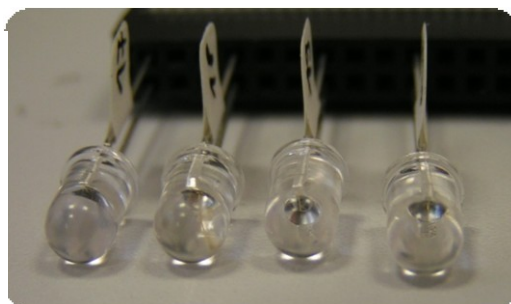
Obrázek 27 – Senzor čáry – řídicí deska – strana spojů



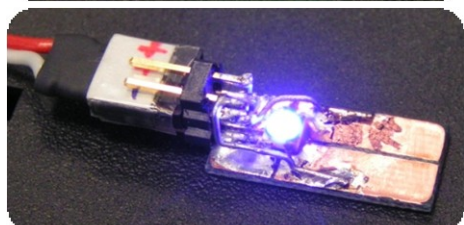
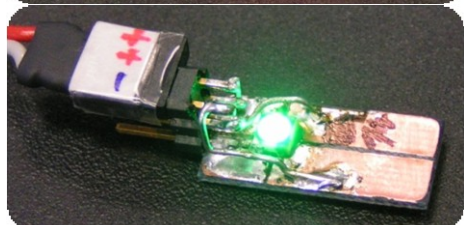
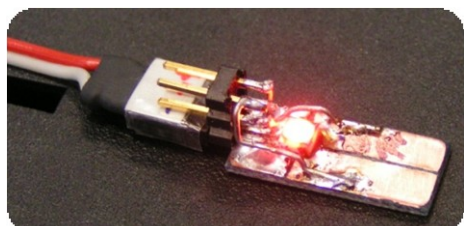
Obrázek 29 – Senzor čáry – deska s 4x LED

## Příloha F – FOTO

Vzorky  
v pořadači



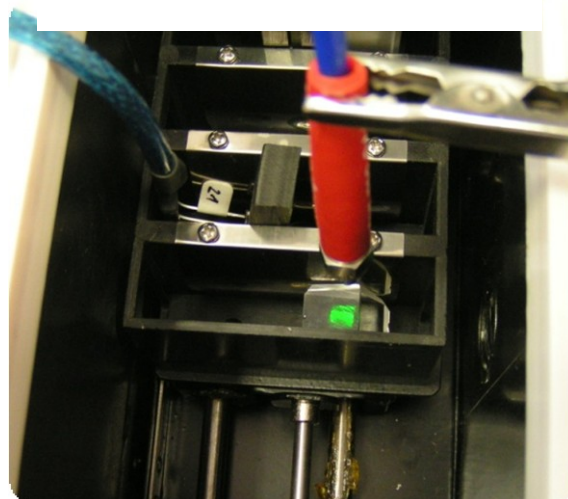
IR LED



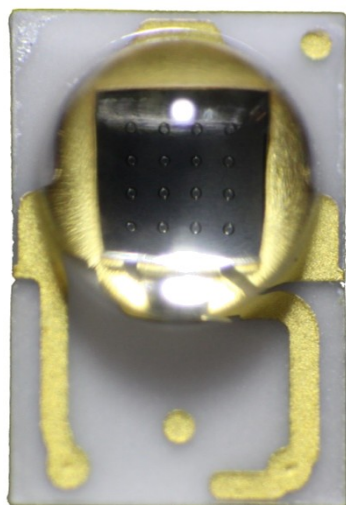
ASMT-QTB0-0AA02 – RGB



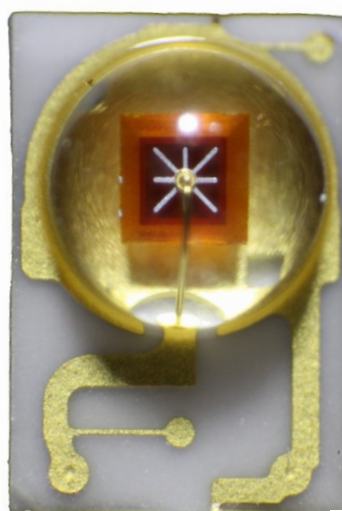
Upnutí vzorku



Měření spektra zářiče



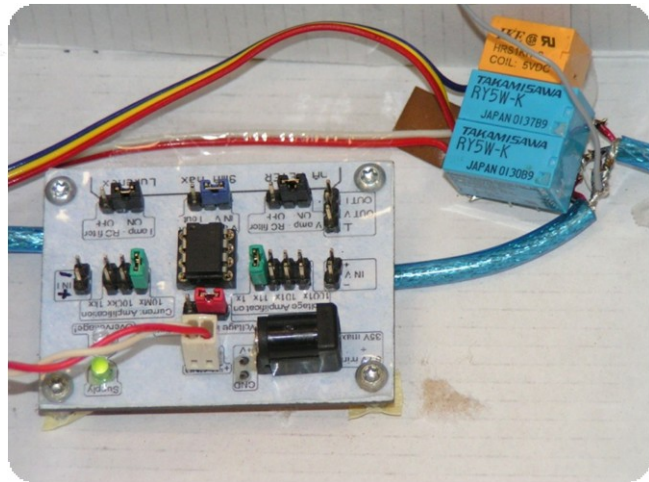
Luxeon Rebel – azurová



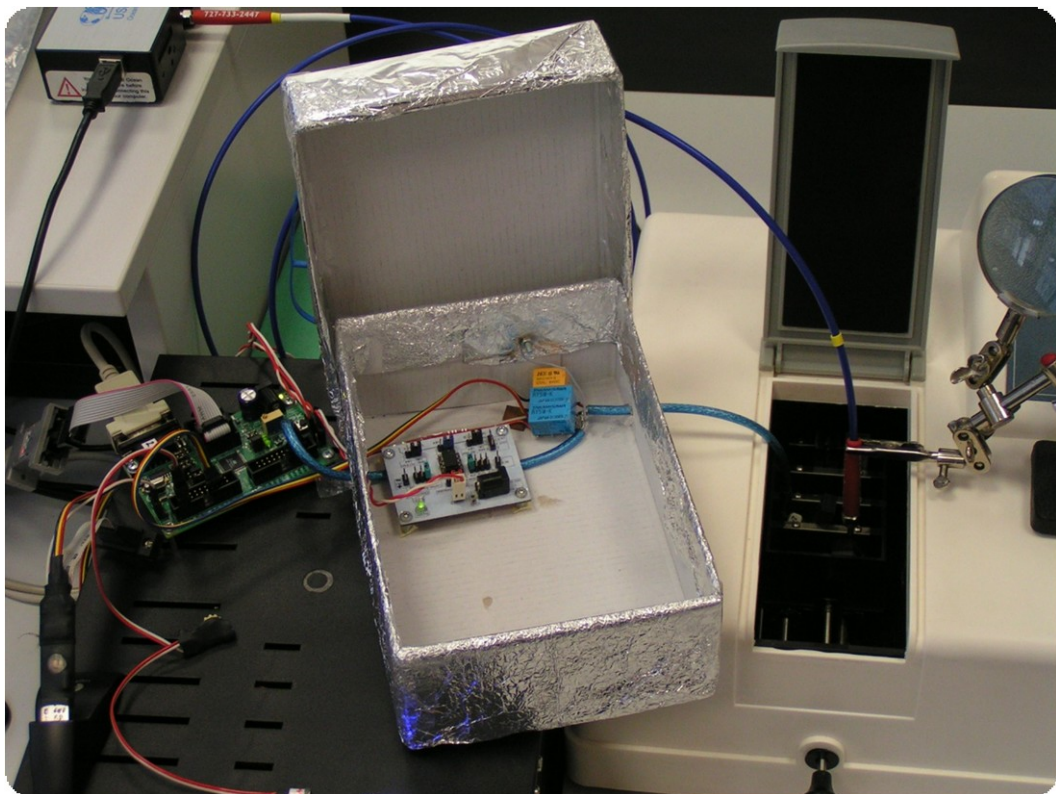
Luxeon Rebel – červená



Spektrometr USB4000



nA & mV metr



Měřicí soustava: digitální  $\mu$ P deska  $\leftarrow$  nA & mV metr  $\leftarrow$  LED  $\leftarrow$  spektrofotometr

## Errata