



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**Fakulta elektrotechnická  
Katedra mikroelektroniky**

**Hybridní tištěná elektronika na flexibilních substrátech**

**Flexible hybrid printed electronics**

Bakalářská práce

Studijní program: Elektronika a komunikace

Vedoucí práce: Ing. Alexandr Laposa

**Milan Chvalina**

**Praha 2019**





# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Chvalina** Jméno: **Milan** Osobní číslo: **465954**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávající katedra/ústav: **Katedra mikroelektroniky**  
Studijní program: **Elektronika a komunikace**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Hybridní tištěná elektronika na flexibilních substrátech**

Název bakalářské práce anglicky:

**Flexible Hybrid Printed Electronics**

Pokyny pro vypracování:

1. Zpracujte rešerši na téma hybridní tištěná elektronika na flexibilních substrátech.
2. Na základě získaných znalostí navrhnete postup přípravy hybridních elektronických obvodů a realizujete Vámi zvolený testovací obvod, na kterém demonstrujete funkční kombinaci flexibilních tištěných vodivých spojů a součástek typu SMD.
3. Realizovaný testovací obvod charakterizujete, analyzujete dosažené výsledky a optimalizujete proces přípravy.
4. Zhodnotte dosažené výsledky, proveďte jejich srovnání a diskutujte další postup.

Seznam doporučené literatury:

- [1] W. Zapka, Ed., Handbook of Industrial Inkjet Printing. 2017, ISBN 9783527687169.
- [2] H. A. Andersson et al., "Assembling surface mounted components on ink-jet printed double sided paper circuit board," Nanotechnology, vol. 25, no. 9, 2014.
- [3] H. Andersson, J. Sidén, V. Skerved, X. Li, and L. Gyllner, "Soldering Surface Mount Components Onto Inkjet Industrial Processes," IEEE Trans. Components Packag. Technol., vol. 6, no. 3, pp. 478–485, 2016.
- [4] X. Li, H. Andersson, J. Sidén, and T. Schön, "Soldering surface mount components on screen-printed Ag patterns on paper and polyimide substrates for hybrid printed electronics," Flex. Print. Electron., vol. 3, no. 1, 2018.
- [5] G. Tong, Z. Jia and J. Chang, 'Flexible Hybrid Electronics: Review and Challenges,' 2018 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), Florence, 2018, pp. 1-5.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Alexandr Laposa, katedra mikroelektroniky FEL**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **08.02.2019** Termín odevzdání bakalářské práce: **24.05.2019**

Platnost zadání bakalářské práce: **20.09.2020**

Ing. Alexandr Laposa  
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta





## **Prohlášení**

**„Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.“**

V Praze dne 12.3.2019

.....

Milan Chvalina



## **Poděkování**

Děkuji svému vedoucímu práce Ing. Alexandru Laposovi za vstřícnost a užitečné rady. Dále bych chtěl poděkovat své partnerce, rodině a přátelům za jejich podporu a péči. Zvláštní poděkování potom patří Daliboru Dobešovi a Bc. Vojtěchu Povolnému za veškerou jejich pomoc. Dále bych chtěl poděkovat doc. Duškovi a Ph.D. Bouřovi za jejich cenné rady a čas.





## **Abstrakt**

*Tato práce se věnuje podstatě hybridní flexibilní elektroniky, jejím aplikacím a porovnává její výhody a nevýhody s elektronikou na pevném substrátu pomocí demonstrativního výrobku.*

Klíčová slova: Flexibilní hybridní elektronika, tištěná elektronika, elektronika

## **Abstract**

*This thesis is dedicated to the gist of flexible hybrid electronics, its applications and is comparing its advantages/disadvantages with the electronics on a rigid substrate by way of demonstration.*

Key words: Flexible hybrid electronics, printed electronics, electronics



# Obsah

<b>1 Úvod</b>	<b>1</b>
1.1 Cíle práce . . . . .	3
<b>2 Tištěná elektronika</b>	<b>5</b>
2.1 Podstata tištěné elektroniky . . . . .	5
2.2 Aplikace PE . . . . .	10
2.2.1 Osvětlení . . . . .	10
2.2.2 Organická/anorganická fotovoltaika . . . . .	11
2.2.3 Displeje . . . . .	12
2.2.4 Integrované smart systémy . . . . .	13
<b>3 Flexibilní hybridní tištěná elektronika</b>	<b>15</b>
3.1 Podstata flexibilní hybridní elektroniky . . . . .	15
3.2 Aplikace FHE . . . . .	18
3.2.1 Napájecí zařízení . . . . .	18
3.2.2 Chytré povrchy . . . . .	20
3.2.3 Chytrá balení . . . . .	21
<b>4 Praktická část</b>	<b>23</b>
4.1 Návrh obvodu v editoru Clewin . . . . .	24
4.2 Tiskárna Dimatix DMP 2831 . . . . .	25
4.2.1 Základní informace k tiskárně . . . . .	25
4.2.2 Průběh přípravy k tisku . . . . .	28
4.3 Způsoby montáže SMD součástek na substrát . . . . .	31
4.4 Fixace součástek . . . . .	39
4.5 Demonstrace hybridní elektroniky a návrhy pro další optima- lizaci . . . . .	40
<b>5 Závěr</b>	<b>47</b>
<b>A Sady pro testování metod montáže na substrát</b>	<b>55</b>
<b>B Funkční obvody s LED a předřadným rezistorem</b>	<b>59</b>
<b>C Schémata zapojení a seznam použitých součástek</b>	<b>60</b>

## Seznam obrázků

1	Koncepce propojených měst a domácností, převzato z: [1][2]	2
2	Uplatnění PE v blízké budoucnosti, převzato z: [5]	5
3	Roll-to-Roll výroba RFID tagu na PET substrát, převzato z: [5]	7
4	Výroba tranzistoru na PET substrát, převzato z: [5]	8
5	Substráty pro FHE, převzato z: [7][8][9]	9
6	OLED panel, převzato z: [18]	11
7	Technologie DSSC, převzato z: [19][20]	11
8	Thin-film solární panel, převzato z: [21]	12
9	OLED displej, převzato z: [22]	13
10	Integrované smart systémy, převzato z: [23][24]	14
11	Demonstrace předností FHE, převzato z: [29]	16
12	Historie myšlenky FHE, převzato z: [30]	16
13	Příklady adhesiv, převzato z: [32][33][34]	17
14	Pulsní oxymetr, převzato z: [35]	19
15	Ukázka biopalivové článku v textilu, převzato z: [36]	20
16	Aplikace chytrých povrchů, převzato z: [37]	21
17	Senzor narušení balíku realizovaný PE, převzato z:	22
18	Hybridní realizace senzoru narušení balíku, převzato z: [38]	22
19	Ilustrativní obrázek pro postup návrhu hybridní elektroniky	23
20	Ukázka pracovní plochy vrstvého editoru Clewin	24
21	Inkjet tiskárna Fujifilm Dimatix 2831	25
22	Drop watcher kamera pro kontrolu kvality kapek	29
23	Waveform editor pro nastavení vlastností vlny	29
24	Nastavení vlastností cartridge	30
25	Nastavení tisku pomocí Fiducial kamery	30
26	Testovací obvod pro montáž SMD součástek	31
27	Montáž součástek pomocí stříbrné pasty DGP80	33
28	Montáž součástek pomocí pájky Microprint 2004	35
29	Montáž součástek pomocí pájky Sn42Bi58 od Hotair	37
30	Montáž součástek pomocí elektricky vodivého lepidla ELPOX ER 55MN	38
31	Demonstrace ohybu	40
32	Demonstrace hybridní elektroniky na jednoduchém obvodu	41
33	Demonstrace hybridní elektroniky na první verzi lampičky	43
34	Testování odporu kontaktů a vodivé cesty	44
35	Navržená deska plošného spoje vyrobená společností Printed	46

## Seznam tabulek

1	Porovnání substrátů pro flexibilní elektroniku, převzato z: [10][5][11]	9
2	Přehled výrobců a dokumentací k jednotlivým typům substrátů	9
3	Porovnání tištěné, hybridní a deskové elektroniky, převzato z: [26][27][28]	15
4	Základní technické informace k tiskárně[39]	26
5	Základní vlastnosti cartridge[39]	26
6	Základní vlastnosti inkoustu ANP Silverjet DGP-40LT-15C [40]	26
7	Požadavky na inkoust pro zajištění kvalitního tisku[41]	27
8	Vlastnosti stříbrné pasty DGP80 [46]	32
9	Statistika výtěžnosti a protékajícího proudu pro stříbrnou pastu	33
10	Vlastnosti pájky Microprint 2004 od Elchemco [47] [48]	34
11	Statistika výtěžnosti a odporu kontaktů pro pájku Microprint 2004	35
12	Parametry pájecí pece	36
13	Výtěžnost a odpor kontaktů jednotlivých pouzder	36
14	Vlastnosti pájky Sn42Bi58 distribuované od Hotair [49] [50]	36
15	Vlastnosti elektricky vodivého lepidla ELPOX ER 55MN [51]	38
16	Statistika výtěžnosti a protékajícího proudu pro elektricky vodivé lepidlo ELPOX ER 55 MN	39
17	Vlastnosti vteřinového lepidla Contact VA 100 [52]	39

## **Seznam zkratek**

**CIGS** Copper Indium Gallium Selenide Cell. 11

**DSSC** Dye-Sensitized Solar Cells. 5, 11

**EAS** Electronics Article Surveillance. 21

**FHE** Flexibilní hybridní elektronika. 15, 18

**ITO** Indium Tin Oxide. 12

**OLED** Organic light emitting diode. 5

**PCB** Printed circuit board. 15

**PE** Printed electronics. 5, 15

**SMD** Surface mount device. 16, 31, 39

**TFT** Thin-film-transistor. 5, 10





# 1 Úvod

Využíváme ji stále více. Dnešní svět si bez ní již nedovedeme představit. Elektronika hýbe světem, a proto není divu, že se v této oblasti neustále přichází s novými myšlenkami a nápady, jak již obrovské spektrum možných aplikací rozšířit či vylepšit.

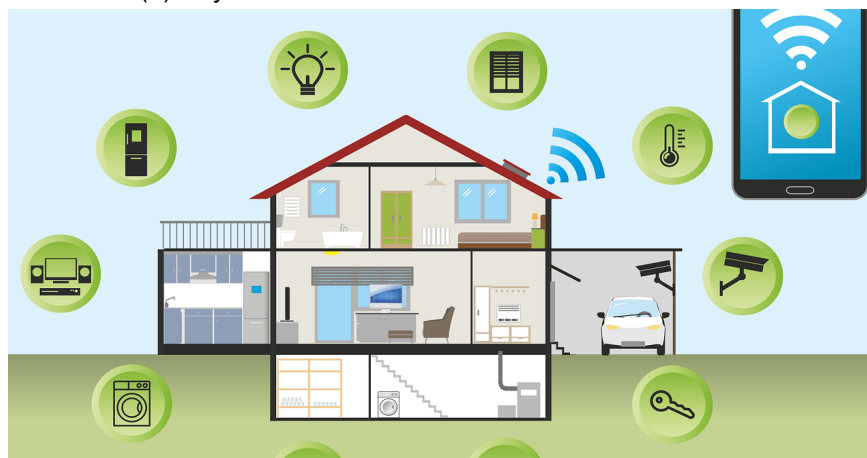
V současnosti jen stěží uvidíme na ulici člověka, jenž by u sebe neměl mobilní telefon. Už dávno za námi jsou doby, kdy bychom čekali s netrpělivostí na dopis či si před cestou prohlíželi mapu, abychom dorazili včas na místo určení. Již jen s nostalgií můžeme vzpomínat, jak jsme s vypětím všech sil nastěhovali mnohakilové televizory či hráli jednoduché karty na prvních počítačích. Dnes neočekáváme od elektroniky jen výkon jedné konkrétní služby, ale celou škálu služeb, možností nastavení, bezdrátovou komunikaci atd. To ale zdaleka není vše. Požadujeme, aby byla lehká, jednoduše ovladatelná, estetická, nerušící a jistě bychom mohli vyjmenovat celou řadu dalších atributů, které bychom si jako uživatelé představovali. Smart řešení našich domácností, měst a obecně všeho kolem nás jsou nastupujícím trendem viz obrázek 1, který musí být technologicky velmi dobře zajištěn, jelikož bude jednoznačně znamenat revoluci v každodenním životě každého z nás.

Konektivita bude v této nastávající době hrát velkou roli. Již dnes můžeme využívat vymoženosti, jako jsou chytré hodinky, chytré domácí spotřebiče, asistenty řízení v automobilech apod. Budoucnost bude zřejmě vypadat tak, že téměř ve všech oblastech našeho života bude pomocí různých senzorových systémů realizován sběr dat a tento obrovský objem informací bude dále zpracován díky nastupující síti 5G a pokročilým metodám vyhodnocování. Tato práce má sloužit k přiblížení tištěné a hybridní elektroniky, která může posloužit jako velmi vhodná platforma pro zajištění požadavků související s nástupem smart technologií a internetu věcí pro domácnosti, průmysl i zdravotnictví. Jejím smyslem ale není prvořadě nahradit standardizovanou elektroniku na bázi křemíku. Hlavním smyslem je ji naopak doplnit tam, kde není úplně vhodná. Jistě si velmi dobře dokážeme představit, jak by bylo příjemné nosit na svém těle klasické plošné spoje. Tištěná elektronika je naopak velmi vhodným kandidátem, jelikož je umístěna na ohebném substrátu, který lze velmi snadno vyrobit na míru dané aplikaci. Díky rychlé a levné výrobě tištěné elektroniky bude možné mít senzorové systémy všude, kde to jen trochu bude třeba, přičemž si budou schopny zajistit napájení pro svou vlastní spotřebu. V dnešní době na druhou stranu stále ještě nejsme na takové úrovni, aby bylo možné vše realizovat tištěnou elektronikou. Možnosti integrace a výpočetního výkonu polovodičové elek-

troniky se vyskytují daleko za hranicemi dnešní tištěné elektroniky. Proto se přistoupilo k vývoji hybridní elektroniky, která dokáže oba světy spojit. Je to vlastně podobné jako v případě automobilů, kdy výrobci přichází s hybridními automobily, které slouží k překlenutí období mezi nástupem elektrických vozů. Podrobnější přiblížení tištěné a hybridní elektorniky je popsáno v následujících kapitolách.



(a) Chytré město



(b) Chytrá domácnost

Obrázek 1: Koncepte propojených měst a domácností, převzato z: [1][2]

## **1.1 Cíle práce**

1. Seznámit se s principem a aplikacemi hybridní tištěné elektroniky na flexibilním substrátu
2. Navrhnout postup přípravy a realizovat zvolený testovací obvod
3. Na testovacím obvodu demonstrovat kombinaci tištěných vodivých spojů a součástek SMD
4. Charakterizovat testovací obvod a analyzovat dosažené výsledky
5. Optimalizovat proces přípravy a diskutovat další postup

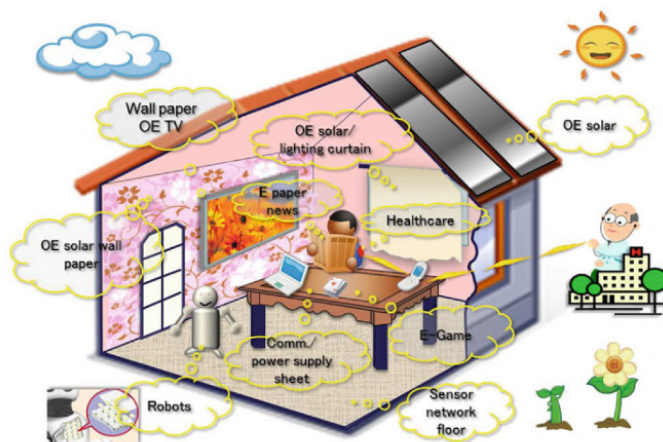


## 2 Tištěná elektronika

### 2.1 Podstata tištěné elektroniky

Tištěná elektronika PE je založená na postupném nanášení vrstev o různé vodivosti, čímž můžeme vytvářet pasivní součástky jako kapacity, rezistory či indukory, nebo i aktivní součástky, jako jsou diody či tranzistory TFT. Pro výrobu tištěné elektroniky se využívá několik metod tisku. Tyto metody zahrnují například sítotisk, technologii inkjet, hlubotisk či flexografii. [3]. Účelem je vytvoření elektroniky adekvátní výkonnosti a velmi nízké ceny, která bude moci být tištěna na ohebné substráty o různé velké ploše. Další výhodou je možnost snadné úpravy navržené struktury, čímž se tento druh elektroniky stává velmi vhodným na prototypování. [4]

Aby přednosti tištěné elektroniky a její možnosti uplatnění ještě více vynikly, uvádím zde obrázek 2, na kterém se dají její hlavní benefity přehledně demonstrovat.



Obrázek 2: Uplatnění PE v blízké budoucnosti, převzato z: [5]

Na zdi visí velkoplošná televize, jež je velmi tenká, lehká a pravděpodobně i ohebná. Obrazovka je tvořena organickými diodami OLED, přičemž aktivní matici tvoří natištěné organické tranzistory. Osoba u stolu si čte noviny, které jsou bezdrátově připojeny k internetu. Jsou samozřejmě ohebné a umožňují neustálý přísun nových článků a informací. Za televizorem se objevuje zeď se zajímavým vzorem. Ten není obyčejný. Jedná se o barvivem senzibilizovaný solární článek DSSC, jenž recykluje viditelné světlo

uvnitř místnosti a přeměňuje ho zpět na elektrickou energii. Počítač či mobilní telefon neleží jen tak na stole, ale jsou bezdrátově napájeny speciálním komunikačním vrstvou, jež umožňuje i připojení k internetu. Dále robot pomáhající člověku v domácnosti nesmí svou činností zranit člověka, domácí mazlíčky či poškodit nábytek. Proto má měkký povrch „kůže“ vybavený senzorem sítí umožňující bezproblémový pohyb v prostoru. Senzorová síť detekující pohyb objektu na podlaze pod kobercem musí být také měkká. Zástlony též nejsou jen z obyčejné bavlny. Zajišťují vnitřní osvětlení ve formě OLED panelu, přičemž z vnější strany se jedná o natištěný solární článek. Ty se samozřejmě objevují i na střeše. Osoba u stolu je zároveň monitorována zařízením na své levé paži. To kontroluje teplotu, tlak, hladinu cukru a další parametry, přičemž tyto informace bezdrátově zasílá svému ošetřujícímu lékaři.

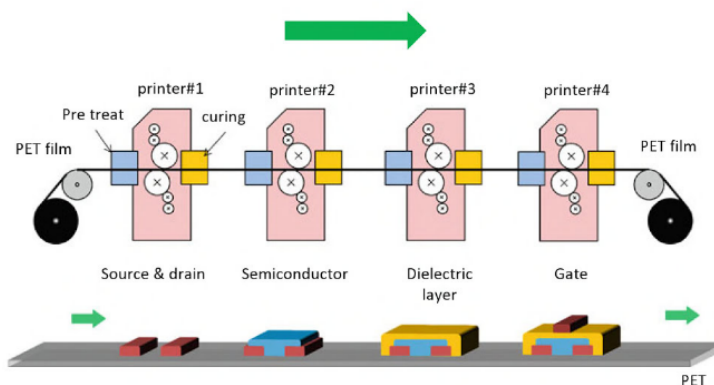
Tyto vymoženosti lze očekávat v blízké budoucnosti. Možná si jich ale ani nevšimneme, protože je lze navrhnout tak, aby pasovali na určené místo. Budou lehké, tenké i dostupné.[5] Hlavní benefity lze tedy shrnout takto:

1. Zařízení musí být tenká, lehká a použitelná ve velkoplošných elektronických zařízeních, jako jsou televizory, solární panely, osvětlení. Metodou tištění lze vyrábět produkty o šířce až několik desítek metrů. Takový proces výroby umožňuje roll to roll výroba. Roll to roll výroba je proces výroby elektroniky, kdy se na velmi dlouhý a široký pás substrátu pohybující se několik stovek metrů za minutu tisknou navržené elektronické obvody viz obrázek 3. [5]



Obrázek 3: Roll-to-Roll výroba RFID tagu na PET substrát, převzato z: [5]

2. Výroba tištěné elektroniky oproti křemíkové je výrazně levnější a rychlejší. Investice do výroby tištěné elektroniky je přibližně 10krát až 100krát nižší. Typický proces výroby polovodiče je naznačen na obrázku 4. Zapotřebí jsou pouze 4 tiskárny, které dokáží zastat své úkoly ve velmi krátkém taktovacím čase. [5]

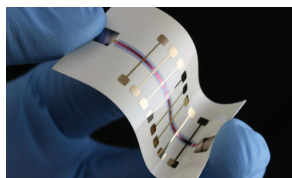


Obrázek 4: Výroba tranzistoru na PET substrát, převzato z: [5]

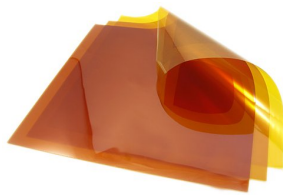
3. Opravdová „přenositelnost“ zařízení. Již dnes můžeme vidět konvenční „přenositelná“ zařízení, ale ty snadno poznáme díky své velikosti, váze, nekomfortu nošení či rychlé spotřebě. Opravdová přenositelnost se vyznačuje lehkostí, samodobíjením a komfortem. [5] To je umožněno díky tomu, že tištěná elektronika užívá ohebné substráty. Volí se papírové a plastové substráty na bázi polyethylenu či polyimidu, jež jsou pro ukázkou znázorněny na obrázku 5. Papír je sice levnější oproti plastovým substrátům a je obecně šetrnější k životnímu prostředí, nicméně má několik nedostatků. Mezi ně se řadí vysoká hrubost povrchu, nízká teplotní tolerance a odolnost proti oxidaci a vodě či neprůhlednost substrátů viz tabulka 1. [6]

Kromě těchto obecných vlastností se nicméně samotné substráty liší v mnoha ohledech (např. maximální teplota, izolační vlastnosti, elektrická pevnost, tepelná vodivost, chemická odolnost, mechanické vlastnosti aj.) podle toho, o jakou výrobní řadu se jedná, a tedy i samotná uplatnitelnost je značně odlišná. Jako doplňkovou informaci přikládám tabulku 2 s vybranými řadami substrátů, jejichž dokumentace jsou přiloženy v tabulce.





(a) papírový substrát



(b) kapton



(c) PEN substrát

Obrázek 5: Substráty pro FHE, převzato z: [7][8][9]

Tabulka 1: Porovnání substrátů pro flexibilní elektroniku, převzato z: [10][5][11]

Materiál	Max. proces. teplota[°C]	Průhlednost[%]	Hrúbost povrchu[nm]
PEN	155	87	0,64-0,68
PET	140	90	1000-1500
Polyimid	360	-	2
Papír	130	-	1000-10000

Tabulka 2: Přehled výrobců a dokumentací k jednotlivým typům substrátů

Materiál	Označení	Výrobce	Dokumentace
PET	MELINEX ST505	DuPont Teijin Films	[12]
PET	MELINEX ST506	DuPont Teijin Films	[13]
PEN	TEONEX Q51DW	DuPont Teijin Films	[14]
Polyimid	Kapton HN	DuPont	[15]
Polyimid	Kapton FWR	DuPont	[16]

4. Tištěná elektronika je šetrná k životnímu prostředí. Nevyužívá toxiny či drahé kovy a požaduje nízkou spotřebu energie při výrobě i samotném užívání. Zároveň uspoří velké množství materiálu, jelikož se ve výrobním procesu neuplatňuje leptání. [5]

Tištěná elektronika má ale samozřejmě i řadu nevyřešených problémů, které bude třeba v brzké době vyřešit. Hlavním nedostatkem je vysoká odchylka parametrů tištěných součástek, která se může pohybovat mezi 30-100 %, přičemž v případě ohybu může dosahovat až 300 % [17]. Díky tomu v současné době není možné srovnávat tištěnou a polovodičovou elektroniku. Velkým omezením je v současné době výkon tranzistorů TFT, mobilita nosičů a příliš velký rozptyl prahového napětí oproti tranzistorům vyrobených například litografickou cestou [4]. Proto není překvapením, že aplikace tištěné elektroniky jsou omezeny na senzory, komunikační struktury, sběrače energií, displeje a osvětlovací zařízení. Pro širší uplatnění by bylo zapotřebí zvýšit výkon tištěných tranzistorů a zvýšit jejich hustotu na jednotku plochy [17].

Tištěná elektronika bude nesporně v nadcházejících letech trendem, který i přes své problémy má řadu výhod již zmíněných výše. Konkrétní aplikace si dále rozebereme v další kapitole.

## **2.2 Aplikace PE**

### **2.2.1 Osvětlení**

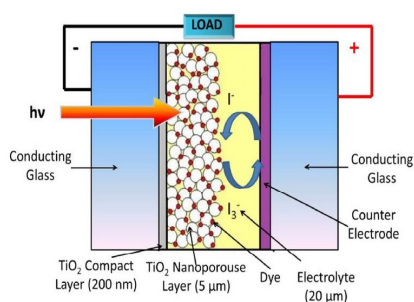
Vzhledem k tomu, že dva hlavní zástupci zdrojů osvětlení mají výrazné nedostatky, a to konkrétně velmi nízkou účinnost v případě žhavených zdrojů nebo přítomnost toxických prvků u fluorescentních trubic (zářivky), je zde velká poptávka po efektivním zdroji osvětlení, který zároveň bude ekologickým. Takovým zdrojem může být OLED či anorganický LED. OLED má poměrně jednoduchou strukturu, která se od klasických LED liší použitím organického polovodiče. Dále je na rozdíl od anorganických LED velmi tenký a má mnohem větší vyzařovací úhel než LED, který je spíše bodovým zdrojem. Na druhou stranu má ještě stále nízkou intenzitu osvětlení. V brzké budoucnosti se nicméně očekává velký pokrok ve světelné účinnosti OLED, a tedy jejich většímu uplatnění. Obrázek 6 ukazuje příklad OLED panelu [5].



Obrázek 6: OLED panel, převzato z: [18]

### 2.2.2 Organická/anorganická fotovoltaika

V případě fotovoltaických článků rozlišujeme 3 základní typy. Prvním type je DSSC. Tento druh článku využívá barvivo, které absorbuje viditelné světlo, jež následně transformuje na elektrickou energii. Výhodou těchto panelů je možnost vytváření různých vzorů a ilustrací pomocí změny tloušťky vrstvy  $\text{TiO}_2$  ve struktuře DSSC viz obrázek 7.



(a) Struktura DSSC



(b) DSSC panel

Obrázek 7: Technologie DSSC, převzato z: [19][20]

Dalším druhem fotovoltaického článku je organický polovodič. Ten využívá vnitřní fotoelektrický jev, kdy při dopadu světla na přechod PN dochází ke generování párů elektron-díra. Elektrické pole v okolí PN přechodu rozdělí elektrony do oblasti N a díry do oblasti P. Na elektrodách je potom možno detekovat náboj. Efektivita takové článku je nicméně velmi nízká, pohybuje se kolem 3%. Posledním type je anorganický článek CIGS. Ten

dosahuje účinnosti přibližně 15%, na druhou stranu jsou k jeho výrobě zapotřebí velmi vysoké teploty v okolí 400°C. Ukázka tištěného solárního článku je na obrázku 8. [5]



Obrázek 8: Thin-film solární panel, převzato z: [21]

### 2.2.3 Displeje

V blízké době se očekává nástup OLED displejů jako náhrada za LCD displeje. LCD technologii má výhodu v několika parametrech, jako jsou například čírost obrazu, spotřeba či šířka displeje. Pokud se navíc nahradí skleněný substrát a elektrody za ohebný substrát a ITO elektrody, mohou být obrazovky též ohebné a přitom robustní. Masová výroba OLED displejů je zatím stále poměrně problematická vzhledem k tomu, že kvůli kontrole pixelů je zapotřebí vysoká preciznost tisku v řádu mikrometrů. Větší rozšíření technologie OLED navíc oddaluje razantní snížení cen doprovázející zvýšením kvality konvenčních LCD displejů [5]. Příklad tištěného displeje OLED je na obrázku 9.



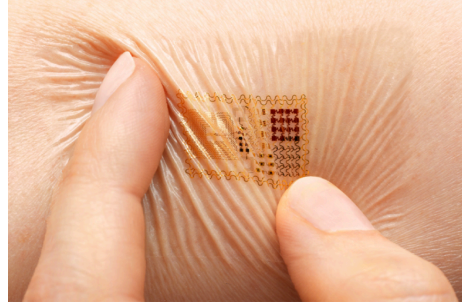
Obrázek 9: OLED displej, převzato z: [22]

#### 2.2.4 Integrované smart systémy

Aplikace v této kategorii jsou již velmi rozšířené a poměrně běžně se vyrábějí pro svou jednoduchost. Jedná se například o RFID, fitness/zdraví monitoring, chytré textilie a především celou řadu sensorových systémů viz například obrázek 10a, kde je kontrolováno, zdali nedošlo k překročení skladovací teploty. RFID tagy jsou na trhu již poměrně dlouho a nacházejí čím dál tím větší uplatnění např. v potravinářství či lékařství, kde je zájem na kontrole kvality dovážených potravin a léčiv. V současné době se ale stále objevují spíše ve verzi hybridní elektroniky, jelikož tištěné tranzistory se stále nemohou rovnat křemíkovým. O RFID tagu bude řeč dále v hybridní elektronice. Velkým segmentem jsou jistě přenositelná zařízení ve fitness/zdravotnických aplikacích. Požadavkem je samozřejmě to, aby taková zařízení byla lehká, tenká, příjemná na nošení a zároveň aby byla schopna komunikovat bezdrátově s okolním světem [5]. Takové zařízení je naznačeno na obrázku 10b, kde je náplast jako sensor na měření teploty, tlaku a glukózy.



(a) Příklad kontroly kvality potravin



(b) Senzor jako náplast

Obrázek 10: Integrované smart systémy, převzato z: [23][24]

### 3 Flexibilní hybridní tištěná elektronika

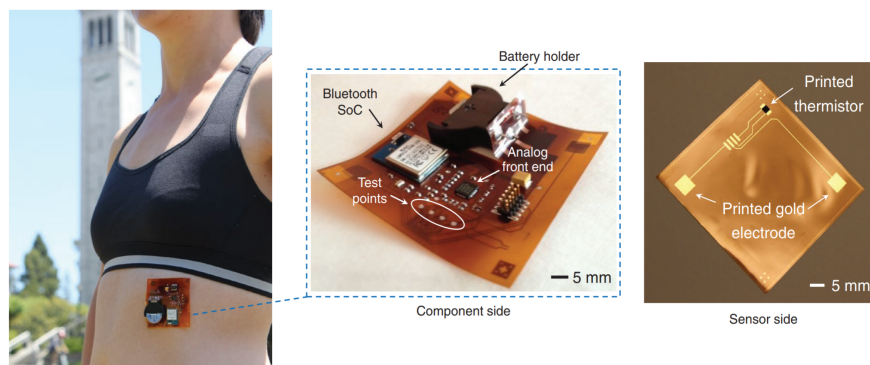
#### 3.1 Podstata flexibilní hybridní elektroniky

Flexibilní hybridní elektronika (FHE) je jednou z velmi rychle rostoucích technologií s vysokým tržním potenciálem. Integruje konvenční polovodičovou elektroniku a plně tištěnou elektroniku na flexibilním substrátu, tedy i jejich přednosti. V porovnání s tištěnou elektronikou na pevném substrátu získává FHE hned několik výhod, jako jsou flexibilita, váha, cena, průhlednost substrátu či biokompatibilita [17][25]. Pro názornost zde uvádím tabulku 3, která jednotlivé kategorie elektroniky porovnává. Pro upřesnění bych chtěl dodat, že hybridní elektronika není nový typem elektroniky, ale je vlastně mostem mezi tištěnou a klasickou elektronikou.

Tabulka 3: Porovnání tištěné, hybridní a deskové elektroniky, převzato z: [26][27][28]

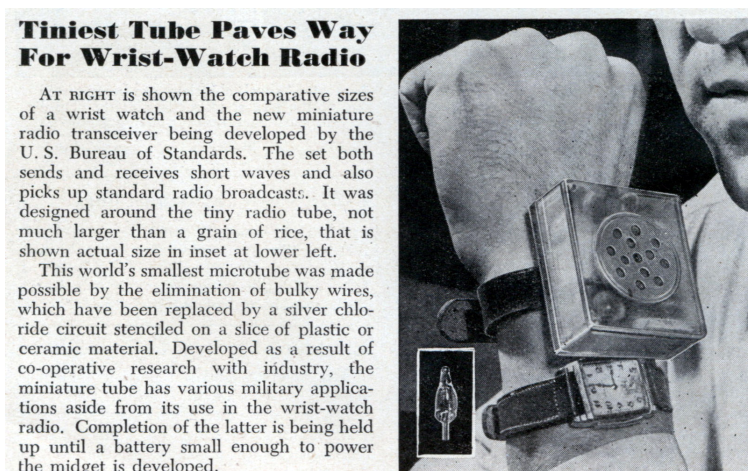
Elektronika	Výhody	Nevýhody
PCB	zavedený způsob výroby, spolehlivost, vyšší proudy nejsou problém	váha, ekologicky nepřilíš šetrné, flexibilita, cena
PE	velmi lehké, flexibilní, šetří místo, ekologicky šetrnější	hustota komponentů, výkonové aplikace
FHE	výhody přebírá od PE	nevýhody kompenzuje použitím SMD součástek

Příklad bioelektrického senzoru viz obrázek 11 perfektně vystihuje smysl flexibilní hybridní elektroniky. Tento senzor je naprosto konformní s aplikací na kůži, což výrazným způsobem zvyšuje odstup signál-šum, navíc ho lze díky rychlému způsobu prototypování navrhnout a přizpůsobit potřebám širokému spektru populace. Pro zpracování dat a komunikaci je ale zapotřebí polovodičová elektronika na pevném substrátu, jelikož dodává potřebný výpočetní výkon při nízkém odběru proudu, čehož v současné době nejsme schopni dosáhnout v čistě tištěné formě organických/anorganických materiálů. [29]



Obrázek 11: Demonstrace předností FHE, převzato z: [29]

V případě elektroniky na flexibilním substrátu se nicméně nejedná o úplně novou myšlenku. Již v roce 1946 se v americkém detektivním komiksu objevily první „smart watch“ hodinky viz obrázek 12. Tyto hodinky tehdy uměly přijímat a vysílat na krátkých vlnách či poslech standardního radiového vysílání. Tato miniaturizace byla umožněna také díky natištěným vodivým cestám na plastickém či keramickém substrátu.[30]



Obrázek 12: Historie myšlenky FHE, převzato z: [30]

Vývoj nicméně neustrnul a dnes máme na rozdíl od našich předchůdců k dispozici SMD součástky velmi malých rozměrů, které umožňují do určité míry zachovat flexibilitu, přičemž značně rozšíří možnosti tištěné elektroniky. Jejich montáž na substrát ale stále není zcela standardizována. Vy-



užívají se různé druhy vodivých lepidel a pásek, přičemž nejvíce žádoucí by bylo nalezení vhodného procesu pájení, který by byl využitelný pro roll-to-roll výrobu. Klíčovými parametry pro porovnávání způsobu montáže součástek je odpor kontaktů a odolnost vůči ohybu. Vzhledem k poměrně vysoké rezistivitě natištěných cest je žádoucí, aby byl odpor kontaktů co nejnižší. V opačném případě by se snížil odstup signál-šum a zvýšil ztrátový výkon, což by bylo obzvlášť nepříjemné při bateriovém napájení. [6]

Způsobům montáže součástek na substrát je proto věnováno hned několik článků. Testovalo se použití nízkoteplotní pájky na montáž součástek na papírový substrát. Tento způsob vykazoval sice nízký odpor kontaktů, na druhou stranu ale také nízký podíl úspěšných kontaktů. Na vině byla pravděpodobně krycí vrstva papíru, jejíž teplotní koeficient roztažnosti byl odlišný vůči pájce, díky čemuž docházelo k prasklinám v krycí vrstvě papíru.[6]

Jiné možnosti montáže součástek na papírový substrát byly popsány v další publikaci, kde se porovnávaly vodivé pásky, epoxid stříbra a pájení z hlediska odporu kontaktů a odolnosti v tahu. Jejich ukázka je naznačena na obrázku 13. Každá metoda měla své přednosti a nedostatky. Epoxid stříbra měl sice nejnižší odpor kontaktů a dobrou odolnost, zato nanášení lepidla je poměrně problematické vzhledem k možným zkratům v obvodu. Testována byla také anizotropní páska, která zkraty způsobit nemůže, jelikož je vodivá pouze v jednom směru. Mechanická stabilita je ale o poznání nižší než u pájení. Izotropní páska dopadla v tomto průzkumu nejhůře, jelikož vykazuje nejnižší odolnost v tahu, nejvyšší odpor kontaktů a může způsobit zkraty. Jedinou výhodou je menší sklon k odtržení oproti anizotropní pásce[31].



Obrázek 13: Příklady adhesiv, převzato z: [32][33][34]

Jak již bylo zmíněno výše, proces montáže součástek na substrát není zdaleka vycizelován. Pokud porovnáme odpor kontaktů na papírovém substrátu a klasickém plošném spoji, docházíme k podobným výsledkům. Na

druhou stranu odolnost v tahu je přibližně 10krát vyšší u desky plošného spoje, a navíc je mnohem trvanlivější. Dalším problémem může být vyšší odpor cest, který může způsobit komplikace u vyšších proudů a frekvencí[3].

## 3.2 Aplikace FHE

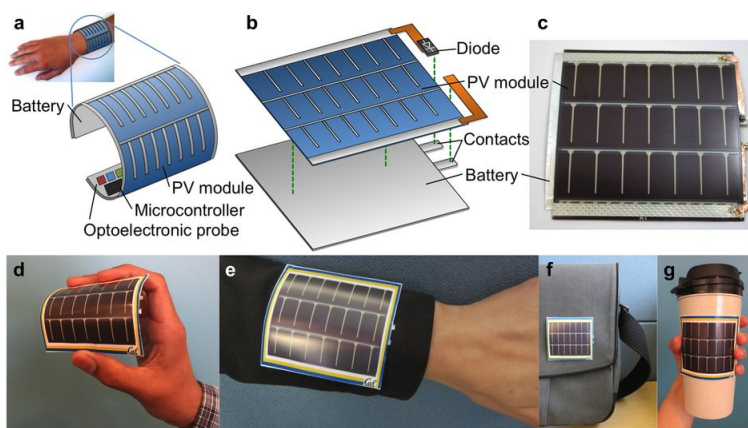
Spektrum aplikací FHE oproti tištěné elektronice je o poznání větší, jelikož kombinuje výhody tištěné a konvenční elektroniky. Hustota součástek a výkon patří mezi hlavní domény konvenční elektroniky, a tak zastávají „páteřní“ funkce. Tištěná elektronika plní funkci senzorů, anténních struktur či sběračů energie. [17]

První z mnoha aplikací byla zmíněna již v úvodu viz obrázky 11. Další aplikace může nalézt například v chytrých balíčcích (smart packaging), chytrých površích (smart surface) či napájecích zařízeních např. fotovoltaické články či e-textil.

### 3.2.1 Napájecí zařízení

V posledních letech dochází k velké poptávce po tenkých, ohebných elektronických zařízeních. Ta zahrnují chytrá balení, mobilní zařízení, systémy monitorující zdraví atd. Tato zařízení samozřejmě potřebují napájení, a to často v řádu desítek mA, např. chytré hodinky až 48 mA během hovoru. Jak roste počet zařízení, roste i potřeba nabíjení bez častých nabíjecích cyklů pomocí přívodního kabelu. To je jistě nezbytné pro bezdrátové senzory a především pro zdravotní systémy, kde by mohl být výpadek fatální. Potřebujeme tedy baterii vysokou kapacitou v řádu mAh/cm<sup>2</sup>, jež nebude robustní a bude schopna krátkodobě dodávat vysoký špičkový proud. Bylo by samozřejmě vhodné kombinovat baterii se zařízeními, která by dokázala z okolních zdrojů, jako jsou světlo, teplo či vibrace, baterii nabíjet. Právě v tomto může svoji úlohu hrát FHE, jelikož dokáže všechna tato zařízení integrovat v jedno. Návrh takové baterie, která by byla ohebná, měla potřebnou kapacitu a dokázala dodávat potřebný výkon, není ale jednoduchý. Často se volily lithium-iontové baterie vzhledem k jejich vysoké kapacitě. Pro flexibilní aplikace jsou ale vzhledem k velikosti nevhodné. Proto se upřela snaha k tištěným bateriím. V současné době je ale jejich plošná kapacita stále poměrně nízká (0,1-0,5mAh/cm<sup>2</sup>). Nejvhodnější pro nabíjení baterií jsou většinou fotovoltaické články vzhledem k jejich vysoké výkonové hustotě (v případě venkovních prosotr 100mW/cm<sup>2</sup>, uvnitř se jedná o stovky μW/cm<sup>2</sup>) v porovnání s desítkami μW/cm<sup>2</sup> u termálních či vibračních zdrojů, přičemž ale velmi záleží na očekávané intenzitě osvětlení pro danou aplikaci. Zde na

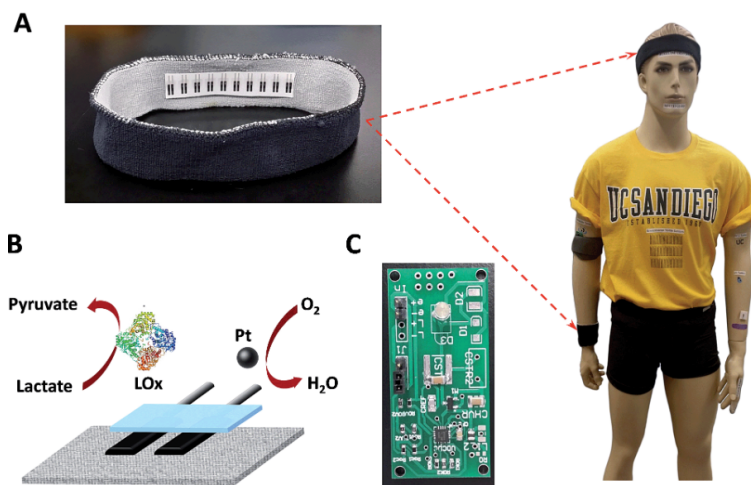
obrázku 14 je uveden příklad aplikace s pulsním oxymetrem. Ten je tvořen tištěnou baterií, kterou dobíjí fotovoltaické články. Baterie slouží k napájení červené a infračervené LED, fotodiody a mikrokontroléru, jenž zastává výpočetní funkci.[35]



Obrázek 14: Pulsní oxymetr, převzato z: [35]

Další zajímavou možností, jak napájet naše přenositelná zařízení, je využití těla uživatele. V tomto směru se vyvinula řada zajímavých aplikací, jako jsou piezoelektrické nanogenerátory využívající mechanické energie, dále endokochleární baterie založené na potenciálovém rozdílu ve vnitřním uchu či biopalivové články fungující na principu přeměny chemické energie na elektrickou, což se děje pomocí biokatalycké redukce enzymů. Většina podobných senzorů využívala glukózu v krvi. Takový způsob je ale invazivní, a tedy nevhodný. Řešení, jež je nejen neinvazivní, ale i pohodlné, nabízí FHE v podobě e-textilu. Přesná technologie tisku umožňuje levnou výrobu elektrochemický senzorů, jež konzumují z potu laktózu a rozpuštěný kyslík, přičemž produkují elektrickou energii. Takové biočlánky na flexibilním substrátu lze velmi snadno integrovat do různého oblečení, např. do čelenky či potítek. Abychom získali požadované hodnoty výstupního napětí a proudu, lze buď články skládat, nebo použít DC-DC měnič. Na obrázku 15 je tento systém naznačen, kdy se pomocí článků napájí LED či digitální hodinky. V tomto případě se ukázala regulace výstupních parametrů pomocí skládání

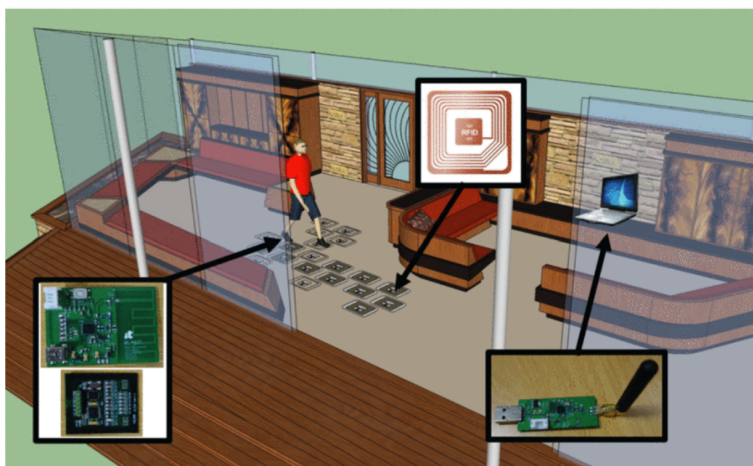
článků problematická, a tak se použil DC-DC konvertor, což je přesně v souladu s FHE. Sensorová část je natištěna, inteligentní funkce vykonává standardní elektronika. V laboratorních podmínkách dokázaly takové články vyprodukovat plošný výkon  $100 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  při 0,34 V. [36]



Obrázek 15: Ukázka biopalivové článku v textilu, převzato z: [36]

### 3.2.2 Chytré povrchy

Koncept chytrých povrchů je využit v zajímavé navigační aplikaci, jež může najít uplatnění například v domě pro seniory. Pod podlahou, která může být tvořena z různých materiálů (keramické dlaždice, laminát, dřevo), jsou uloženy tištěné RFID tagy. Osoba v místnosti má v botě zabudovanou RFID čtečku a komunikační zařízení, které bezdrátově spojuje čtečku s přijímačem v počítači s nainstalovaným lokačním a navigačním softwarem. Při pohybu osoby v místnosti čtečka aktivuje ten RFID tag, na kterém se osoba zrovna vyskytuje. Informace je pak zaslána do počítače ke zpracování. Počítač identifikuje příslušný kód RFID tagu, tu spojí s jeho polohou v místnosti. S touto informací již může dále pracovat umělá inteligence, která poskytne navigaci či jen pomůže s orientací v prostoru. Princip této aplikace je znázorněn na obrázku 16. [37]

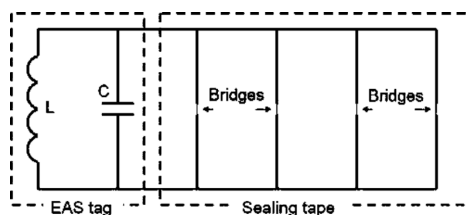


Obrázek 16: Aplikace chytrých povrchů, převzato z: [37]

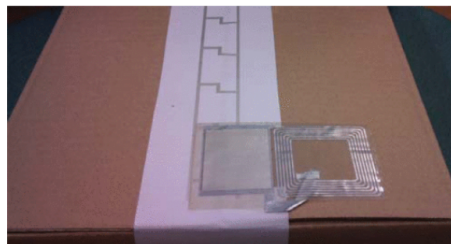
### 3.2.3 Chytrá balení

Chytrá balení nacházejí řadu aplikací, kdy nás zajímá, jestli byly potraviny, léčiva či další produkty řádně skladovány, převáženy či jiným vnějším zásahem neporušeny. Já zde uvádím příklad klasické papírového balíku pro expediční přepravu, přičemž cílem je detekce narušení balíku. Tutu aplikaci lze řešit za použití tištěné elektroniky ve formě EAS tagu. Ta ale bude mít řadu nedostatků. V praxi se užívají 2 způsoby detekce. První „vše je v pořádku“ a druhý „narušení detekováno“. Každý má své nevýhody. U způsobu „vše je v pořádku“ má narušitel problém s tím, že aby prošel balík čtecí branou, musí být nepoškozen. To lze ale zařídit pomocí výměny EAS tagu. U metody „narušení detekováno“ se rozezní alarm, pokud projde branou otevřený balík. Zde tedy stačí pouze zničit alarm. Na obrázku 17b je tato aplikace realizována pomocí senzoru a EAS tagu ve formě LC rezonátoru. Senzor tvoří páska uzavírající balík, na níž jsou dvě vodivé vodorovné linie, které jsou spojeny vodivými mosty. Aby se balík otevřel, musí být páska roztržena, čímž se mosty přeruší. Jakmile se mosty přeruší, bude LC rezonátor viditelný pro čtecí zařízení. Obvodové zapojení je k nahlédnutí na obrázku 17a.

Taková realizace ale funguje pouze pasivně. Nevysílá informace o svém stavu v reálném čase. Proto se zde uplatňuje hybridní elektronika, která umožňuje více komplexní řešení. V ní se objevuje tištěná baterie, RFID čip, který není jen ke čtení, ale i k zápisu, a mikrokontrolér vyhodnocující informace ze senzoru, který je proveden ve stejné formě jako u tištěné realizace.



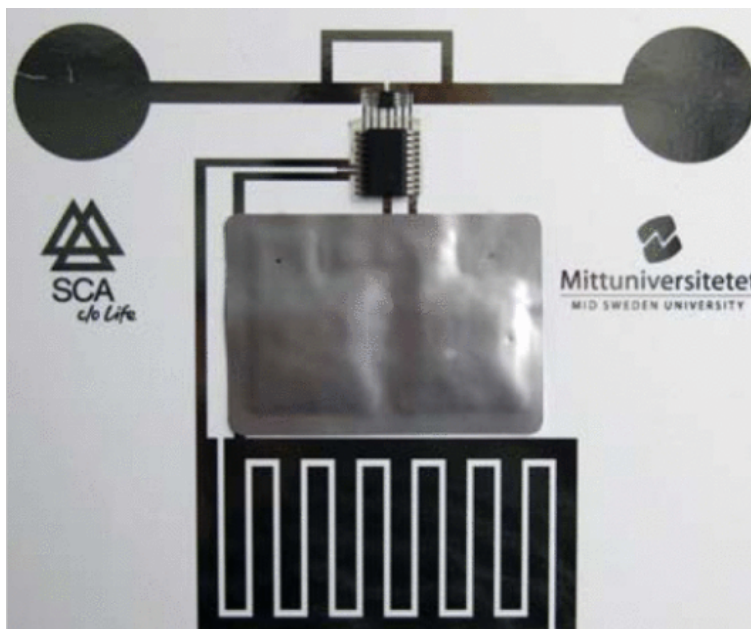
(a) Obvodové schéma monitorovacího tagu



(b) Realizace senzoru narušení balíku

Obrázek 17: Senzor narušení balíku realizovaný PE, převzato z: [38]

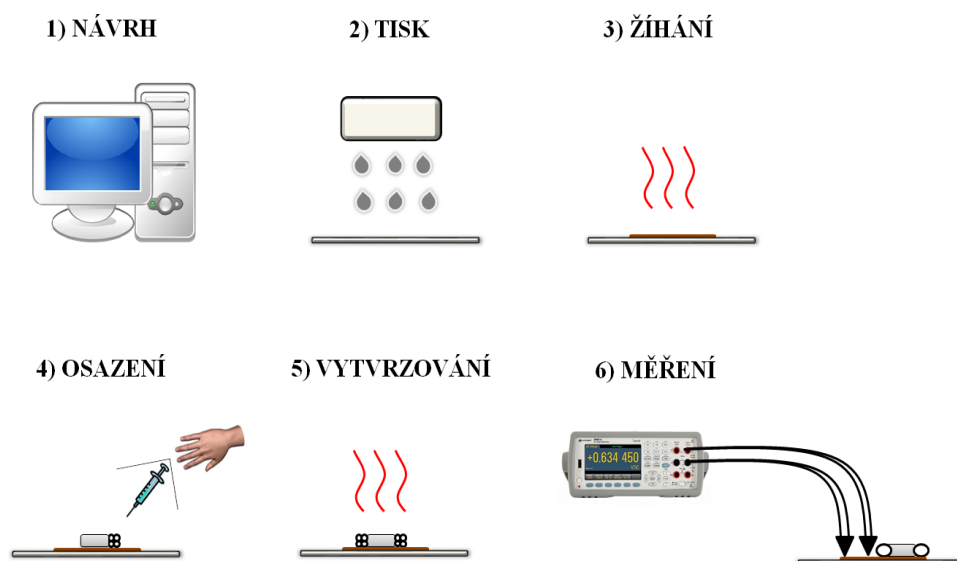
Tento koncept umožňuje navíc i připojení dalších senzorů (např. vlhkosti, otřesů, či světla pro vyšší zabezpečení), což by bez křemíkových součástek nebylo možné. Hybridní realizace je znázorněna na obrázku 18. Systém tedy může aktivně dávat zprávy jak ve smyslu „vše je v pořádku“, tak i v případě narušení „narušení detekováno“. I když se páska nahradí novou, systém bude stále hlásit závadu. Pokud se zařízení zničí, nebude moct být provedeno čtení, což opět vede ke stavu „narušení detekováno“ [38].



Obrázek 18: Hybridní realizace senzoru narušení balíku, převzato z: [38]

## 4 Praktická část

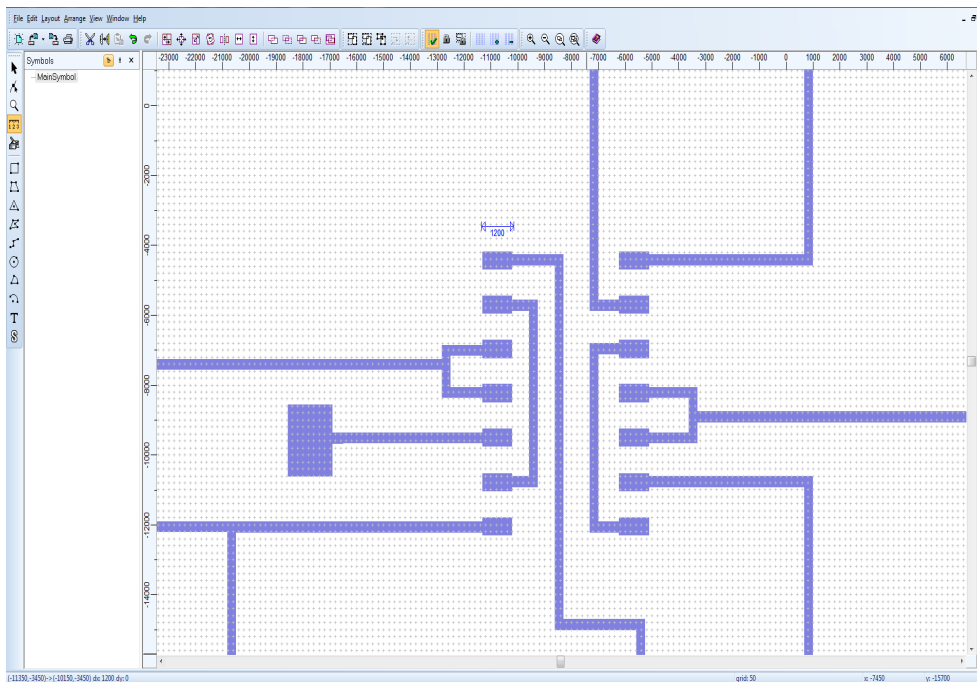
V praktické části bych chtěl popsat vývoj mého obvodu pro demonstraci využití hybridní elektroniky. Všechny mé navržené obvody, které byly vyráběny v laboratoři nanolitografie na katedře mikroelektroniky FEL ČVUT, byly nejdříve realizovány na nepájivém poli podle předlohy, jež byla vytvořena v editoru schémat pro elektrotechniku Eagle. Po ověření funkčnosti byl obvod navržen ve vrstevném editoru Clewin, vytištěn na materiálůvé tiskárně Dimatix DMP 2831 a následně osazen různými metodami montáže SMD součástek popsaných níže. Ilustrace postupu je znázorněna na obrázku 19. V následujících podkapitolách bych rád přiblížil na obrázku zmíněné části výroby obvodu.



Obrázek 19: Ilustrativní obrázek pro postup návrhu hybridní elektroniky

## 4.1 Návrh obvodu v editoru Clewin

Vrstvový editor Clewin je velmi užitečný a uživatelsky přívětivý nástroj pro tvorbu tištěné a hybridní elektroniky. Tvorba obvodu spočívá v tom, že si daný uživatel vybere na ovládacím panelu tvar objektu, který si přeje vytisknout. Pracovní plocha obsahuje v pozadí nastavitelnou mřížku, díky níž lze s velmi vysokou přesností obvod navrhovat. V tomto ohledu je velmi příjemná přítomnost pravítka a lupy, která výrazně usnadňuje návrh. Vytvořené objekty je možné dále podle libosti natahovat, zkracovat, posouvat, otáčet, zrcadlit atd. Jelikož se jedná o vrstevový editor, tak je samozřejmě možné přepínat mezi jednotlivými vrstvami, které chceme tisknout, což je velmi vhodné například pro oddělení jednotlivých vrstev obvodu. Vytvořené vrstvy dále exportujeme do bitmapového souboru, s nímž dokáže tiskárna pracovat. Navržený obvod v editoru Clewin je pro ilustraci na obrázku 20.



Obrázek 20: Ukázka pracovní plochy vrstevového editoru Clewin



## 4.2 Tiskárna Dimatix DMP 2831

### 4.2.1 Základní informace k tiskárně

V dalším kroku je třeba námi navrženou strukturu vytisknout. K dispozici jsem měl Inkjet tiskárnu Fujifilm Dimatix DMP 2831, kterou jsem tiskl veškeré navržené obvody. Tato tiskárna funguje na piezoelektrickém principu Drop on Demand. Po přivedení určitého napětí dochází k deformaci piezoelektrického materiálu. Dielektrický materiál tím vytvoří podtlak nebo přetlak a inkoust je následně nasáván nebo nanášen na vložený substrát. Tiskárna je znázorněna na obrázku 21, základní technické informace potom v tabulce 4.



Obrázek 21: Inkjet tiskárna Fujifilm Dimatix 2831

Tabulka 4: Základní technické informace k tiskárně[39]

Rozměry [výška / šířka / hloubka]	584 mm / 673 mm / 419 mm
Hmotnost	43 kg
Tisknutelná plocha	210 mm x 315 mm (tloušťka < 0,5 mm)
Opakovatelnost posuvu	± 25 μm
Výhřev substrátu	až do 60 °C
Výhřev tiskové jednotky	až do 70 °C
Formát vstupních dat	Gerber, DXF, GDSII, OASIS v bitmapě

K tisku vodivých cest jsem využíval inkoustu ANP Silverjet DGP-40LT-15C, jenž je tvořen nanočásticemi stříbra. Tímto inkoustem se následně plní cartridge tiskárny. Aby se cesty vytištěné tímto inkoustem staly vodivými, musí se po tisku přistoupit k žíhání nanočástic stříbra, aby došlo k odpaření tavidla a jejich následnému slnutí. Základní vlastnosti cartridge a inkoustu jsou v tabulce 5, respektive v tabulce 6. Požadavky, které jsou kladeny na inkoust pro úspěšný tisk, jsou v tabulce 7.

Tabulka 5: Základní vlastnosti cartridge[39]

Trysky	piezoelektrické, 16 v řadě za sebou, rozteč 254 μm
Velikost trysky	21,5 μm, respektive 9 μm podle typu cartridge
Nominální objem kapky	10 pl, respektive 1pl podle typu cartridge
Plnicí objem	1,5 ml

Tabulka 6: Základní vlastnosti inkoustu ANP Silverjet DGP-40LT-15C [40]

Obsah pevných částic [%]	30 - 35
Povrchové napětí [dyn / cm]	35 - 38
Vytvrzovací teplota [°C]	120 - 150
Rezistivita [μΩ x cm]	11 - 12
Viskozita [cPs]	10 - 17
Substrát	plastický film

Tabulka 7: Požadavky na inkoust pro zajištění kvalitního tisku[41]

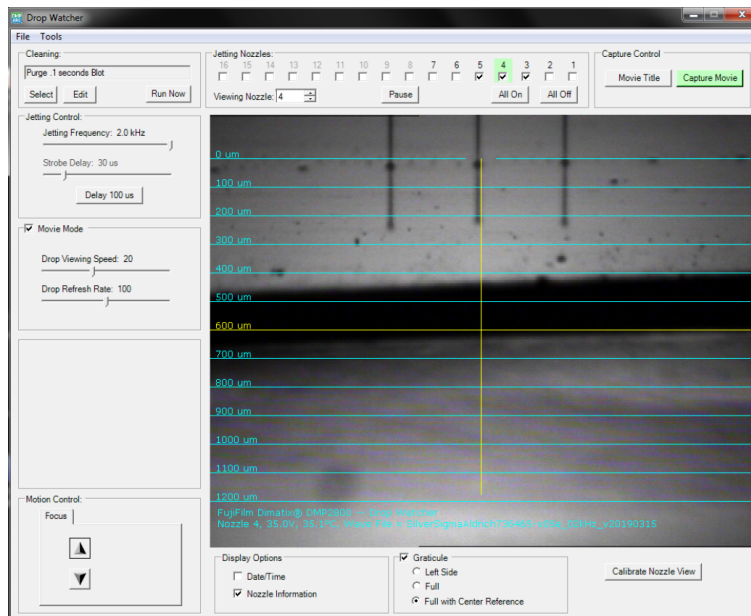
Viskozita [cPs]	10 - 12
Povrchové napětí [dyn / cm]	28 - 42
Hustota [g / cm <sup>3</sup> ]	> 1
Velikost částic [μm]	< 0,2 μm (1/100 velikosti trysky)

Samotná tiskárna obsahuje dvě kamery. První kamera, Drop Watcher, slouží k nastavení parametrů vylétávajících kapek, což je nezbytné pro kvalitní tisk. Dále kameru Fiducial, která se využívá pro nastavení počátku tisku, kontroly rozměrů struktury a optické kontrole. Tiskárna poté disponuje plotnou pro uchycení substrátu pomocí vakua. Plotna se pohybuje ve směru osy x i y kolem osy z pro zajištění rovnoběžného tisku s hranou substrátu a je možné ji vyhřívat až do teploty 60 °C.

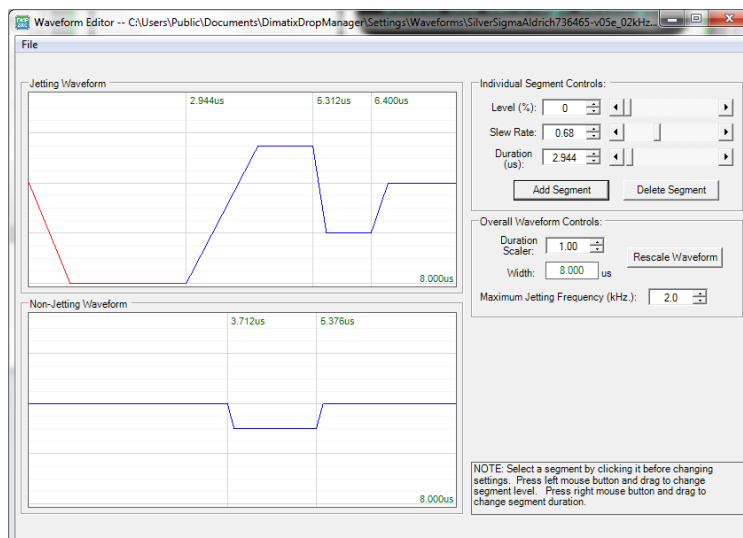
#### 4.2.2 Průběh přípravy k tisku

Před zahájením tisku musí být provedeno několik úkonů, aby byla zajištěna kvalita tisku. V prvním kroku naplníme cartridge inkoustem. Je vhodné použít filtr o propustnosti 0,2  $\mu\text{m}$ , aby nedošlo k ucpání trysek. Dále se cartridge převrátí vzhůru nohama, díky čemuž může inkoust stéct do jednotlivých trysek. Pokud opětovně používáme cartridge, pak je nezbytné ji po jejím odebrání z chladničky nechat přibližně 20 minut odležet, aby se přizpůsobila okolní teplotě. Před vložením cartridge do tiskárny je vhodné ještě provést kontrolu trysek z důvodu možného vytékání inkoustu. Po instalaci cartridge vybereme substrát, na který chceme tisknout. Všechny mé výrobky byly zhotoveny na PET fólii o tloušťce 140  $\mu\text{m}$  Novacentrix Novele IJ-220 [42], jejíž povrch je ošetřen již od výrobce, což je nezbytné pro kvalitu tisku. Posléze se pomocí Drop watcher kamery viz obrázek 22 nastaví parametry vylétávajících kapek. Jejich rychlost lze regulovat pomocí napětí, frekvence a teploty. Na tomto obrázku se kontrolují 3 trysky ze 16 trysek, přičemž se hledí na to, aby se kapky pohybovali po přímce rychlostí kolem 7 m/s. o Taková kontrola musí být ideálně provedena u všech trysek.

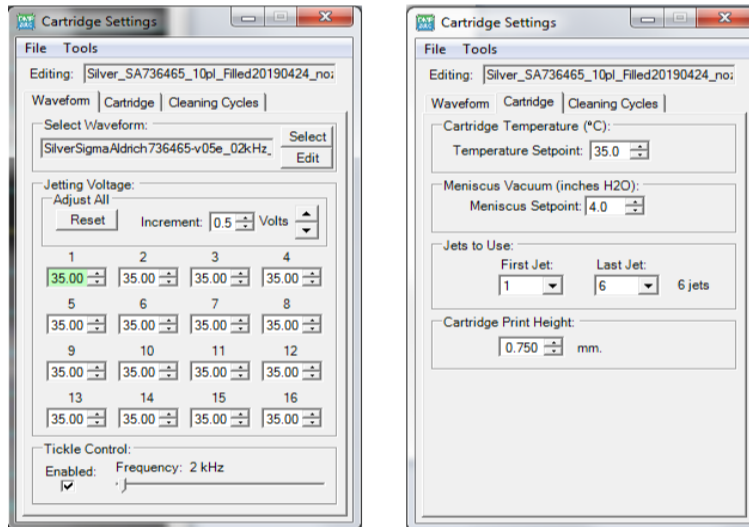
Pro optimální nastavení vlastností tisku pro jednotlivé inkousty slouží Waveform editor, kde lze nastavit dobu trvání, amplitudu a dobu přeběhu napěťové vlny. Příklad nastavení vlny je na obrázku 23. Software tiskárny dále umožňuje nastavení vlastností cartridge. Lze vhodně nastavit výšku cartridge nad substrátem, teplotu, frekvenci, napětí či četnost čistících cyklů viz obrázek 24. Po nahrání motivu k tisku viz obrázek se přistoupí k nastavení počátku tisku. K tomu slouží Fiducial kamera, díky níž lze také měřit vzdálenosti mezi cestami, pozorovat natištěnou strukturu či pořizovat fotografie. Okno Fiducial kamery je k nahlédnutí na obrázku 25



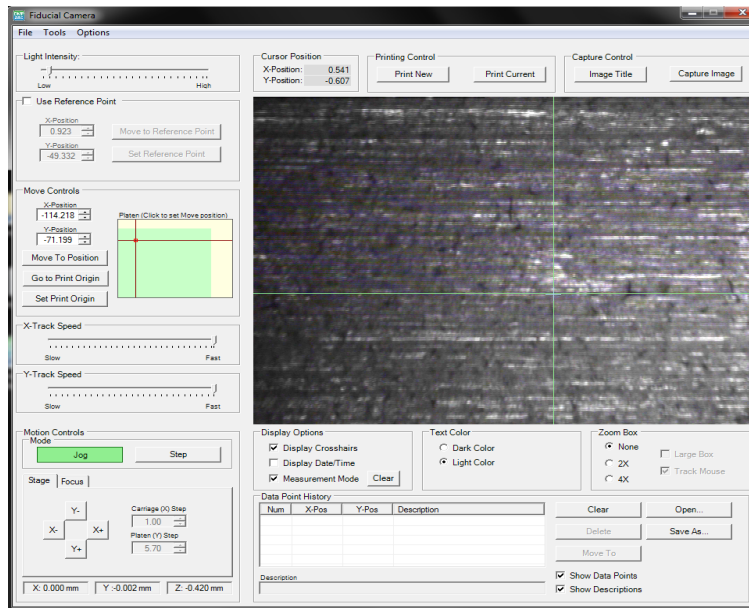
Obrázek 22: Drop watcher kamera pro kontrolu kvality kapek



Obrázek 23: Waveform editor pro nastavení vlastností vlny



Obrázek 24: Nastavení vlastností cartridge

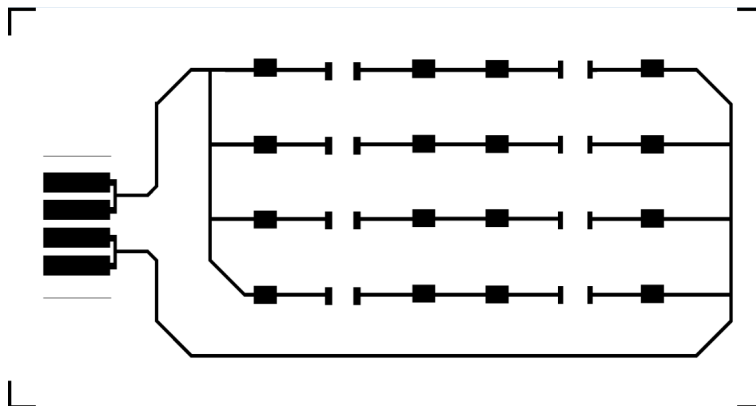


Obrázek 25: Nastavení tisku pomocí Fiducial kamery

### 4.3 Způsoby montáže SMD součástek na substrát

Dalším krokem, který se v pozdějších fázích vývoje ukázal více problematický, než se původně předpokládalo, byla montáž SMD součástek na substrát. K dispozici jsem měl původně vodivé lepidlo od společnosti Diymore, které měly být vhodné pro moji aplikaci. Dokumentace k výrobku [43] byla nicméně velmi strohá a neobsahovala potřebné informace například o způsobu skladování. Při prvním pokusu aplikovat pastu nebylo možné pastu vytlačit a při další snaze o její použití bylo jasné, že tento produkt nebude možné použít.

Bylo tedy třeba nejdříve najít vhodný způsob montáže součástek na substrát, který by měl nízký odpor kontaktů a dobrou odolnost v tahu. Vytvořil jsem proto testovací obvod s nízkou časovou náročností tisku, na kterém jsem jednotlivé způsoby testoval. U uvedených statistiky v další části je nicméně nutné brát v potaz fakt, že nebylo vyrobeno dostatečné množství sad pro řádnou statistiku. Nejnižší počet vyrobených sad by byl alespoň 10. Dalším problémem je způsob měření, kdy pomocí měřících hrotů dochází k poškozování vodivých cest, a tedy ke změnám parametrů. Obrázek testovací struktury je k nahlédnutí zde 26. Tato struktura byla vytištěna vždy 6 tryskami za dobu jedné hodiny a žíhána též hodinu při teplotě 130 °C. Obsahuje motiv pro čtyřpinový konektor AMPHENOL CLINCHER™ [44] Tloušťka čar u všech motivů činí 1 μm [45], šířka čáry potom 300 μm.



Obrázek 26: Testovací obvod pro montáž SMD součástek

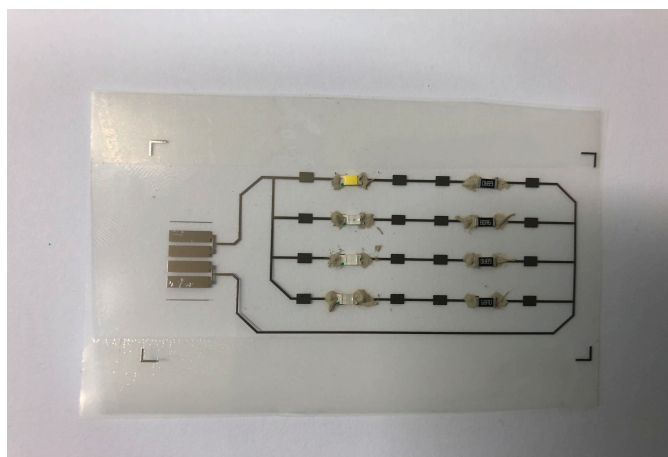
Na katedře mikroelektroniky byly okamžitě k dispozici stříbrná pasta DGP80 od společnosti Sigma Aldrich a dále pájka Microprint 2004 o složení Sn62Pb36Ag2 od firmy Elchemco. Jako první jsem testoval stříbrnou

pastu, jejíž vlastnosti jsou uvedeny v tabulce 8. Spoje vytvořené touto pastou měly potom, co se teplotně upravily v sušárně podle [46], nízký odpor kontaktů (vysoký procházející proud) a vysokou výtěžnost viz tabulka 9. Její nevýhodou byl nicméně způsob nanášení, kdy vzhledem k její viskozitě nebylo možné použít dávkování stříkačkou. Pasta navíc vytvářela na svých koncích nepříjemné vlasečnice, které by mohly být zřejem zkratů. Dalším problémem byla i vysoká cena pasty a křehkost spojů, díky čemuž se součástky snadno odtrhly. Testovací obvod se stříbrnou pastou je na obrázku 27.

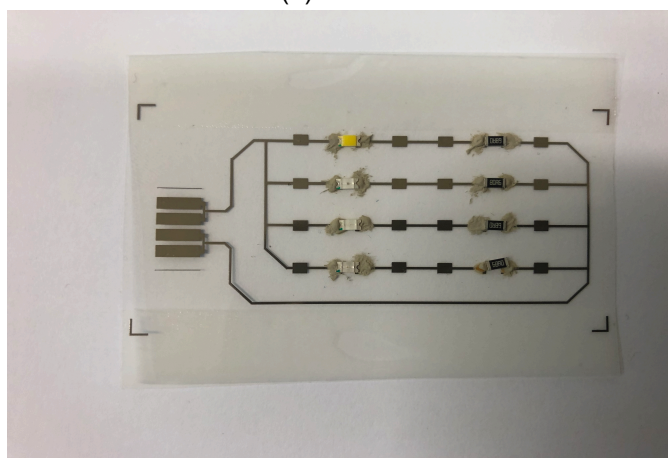
Tabulka 8: Vlastnosti stříbrné pasty DGP80 [46]

Skladovací teplota [°C]	6 - 8
Obsah pevných částic [%]	>= 7
Viskozita [cPs]	100 000 - 300 000
Podmínky vytvrzování	120 - 150 °C po 30-60 minut
Cena za 25 g [Kč]	6710





(a) Sada 1



(b) Sada 2

Obrázek 27: Montáž součástek pomocí stříbrné pasty DGP80

Tabulka 9: Statistika výtěžnosti a protékajícího proudu pro stříbrnou pastu

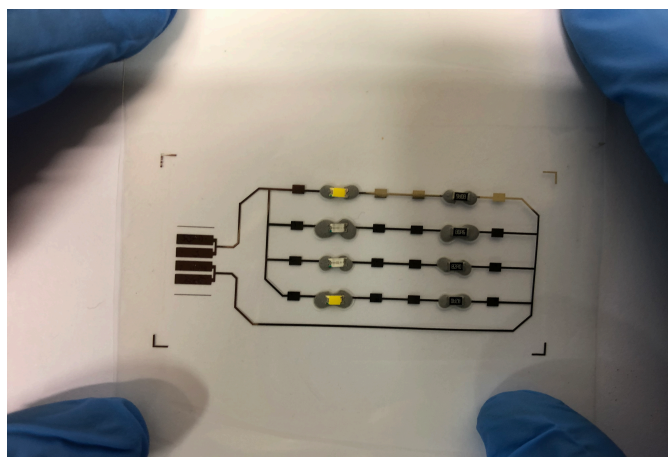
Sada	Výtěžnost [%]	Protékající proud [mA]
1	100	18
2	100	18

Vzhledem k výše uvedeným nedostatkům jsem přistoupil k dalšímu způsobu, a to k pájení horkým vzduchem. Nejdříve jsem využil dostupnou pájku

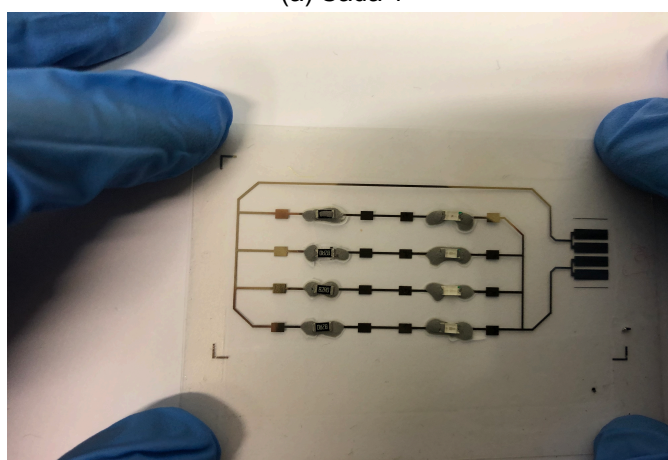
Microprint 2004 (Sn62Pb36Ag2), již vyrábí společnost Elchemco [47]. Tato pájka má bod tání 179°C, přičemž teplota horkého vzduchu musí být ještě mnohem vyšší. Teplota, při níž začne vykazovat PET fólie známky degradace, je 150°C, tedy mnohem nižší, než jakou by bylo třeba snést. Proto jsem experimentálně zkoušel působit různě vysokou teplotou v relativní blízkosti spoje pouze na krátkou dobu po několika intervalech. Výsledek byl ovšem velmi špatný. Touto metodou vznikaly pouze studené spoje nebo nevznikaly vůbec. Na druhou stranu bylo její výhodou pro komfort pájení přítomnost olova, které přispělo k dobré přilnavosti a možnost nanášení jehlou pomocí stříkačky. Pro standardní měděné plošné spoje by jistě našla uplatnění, ale její použití pro hybridní elektroniku na PET fólii lze vzhledem k vysoké teplotě tání s jistotou vyloučit. Výrobce neuvádí k pájce příliš mnoho technických informací, nicméně základní vlastnosti pájky Microprint 2004 jsou k nahlédnutí v tabulce 10, testovací sady pro tuto pájku jsou na obrázku 28 a statistika pak v tabulce 11.

Tabulka 10: Vlastnosti pájky Microprint 2004 od Elchemco [47] [48]

Skladování	Chladné, suché a uzavřené místo
Obsah tavidla	10-20
Teplota tání [°C]	179
Cena za 40 g [Kč]	669



(a) Sada 1



(b) Sada 2

Obrázek 28: Montáž součástek pomocí pájky Microprint 2004

Tabulka 11: Statistika výtěžnosti a odporu kontaktů pro pájku Microprint 2004

Sada	Výtěžnost [%]	Odpor kontaktů [ $\Omega$ ]
1	0	-
2	0	-

Mé další úvahy směřovaly k nalezení nízkoteplotní pájky s teplotou tání solidu i liquidu pokud možno nižší než 150°C. Tomuto požadavku odpovídá bezolovnatá pájka Sn42Bi58 s velmi blízkými teplotami tání liquidu i solidu v oblasti 141°C. Takovou pájku dodává společnost Hotair viz [49]. Tato pájka byla použita v článku [6], kde se testovala výtěžnost SMD rezistorů o různých velikostech pouzdra. Ta klesala s rostoucí velikostí pouzdra, přičemž dosažené výsledky se pohybovaly v rozmezí 0 - 80 % podle typu SMD pouzdra od 0402-1206. I přesto jsem se rozhodl podobný experiment uskutečnit v našich podmínkách. Využil jsem třízónovou pájecí pec, přičemž doba v jednotlivých zónách byly nesrovnatelně delší oproti uvedenému článku. Díky tomu sice došlo k zapájení součástek, ale vodivé cesty byly vtaženy tajícím kovem do sebe viz 29b. Lepších výsledků by se pravděpodobně dosáhlo ve velmi krátkých časech (cca sekunda), kdy by se musel přesně vystihnout okamžik smočení pájky tak, aby nedošlo k absorbování vodivé cesty. Podobných výsledků jsme dosáhli i za použití laboratorní sušárny viz 29a. Výsledky a podmínky experimentu jsou k nahlédnutí v tabulce 13, respektive v tabulce 12. Pro doplnění též předkládám vlastnosti pájky v tabulce 14.

Tabulka 12: Parametry pájecí pece

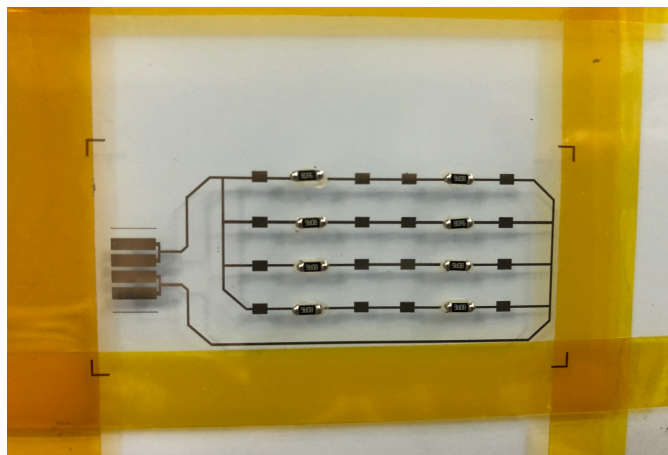
	Zona 1	Zona 2	Zona 3
Teplota [°C]	90	110	153
Čas [s]	120	120	88

Tabulka 13: Výtěžnost a odpor kontaktů jednotlivých pouzder

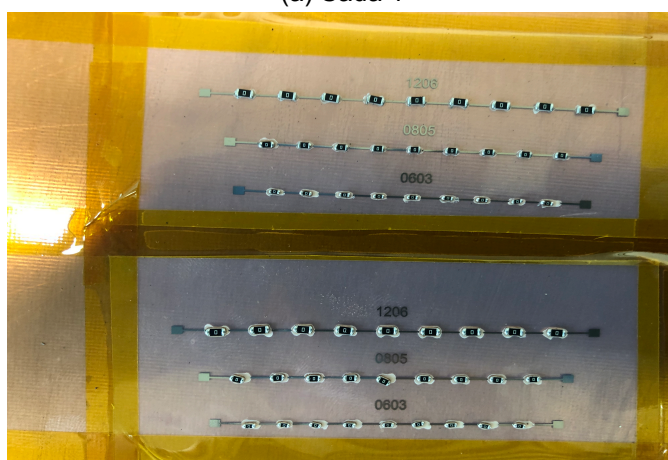
Velikost pouzdra	Výtěžnost [%]	Odpor kontaktů [ $\Omega$ ]
1206	0	-
0805	0	-
0603	0	-

Tabulka 14: Vlastnosti pájky Sn42Bi58 distribuované od Hotair [49] [50]

Skladovací teplota [°C]	3-8
Obsah tavidla [%]	10 - 20
Teplota tání [°C]	141
Cena za 20 g [Kč]	484



(a) Sada 1



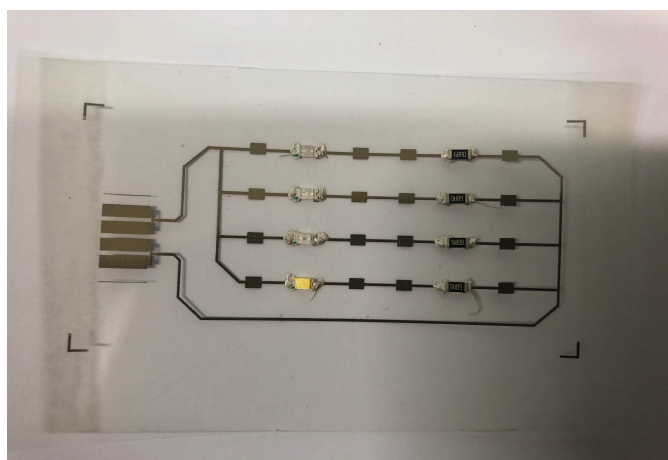
(b) Sada 2

Obrázek 29: Montáž součástek pomocí pájky Sn42Bi58 od Hotair

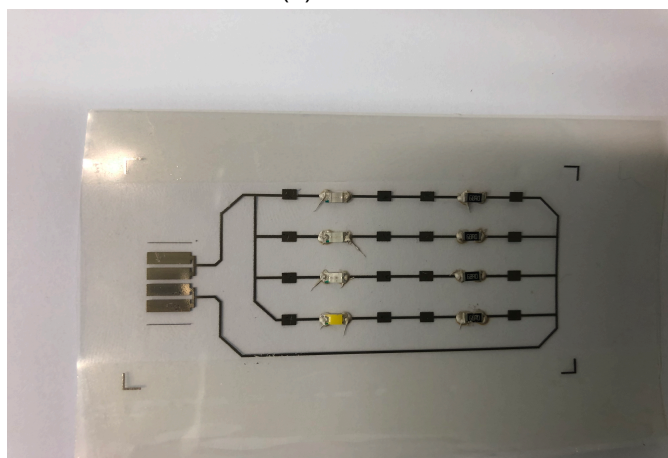
Další možností, která se v souvislosti s montáží součástek nabízí, je použití elektricky vodivého lepidla. Pro další testování jsem použil isotropní vodivé lepidlo ELPOX ER 55MN, jehož vlastnosti jsou k nahlédnutí v tabulce 15. Toto lepidlo se velmi osvědčilo. V jeho prospěch hraje možnost přesného dávkování pomocí stříkačky, má velmi dobrou přilnavost a nízký odpor kontaktů po teplotní úpravě v sušárně díky příměsi stříbra. Nevýhodou může být křehkost spojů a nutnost fixace součástek lepidlem. Statistika pro tento způsob montáže je v tabulce 16, zkoušené sady potom na obrázku 30.

Tabulka 15: Vlastnosti elektricky vodivého lepidla ELPOX ER 55MN [51]

Obsah stříbra [%]	70
Skladovatelnost	Alespoň 6 měsíců při teplotě 5 °C
Viskozita [cPs]	24500 - 48000
Vytvrzování	15 - 20 minut při teplotě 150 °C
Rezistivita [ $\mu\Omega \times \text{cm}$ ]	4 - 7,5 x 10 <sup>-5</sup>



(a) Sada 1



(b) Sada 2

Obrázek 30: Montáž součástek pomocí elektricky vodivého lepidla ELPOX ER 55MN

Tabulka 16: Statistika výtěžnosti a protékajícího proudu pro elektricky vodivé lepidlo ELPOX ER 55 MN

Sada	Výtěžnost [%]	Protékající proud [mA]
1	100	20
2	100	20

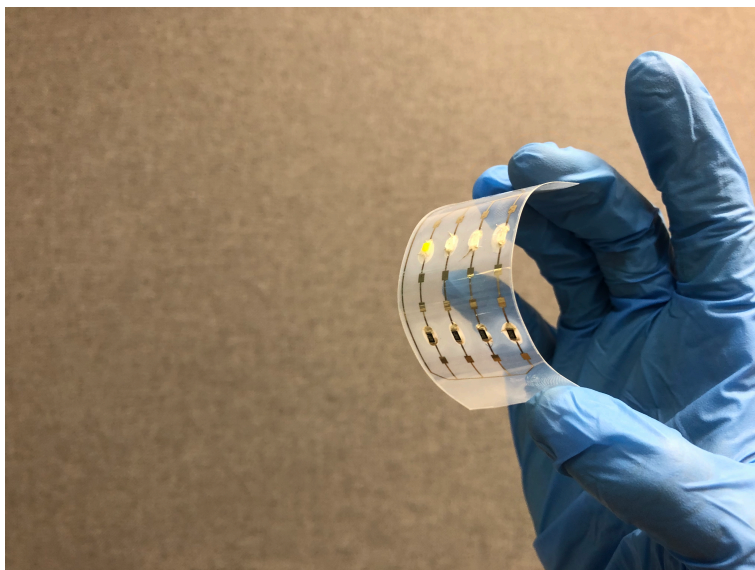
#### 4.4 Fixace součástek

Z testovaných druhů vodivých past a pájek se tedy vzhledem k výše uvedeným závěrům nejvíce osvědčilo elektricky vodivé lepidlo ELPOX ER 55 MN. Spoje vytvořené tímto lepidlem mají nicméně jednu nevýhodu, a tou je zvýšená křehkost. Po hybridní elektronice však požadujeme ohyb, a proto je třeba SMD součástky pevně zafixovat k substrátu, přičemž vodivost kontaktů by se v ideálním případě neměla změnit. Pro vývoj hybridní elektroniky jsem využíval jednosložkové vteřinové lepidlo Contact VA 100 vzhledem k velmi rychlé přilnavosti a osvědčeným vlastnostem viz tabulka 17.

Tabulka 17: Vlastnosti vteřinového lepidla Contact VA 100 [52]

Viskositá při 20 °C [mPa x s]	60 - 120
Počáteční přilnavost k tvrzenému PVC [s]	10 - 60
Teplotní odolnost [°C]	-50 až 80
Pevnost ve smyku pro PVC [N/mm <sup>2</sup> ]	13

Aby bylo možné obvody testovat v ohybu, bylo by zapotřebí testovacího zařízení, kdy by se obvod ohýbal při různě velkých definovaných průměrech, přičemž by se po navrácení do původního stavu testovala funkčnost obvodu. Takto definovaný způsob jsem nicméně nedokázal vytvořit, a tak pouze přikládám pro ilustraci obrázek obvodu v ohybu 31.

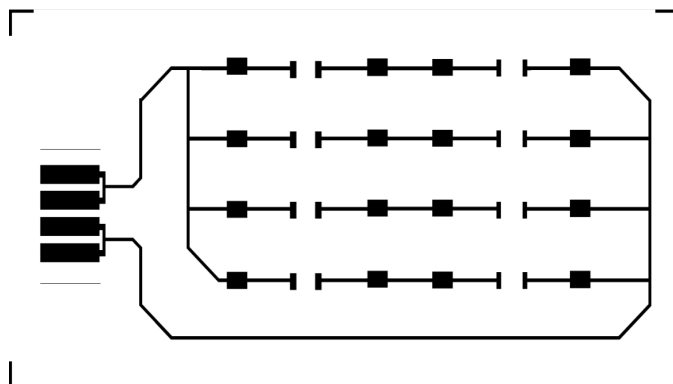


Obrázek 31: Demonstrace ohybu

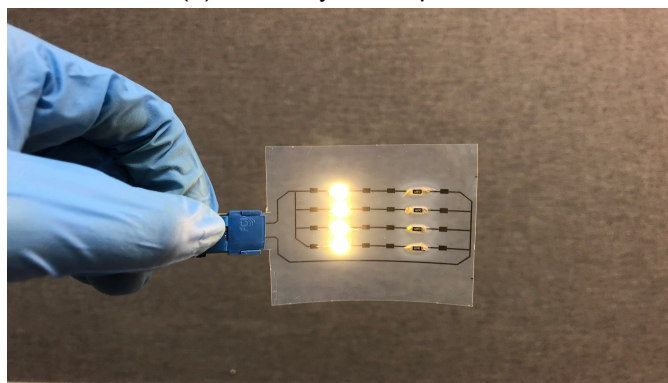
#### **4.5 Demonstrace hybridní elektroniky a návrhy pro další optimalizaci**

Mým cílem bylo vytvořit jednoduchý obvod, který by demonstroval použitelnost hybridní elektroniky a zároveň poukázal na její výhody či nedostatky. Finálním produktem, ke kterému jsem své úsilí směřoval, byla lampička s jednoduchým nastavím jasu a volby doplňkových barev RGB. Jako úplně nejjednodušší obvod přichází do úvahy zapojení s předřadného rezistoru s LED bez jakéhokoli řízení. Takový obvod se mi podařilo funkčně natisknout a zprovoznit viz obrázek 32.

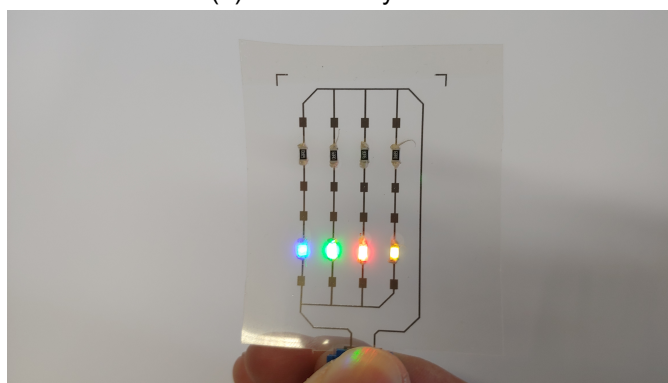




(a) Navržený obvod pro tisk



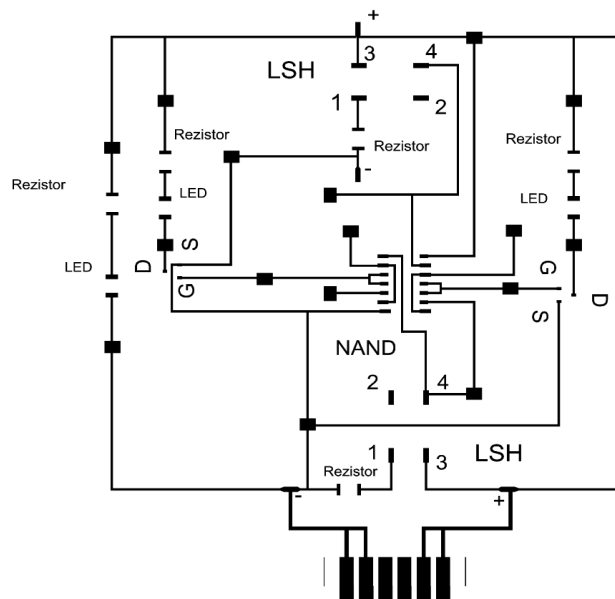
(b) Realizovaný obvod



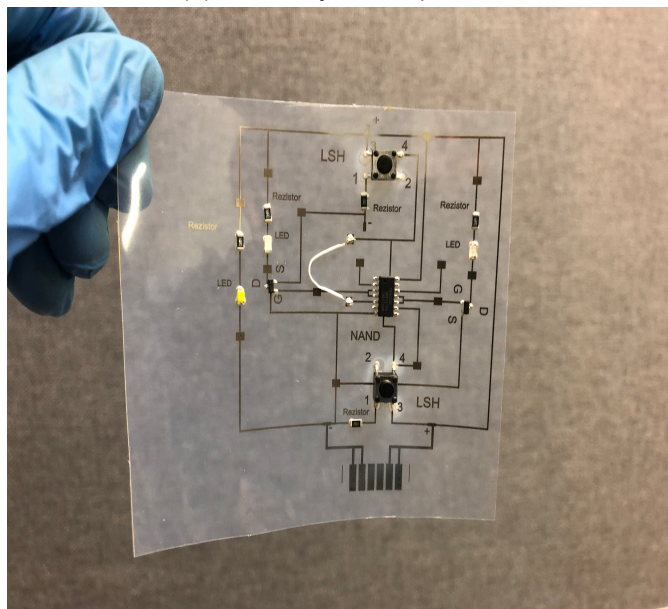
(c) Realizovaný obvod

Obrázek 32: Demonstrace hybridní elektroniky na jednoduchém obvodu

Dalším krokem bylo vytvořit obvod, který by se již začínal blížit svoji funkci k finálnímu, nicméně bylo nutné též vzít v potaz časovou náročnost tisku a především to, že v dané době nebyla možnost křížení cest zcela vyřešena. Bylo tedy nutné použít i drátovou propojku vedenou vzduchem. Navržený obvod obsahoval integrovaný obvod NAND, jenž jsem využil pro realizaci klopného obvodu RS. Klopný obvod RS mi umožňoval pomocí tlačítek měnit barvy LED podle toho, jaký vstup byl zrovna aktivní, přičemž vypnutí nebylo v tomto obvodu možné. Hlavní bílé světlo bylo bez řízení. Návrh obvodu a jeho realizace je k nahlédnutí na obrázku 33. Schéma zapojení potom v příloze C.



(a) Navržený obvod pro tisk



(b) Realizovaný obvod

Obrázek 33: Demonstrace hybridní elektroniky na první verzi lampičky

Tento obvod nicméně nebyl funkční. Při zkoumání příčiny jsem jsem zaměřil na kontrolu kontaktů a měření odporu cest, který je u inkjet technologie zásadním parametrem. Při kontrole kontaktů byla nalezena zkratovaná LED, což lze vysvětlit vlastnostmi použitého izotropního lepidla, které i přes opatrné nanášení může vytvářet zkratky vzhledem k tomu, že na svých koncích zanechává dlouhé vlasečnice. Hlavním problémem byl pravděpodobně vysoký odpor cest. Ten jsem testoval pomocí jednoduchého návrhu dvou natištěných cest, přičemž jedna byla osazena rezistorem R0 pouzdra 1206 a druhá neosazena viz obrázek 34.



Obrázek 34: Testování odporu kontaktů a vodivé cesty

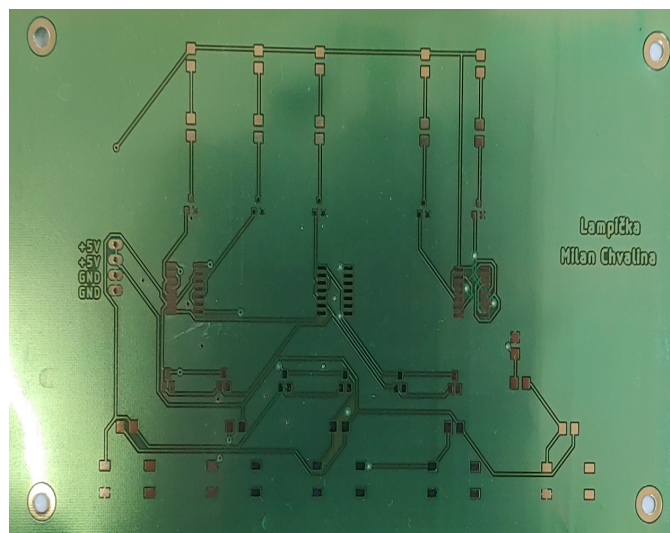
Odpor osazené cesty činil přibližně  $29 \Omega$ . Následně jsem postupně proměřoval jednotlivé úseky neosazené cesty, přičemž po odečtení odporu jednotlivých úseků od odporu osazené cesty je možné zjistit odpory jednotlivých kontaktů. Odpor vodivých cest byl nicméně mnohem větší než odpor osazené cesty, činil přibližně  $47 \Omega$ . Použité izotropní vodivé lepidlo obsahuje stříbro, lze tedy očekávat, že je výrazně vodivější než natištěné cesty o 3 vrstvách, proto jsem došel k těmto výsledkům. Nicméně takový odpor vodivých cest musí nutně být zohledněn při návrhu, jelikož dochází k vysokým úbytkům napětí, což může být velmi problematické zvláště při bateriovém napájení. Připadá tedy v úvahu zvýšení počtu vrstev při tisku a rozšíření vodivých cest, přičemž též hraje roli teplota žíhání. Experimentálně se jeví jako vhodné zvýšení počtu vrstev ze 3 na 6 a rozšíření cest z  $300 \mu\text{m}$  na  $600 \mu\text{m}$ , nicméně je nutné také vzít potaz časovou náročnost tisku při takovém počtu vrstev.

Dalším námětem pro optimalizaci návrhu je měření parametrů obvodu.

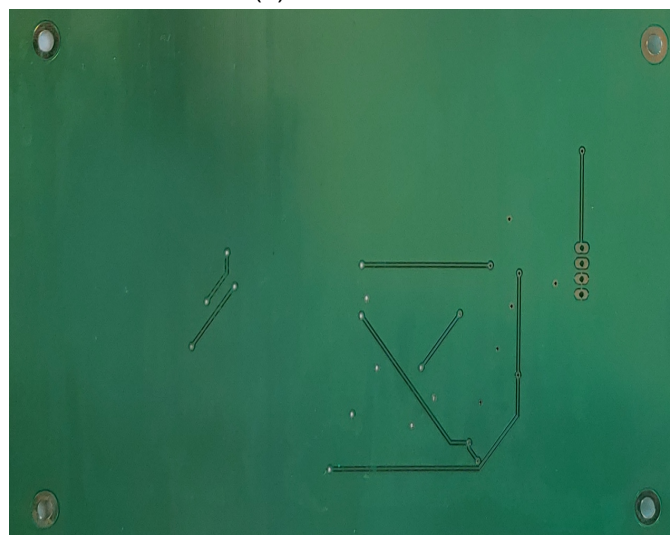
Vzhledem k tomu, že vodivé cesty jsou tvořeny velmi tenkými vrstvami, je jakékoli měření pomocí hrotů problematické, jelikož dochází k poškození cest, což vede k degradaci natištěného obvodu. Proto jsem při návrhu přidal měřicí plošky, na kterých je možné provádět opakovaná měření bez poškození obvodu. I jejich životnost je nicméně též omezená.

Obvody na flexibilním substrátu nicméně umožňují i konvenční technologie jako fotolitografie, přičemž substrát tvoří tkanina ze skelných vláken sycená epoxidovou pryskyřicí označovaná FR4, v České republice též známý pod názvem Cuprexit. Tloušťka substrátu se pohybuje u běžných aplikací kolem 1 - 1,5 mm. Při této tloušťce nicméně obvod není možné ohýbat. Vhodná tloušťka desky pro flexibilní aplikace je 0,1 mm, což se v současnosti běžně komerčně nabízí v podobě již zmíněné FR4 a také polyimidové desky Pyralux. Klasická deska plošného spoje poskytuje řadu výhod, jako jsou nízký odpor vodivých cest, možnost standardního způsobu pájení či návrh několikavrstvých desek plošných spojů. Tyto výhody jsou nicméně kompenzovány značně vyšší cenou a ztrátou průhlednosti.

Pro můj finální obvod jsem se vzhledem k výše uvedeným výhodám rozhodl využít právě komerční variantu desky plošného spoje. Tento obvod umožňuje nastavení intenzity bílých LED pomocí klopných obvodů D. Dále je možný výběr ze 3 barev dokreslujících LED pomocí klopných obvodů RS realizovaných obvodu NAND, přičemž je možné všechny LED vypnout. Tento obvod jsem navrhl ve vývojovém prostředí pro elektroniku Eagle a nechal zhotovit ve firmě Printed. Desky plošných spojů jsem bohužel nestihl v termínu odevzdání bakalářské práce osadit, a tak uvádím pouze obrázek neosazené desky 35 a schéma zapojení v příloze C



(a) Horní vrstva



(b) Spodní vrstva

Obrázek 35: Navržená deska plošného spoje vyrobená společností Printed

## 5 Závěr

Cílem této práce bylo seznámení se s hybridní tištěnou elektronikou na flexibilních substrátech, jejím vývojem a realizací zvoleného testovacího obvodu.

Po seznámení se s podstatou hybridní elektroniky jsem si zvolil obvod pro demonstraci smyslu hybridní elektroniky. Zprvu jsem se musel seznámit s postupem tištění struktur na materiálové tiskárně Dimatix DMP 2831, což byl poměrně náročný proces, jelikož s inkjet technologií jsem doposud neměl žádnou zkušenost. Největší překážkou bylo poté nalezení vhodné metody pro montáž SMD součástek. Jako jediná použitelná metoda se ukázalo použití izotropního vodivého lepidla ELPOX ER 55 MN na bázi stříbra, jelikož spoje vytvořené stříbrnou pastou DGP80 [46] byly příliš křehké.

V podkapitole 4.5 byly demonstrovány výhody a nevýhody hybridní elektroniky na zvolených obvodech. Byl realizován a úspěšně vyzkoušen obvod s LED a předřadnými rezistory. Dále navrhuji provést testy spolehlivosti, abychom při dlouhodobém provozu mohli posoudit vliv prostředí (teplota, vlhkost, UV záření aj.) na použité lepidlo i samotný obvod a též provést definovaný cyklický test ohybu. Složitější obvody se mi nepodařilo zprovoznit. Hlavní výzvou se zdá být vysoký odpor tištěných cest. Ten lze sice redukovat počtem natištěných vrstev, nicméně časová náročnost tisku by mohla být u komplexnějších obvodů neúnosná. Dalším problémem, který je třeba řešit, je způsob měření zhotovených obvodů. Měření pomocí hrotů není s touto technologií příliš kompatibilní, nedostatky lze alespoň zmírnit natištěním měřicích plošek. Toto řešení je nicméně neúplné a je zapotřebí se touto problematikou při návrhu zabývat.

Finální obvod zhotovený standardní fotolitografickou metodou na substrátu FR4 o tloušťce 0,1 mm by měl sloužit pro porovnání výhod a nevýhod s inkjet technologií. Desky plošných spojů jsem nicméně obdržel příliš pozdě na to, abych je mohl osadit součástkami v termínu odevzdání bakalářské práce. Osazené desky by měly být k dispozici k obhajobě.

## Reference

- [1] Chytré město. In:© 2019 *Enterprise Management 360* [online]. Enterprise Management 360, © 2019. [vid 6. 4. 2019]. Dostupné z: <https://www.em360tech.com/tech-news/5g-networks-growing-around-the-world/>
- [2] Chytrá domácnost. In:*IoT Evolution World* [online]. Technology Marketing Corporation, © 2019. [vid 6. 4. 2019]. Dostupné z: <https://www.iotevolutionworld.com/smart-home/articles/439553-beyond-novelty-smart-homes-safety-security-personal-well.htm>
- [3] LI, Xiaotian, Henrik ANDERSSON, Johan SIDÉN a Thomas SCHÖN, 2018. Soldering surface mount components on screen-printed Ag patterns on paper and polyimide substrates for hybrid printed electronics. *Flexible and Printed Electronics* [online]. B.m.: IOP Publishing, 3(1). ISSN 20588585. Dostupné z: doi:10.1088/2058-8585/aa9dc7
- [4] JAYNES, E.T. T a F.W. W CUMMINGS, 1963. *Stamp @ leeeexplore.lee.org* [online]. 1963. ISBN 9781467301831. Dostupné z: doi:10.1109/SSP.2012.6319793
- [5] SUGANUMA, Katsuaki. *Introduction to Printed Electronics*. New York: Springer, 2014. ISBN 978-1-4614-9624-3e
- [6] ANDERSSON, Henrik, Johan SIDÉN, Vincent SKERVED, Xiaotian LI a Linnea GYLLNER, 2016. Soldering Surface Mount Components Onto Inkjet Industrial Processes. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies* [online]. 6(3), 478–485. ISSN 2156-3950. Dostupné z: doi:10.1109/TCPMT.2016.2522474
- [7] Kapton. In:*Amazon Technologies, Inc.* [online]. Amazon Technologies, Inc., © 1996 - 2019. [vid 17. 3. 2019]. Dostupné z:<https://www.amazon.com/CS-Hyde-Kapton-Polyimide-Non-Adhesive/dp/B005XOT6KI>
- [8] PEN substrát. In:*EMC RF RFI Filter, Window and Displays*, Visiontek [online]. [vid 20. 3. 2019]. Dostupné z: [http://www.visionteksystems.co.uk/itopen\\_15.htm](http://www.visionteksystems.co.uk/itopen_15.htm)
- [9] Papírový substrát. In:*IEEE Spectrum* [online]. Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., © 2019. [vid 20. 3. 2019]. Dostupné



z: <https://spectrum.ieee.org/semiconductors/materials/electronics-on-paper>

- [10] *Comparison between various flexible substrates used for packaging* [online]. ResearchGate. [vid. 1. 5. 2019] Dostupné z: [https://www.researchgate.net/figure/Comparison-between-various-flexible-substrates-used-for-packaging-UTC\\_tbl3\\_323758164](https://www.researchgate.net/figure/Comparison-between-various-flexible-substrates-used-for-packaging-UTC_tbl3_323758164)
- [11] VLADU, Mihai Irmia, GLOWACKI, Eric D., SARICIFTCI, Niyazi S. a BAUER, Siegfried. *Green Materials for Electronics*. Weinheim: Wiley VCH, 2017. ISBN 978-3-527-33865-8
- [12] *Datasheet* [online]. DuPont Teijin Films. [vid. 1. 5. 2019] Dostupné z: <http://69.67.54.76/FilmEnterprise/Datasheet.asp?ID=271Version=US>
- [13] *Datasheet* [online]. DuPont Teijin Films. [vid. 1. 5. 2019] Dostupné z: <http://usa.dupontteijinfilms.com/wp-content/uploads/2017/01/ST506-Datasheet.pdf>
- [14] *TEONEX* [online]. DuPont Teijin Films. [vid. 1. 5. 2019] Dostupné z: [http://www.iec-international.com/pdf/pen\\_teonexq51.pdf](http://www.iec-international.com/pdf/pen_teonexq51.pdf)
- [15] *DUPONT TM*, 2019. DuPont TM Kapton HN ® [online]. 5213, 1–4. ISSN 1436-4522. Dostupné z: doi:10.1002/vnl.20088
- [16] *DuPont Kapton 200FWR919* [online]. DuPont. [vid. 1. 5. 2019] Dostupné z: <https://www.dupont.com/content/dam/Dupont2.0/Products/Electronics-and-imaging/Literature/DEC-Kapton-200-FWR.pdf>
- [17] TONG, Ge, Zhou JIA a Joseph CHANG, 2018. *Flexible Hybrid Electronics: Review and Challenges*. Proceedings - IEEE International Symposium on Circuits and Systems [online]. B.m.: IEEE, 2018-May, 1–5. ISSN 02714310. Dostupné z: doi:10.1109/ISCAS.2018.8351806
- [18] OLED panel. In: *Which?* [online]. Which?, © 2019. [vid 18. 5. 2019]. Dostupné z: <https://www.which.co.uk/news/2017/10/is-oled-lighting-the-future-of-home-illumination/>
- [19] *Struktura DSSC*. In: *ResearchGate* [online]. ResearchGate, © 2019. [vid. 15. 4. 2019]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/figure/The-structure-of-dye-sensitized-solar-cells-DSSCs-23\\_fig4\\_328407535](https://www.researchgate.net/figure/The-structure-of-dye-sensitized-solar-cells-DSSCs-23_fig4_328407535)

- [20] DSSC panel. In: *TechnologyReview* [online]. Network Solutions, © 2019. [vid 15. 4. 2019]. Dostupné z: <https://www.technologyreview.com/s/428025/cheap-dye-sensitized-solar-cell-moves-toward-commercialization/>
- [21] Thin-film solární panel. In: *Global Daily* [online]. United Nations Foundation, © 2019. [vid 15. 4. 2019]. Dostupné z: <http://globaldaily.com/climasphere/global-challenge-global-solutions-efficient-flexible-thin-film-solar-cells/>
- [22] OLED displej. In: *Asian Review* [online]. NIKKEI INC., © 2019. [vid 15. 4. 2019]. Dostupné z: <https://asia.nikkei.com/Business/Japan-enters-display-fray-with-world-s-first-printed-OLED-panels>
- [23] Příklad kontroly kvality potravin. In: *Packaging World* [online]. PMMI Media Group, © 2019. [vid 15. 4. 2019]. Dostupné z: <https://www.packworld.com/article/trends-and-issues/smartactive-packaging/putting-power-printed-electronics-packaging>
- [24] Senzor jako náplast. In: *Dezeen* [online]. [vid 15. 4. 2019]. Dostupné z: <https://www.dezeen.com/2013/03/28/biostamp-temporary-tattoo-wearable-electronic-circuits-john-rogers-mc10/>
- [25] FLEXIBLE, Nextflex a Electronics DEVELOPMENT, 2018. Flexible Hybrid Electronics [online]. (March), 1–50. Dostupné z: <https://summit.omep.org/wp-content/uploads/2017/03/FHE-101-Overview-OMEP-12mar2018-em.pdf>
- [26] flexible-and-stretchable-electronics. [online] SlideShare [vid. 25. 3. 2019]. Dostupné z: <https://www.slideshare.net/suryashobhan/flexible-and-stretchable-electronics>
- [27] SUBRAMANIAN, Vivek, Josephine B. CHANG, Alejandro de la Fuente VORNBROCK, Daniel C. HUANG, Lakshmi JAGANNATHAN, Frank LIAO, Brian MATIS, Steven MOLESA, David R. REDINGER, Daniel SOLTMAN, Steven K. VOLKMAN a Qintao ZHANG. Printed electronics for low-cost electronic systems: Technology status and application development: IEEE Xplore [online]. Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2008. [vid. 27. 4. 2019]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4681691>

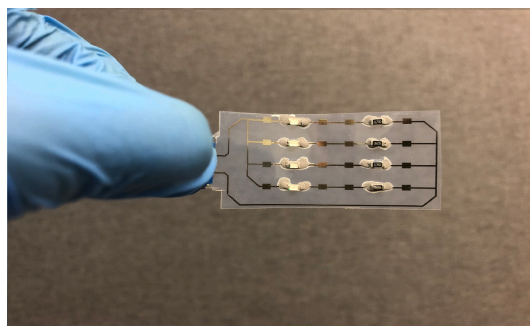
- [28] *Ourlifesimplified* [online]. WordPress [vid. 21. 3. 2019]. Dostupné z: <http://ourlifesimplified.com/advantages-and-disadvantages-of-printed-circuit-boards-and-pcb-assembly/>
- [29] *Yasser Khan* [online]. Stanford University. [vid 27. 3. 2019]. Dostupné z: [http://web.stanford.edu/~ymkhan/projects/3\\_wearable\\_medical\\_devices/](http://web.stanford.edu/~ymkhan/projects/3_wearable_medical_devices/)
- [30] *ResearchGate* [online]. ResearchGate. [vid 27. 3. 2019]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/301492974\\_The\\_Road\\_to\\_Wrist-Wearable\\_Electronics](https://www.researchgate.net/publication/301492974_The_Road_to_Wrist-Wearable_Electronics)
- [31] ANDERSSON, Henrik A., Anatoliy MANUILSKIY, Stefan HALLER, Magnus HUMMELGÅRD, Johan SIDÉN, Christine HUMMELGÅRD, Håkan OLIN a Hans Erik NILSSON, 2014. Assembling surface mounted components on ink-jet printed double sided paper circuit board. *Nanotechnology* [online]. 25(9). ISSN 09574484. Dostupné z: doi:10.1088/0957-4484/25/9/094002
- [32] Epoxid stříbra. In: *ElliotElectronicSupply* [online]. ELLIOTT ELECTRONIC SUPPLY, © 2019. [vid 18. 3. 2019]. Dostupné z: <https://www.elliotelectronicssupply.com/chemicals/silver-conductive-epoxy.html>
- [33] Izotropní páska. In: *3M* [online]. 3M COMPANY, © 2019. [vid 18. 3. 2019]. Dostupné z: [https://www.3m.com/3M/en\\_US/company-us/all-3m-products/3M-XYZ-Isotropic-Electrically-Conductive-Adhesive-9712/?N=5002385+3294001408rt=rud](https://www.3m.com/3M/en_US/company-us/all-3m-products/3M-XYZ-Isotropic-Electrically-Conductive-Adhesive-9712/?N=5002385+3294001408rt=rud)
- [34] Anizotropní páska. In: *All-Spec* [online]. HISCO, © 2019. [vid 18. 3. 2019]. Dostupné z: <https://www.all-spec.com/Catalog/Adhesives-Sealants-Tapes/Adhesives/Epoxy-Adhesives/00051115525520-31196>
- [35] OSTFELD, Aminy E., Abhinav M. GAIKWAD, Yasser KHAN a Ana C. ARIAS, 2016. High-performance flexible energy storage and harvesting system for wearable electronics. *Scientific Reports* [online]. B.m.: Nature Publishing Group, 6. ISSN 20452322. Dostupné z: doi:10.1038/srep26122
- [36] Jia, W. et al. Wearable textile biofuel cells for powering electronics. *J. Mater. Chem. A* 2, 18184–18189 (2014).

- [37] ROSELLI, Luca, Nuno Borges CARVALHO, Federico ALIMENTI, Pulo MEZZANOTTE, Giulia ORECCHINI, Marco VIRILI, Chiara MARIOTTI, Richardo GONCALVES and Pedro PINHO. Smart Surfaces: Large Area Electronics Systems for Internet of Things Enabled by Energy Harvesting. In: IEEE Xplore [online]. Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2014. [vid. 27. 4. 2019]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6920003>
- [38] NILSSON, Hans-Erik, Tomas UNANDER, Johan SIDEN, Henrik ANDERSSON, Anatoliy MANUILSKYI, Magnus HUMMELGARD and Mikael GULLIKSSON. System Integration of Electronic Functions in Smart Packaging Applications. In: IEEE Xplore [online]. Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2012. [vid. 27. 4. 2019]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6255781>
- [39] *Dimatix Materials Printer DMP-2831* [online]. FUJIFILM. [vid 10. 5. 2019]. Dostupné z: [https://www.fujifilmusa.com/shared/bin/DMP-2831\\_Datasheet\\_05-13.pdf](https://www.fujifilmusa.com/shared/bin/DMP-2831_Datasheet_05-13.pdf)
- [40] *Silver Jet Ink* [online]. ANP Co. [vid 8. 5. 2019]. Dostupné z: [http://anapro.com/eng/product/silver\\_inkjet\\_ink.html](http://anapro.com/eng/product/silver_inkjet_ink.html)
- [41] FUJIFILM DIMATIX INC. FUJIFILM Dimatix Ink Tutorial. 2008
- [42] *Novele™ IJ-220 Printed Electronics Substrate-Inkjet Receptive.* [online]. Novacentrix. Dostupné z: [https://store.novacentrix.com/v/vspfiles/assets/images/novele%20ij-220\\_2212.2.pdf](https://store.novacentrix.com/v/vspfiles/assets/images/novele%20ij-220_2212.2.pdf)
- [43] *Silver conductive adhesive glue* [online]. AliExpress. [vid 12. 5. 2019]. Dostupné z: <https://www.aliexpress.com/item/Silver-Conductive-0-2ML-Glue-Wire-Electrically-Paste-Adhesive-Paint-PCB-Repair/32798465839.html>
- [44] *CLINCHER conector for flexible Circuitry*[online]. Amphenol. [vid 12. 5. 2019]. Dostupné z: <http://www.heilind.com/products/amphenol/fci/news/FCI%20Flex%20Clincher.pdf>
- [45] ZÁVESKÝ, Marek, 2016, Příprava a charakterizace tištěných elektronických struktur, [vid. 20. 5. 2016]
- [46] *Silver Conductive paste*[online]. Merck KGaA. [vid 8. 5. 2019]. Dostupné z: <https://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/735825?lang=enregion=CZ>

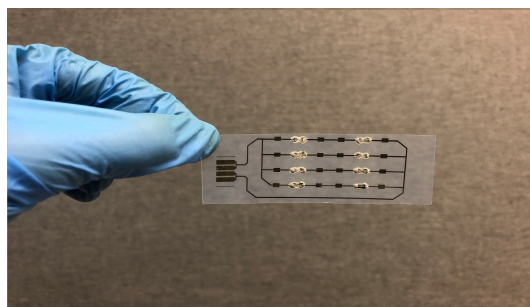
- [47] *Bezpečnostní list* [online]. GME. [vid 8. 5. 2019]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/data/attachments/bel.745-035.20.pdf>
- [48] *Pájka pasta Microprint 2004* [online]. PS Electronic. [vid 13. 5. 2019]. Dostupné z: <http://www.pselectronic.cz/k5601-2112-pajka-pasta-microprint-2004-.html>
- [49] *Bezolovnatá pájecí pasta s nízkým bodem tání Sn42Bi58 5ml(20g)* [online]. HOTAIR. [vid 13. 5. 2019]. Dostupné z: <https://www.hotair.cz/detail/pasty-ciny-lepidla/cinove-pasty/bezolovnata-pajeci-pasta-s-nizkym-bodem-tani-sn42bi58-5ml-20g.html>
- [50] *Pájka Sn42Bi58 pasta kelímek 500g Tavidlo No Clean 10 %* [online]. GSMcentrum. [vid 13. 5. 2019]. Dostupné z: <https://www.gsmcentrum.cz/pajka-sn42bi58-pasta-kelimek-500g-tavidlo-no-clean-10>
- [51] *ELPOX ER 55MN* [online]. Amepox Microelectronics LTD. [vid 13. 5. 2019]. Dostupné z: [http://www.amepox-mc.com/files/ELPOX\\_ER55MN.pdf](http://www.amepox-mc.com/files/ELPOX_ER55MN.pdf)
- [52] *Contact VA 100* [online]. WEICON. [vid 13. 5. 2019]. Dostupné z: [https://www.weicon.cz/static/downloads/cz/technicalDatasheets/TDS\\_12050030\\_CS\\_Contact\\_VA100.pdf](https://www.weicon.cz/static/downloads/cz/technicalDatasheets/TDS_12050030_CS_Contact_VA100.pdf)



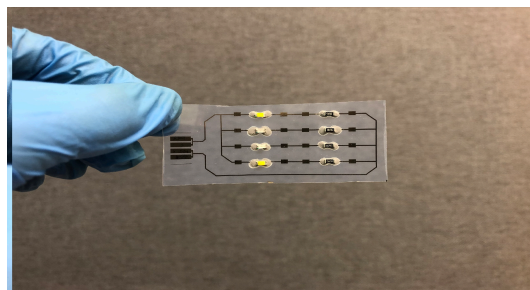
## A Sady pro testování metod montáže na substrát



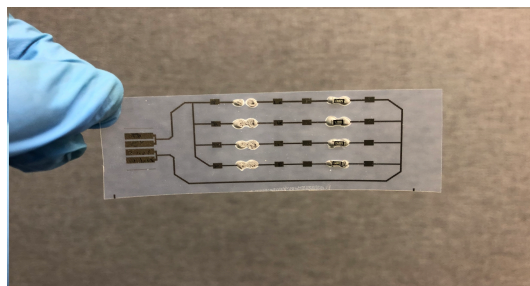
Obrázek 36: Microprint 2004



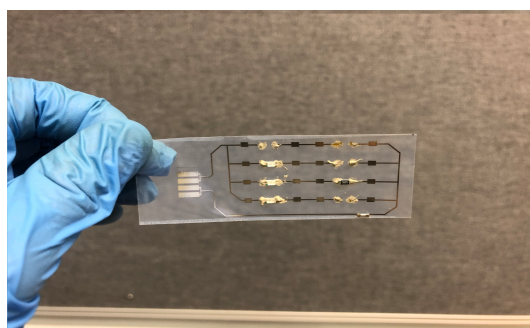
Obrázek 37: Microprint 2004



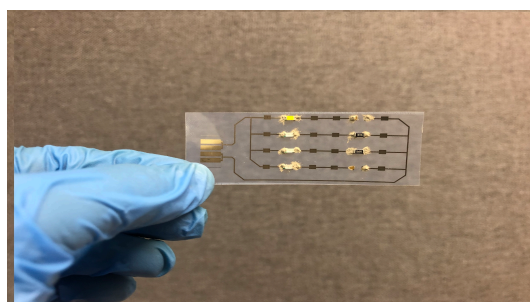
Obrázek 38: Microprint 2004



Obrázek 39: Microprint 2004

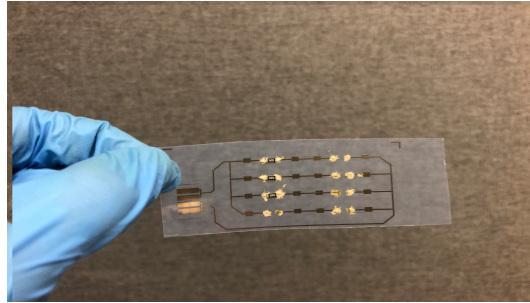


Obrázek 40: Stříbrná pasta DGP80

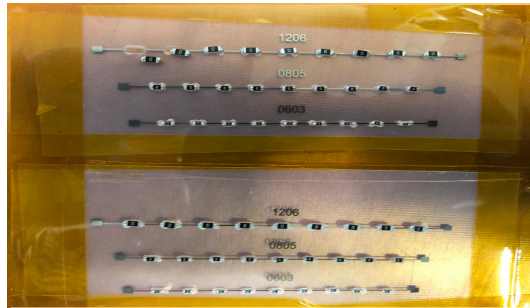


Obrázek 41: Stříbrná pasta DGP80

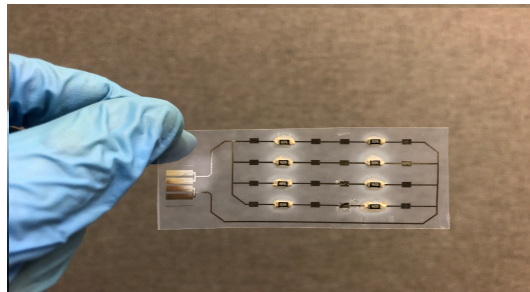




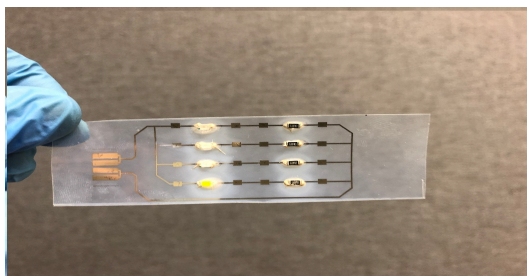
Obrázek 42: Stříbrná pasta DGP80



Obrázek 43: Nízkoteplotní pájka Sn42Bi58

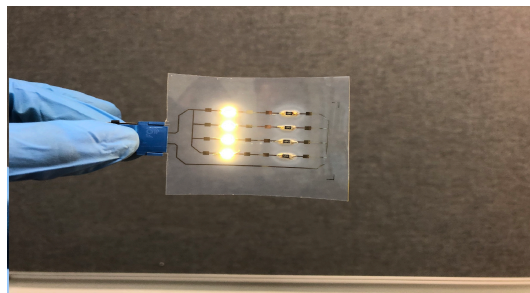


Obrázek 44: Izotropní vodivé lepidlo ELPOX ER 55MN

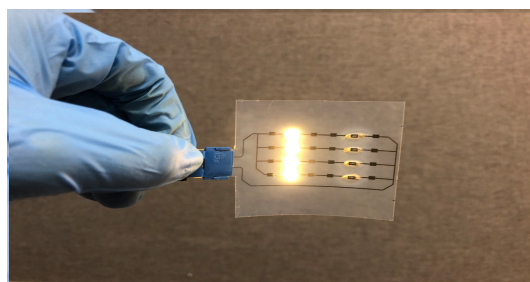


Obrázek 45: Izotropní vodivé lepidlo ELPOX ER 55MN

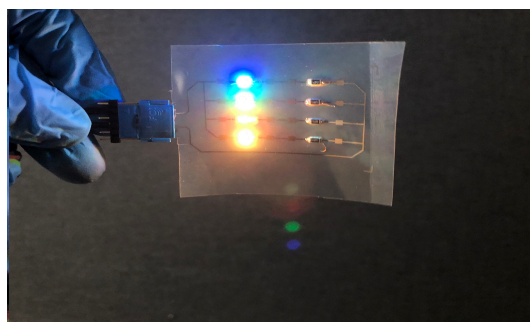
## B Funkční obvody s LED a předřadným rezistorem



Obrázek 46: Sada 1

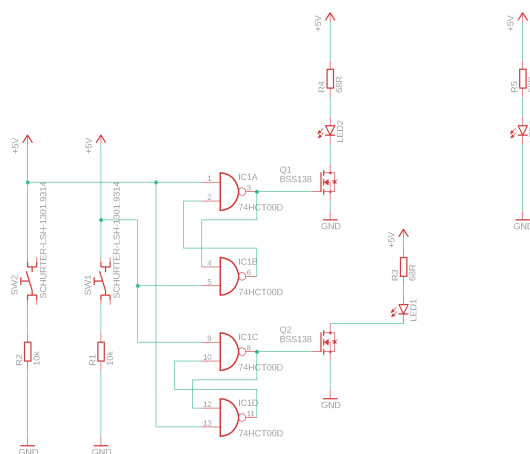


Obrázek 47: Sada 2

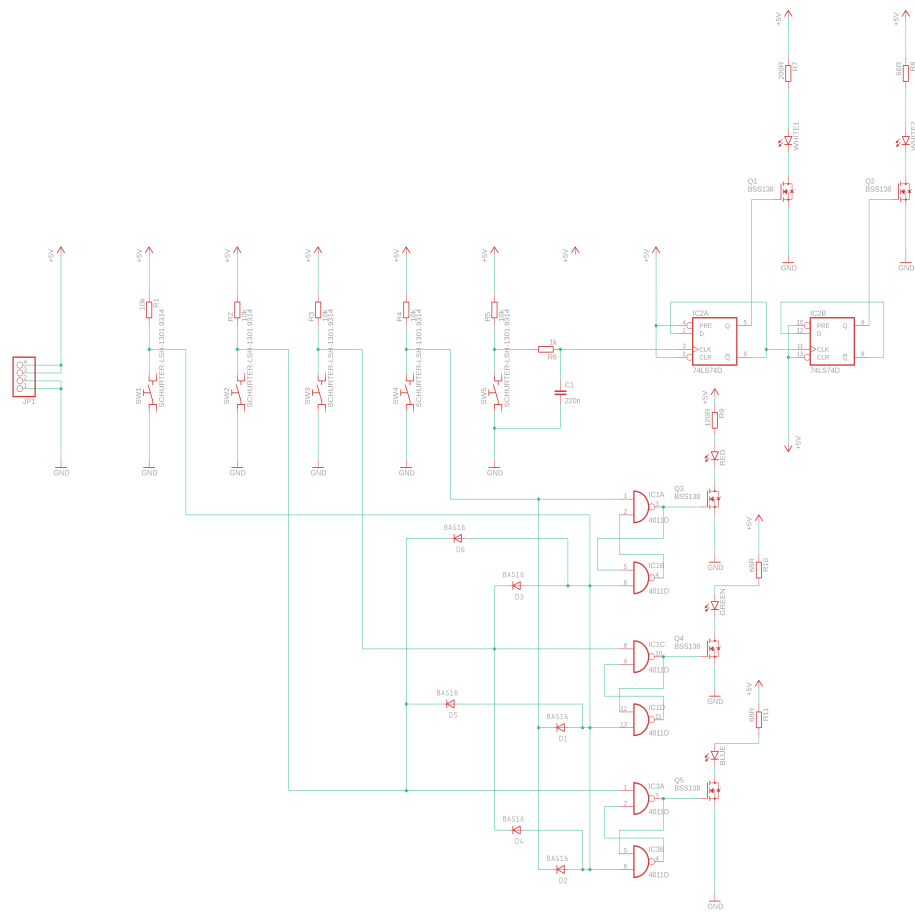


Obrázek 48: Sada 3

## C Schémata zapojení a seznam použitých součástek



Obrázek 49: Schéma zapojení obvodu k tisku



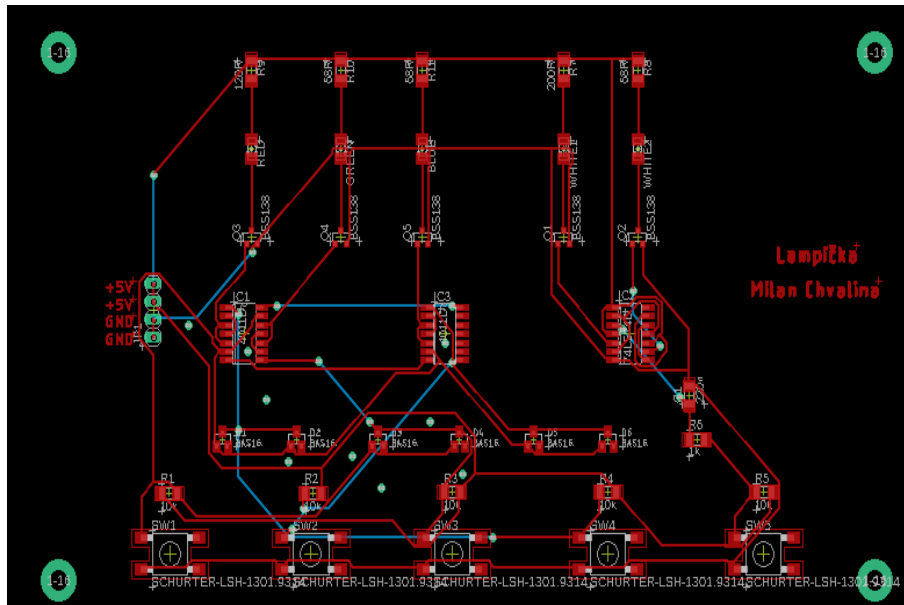
Obrázek 50: Schéma zapojení finálního výrobku

Tabulka 18: Seznam použitých součástek pro obvod k tisku

Typ součástky	Počet
Rezistor R68, pouzdro 1206	3
Rezistor R10k, pouzdro 1206	2
Unipolární tranzistor MOSFET s N kanálem BSS138, pouzdro SOT-23	2
Bílá LED OSM51206C1E, pouzdro 1206	1
Modrá LED OSB51206C1E, pouzdro 1206	1
Zelená LED OSG51206C1E, pouzdro 1206	1
Integrovaný obvod NAND 74HCOO, pouzdro SO-14	1
Tlačítko Schurter 1301.9315 s jednou stabilní polohou	2

Tabulka 19: Seznam použitých součástek pro finální obvod

Typ součástky	Počet
Rezistor R68, pouzdro 1206	4
Rezistor R120, pouzdro 1206	1
Rezistor R1k, pouzdro 1206	1
Rezistor R10k, pouzdro 1206	5
Kapacitor 220n, pouzdro 1206	1
Unipolární tranzistor MOSFET s N kanálem BSS138, pouzdro SOT-23	5
Bílá LED OSM51206C1E, pouzdro 1206	2
Modrá LED OSB51206C1E, pouzdro 1206	1
Zelená LED OSG51206C1E, pouzdro 1206	1
Červená LED OSR51206C1E, pouzdro 1206	1
Integrovaný obvod NAND HEF4011BT.652, pouzdro SO-14	2
Klopný obvod D 74LS74, pouzdro SO-14	1
Usměrňující dioda BAS16, pouzdro SOT-23	6
Tlačítko Schurter 1301.9315 s jednou stabilní polohou	5



Obrázek 51: Výrobní podklady plošného spoje