

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Aditivní metody vytváření vodivých obrazců na substráty
pro senzorické aplikace**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jiří HLÍNA**
Osobní číslo: **E10B0300P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektronika a telekomunikace**
Název tématu: **Aditivní metody vytváření vodivých obrazců na substráty pro senzorické aplikace**
Zadávající katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Proveďte rešerši používaných metod pro vytváření motivů vodivých obrazců na substráty vhodné pro senzorické aplikace.
2. Vyberte několik vhodných metod pro vytváření vodivých obrazců a prakticky je zrealizujte.
3. Proveďte porovnání výsledků realizovaných vzorků z předchozího bodu zadání.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 20 - 30 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. Martinek, R.: *Senzory v průmyslové praxi*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2004. 199 s. ISBN 80-7300-114-4.

2. Elektronické informační zdroje

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Karel Hromadka
Katedra technologií a měření

Konzultant bakalářské práce: Ing. Karel Hromadka
Katedra technologií a měření

Datum zadání bakalářské práce: 15. října 2012

Termín odevzdání bakalářské práce: 7. června 2013



L.S.


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.

děkan


Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev

vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

Anotace

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na aditivní metody vytváření vodivých obrazců na substráty pro sensorické aplikace. V práci jsou konkrétně rozebrány jednotlivé aditivní metody, principy a použití senzorů a substráty používané pro senzory.

Klíčová slova

Sítotisk, šablonový tisk, napařování, naprašování, senzor, indukční senzor, kapacitní senzor, magnetický senzor, optický senzor, ultrazvukový senzor.

Abstract

The bachelor thesis is focused on additive methods of creating conductive patterns on substrates for sensor applications. The individual additive methods, principles and application of sensors and substrates used for sensors are described in this thesis.

Key words

Screen printing, stencil printing, physical sputtering, vacuum evaporation, sensor, inductive sensor, capacitive sensor, magnetic sensor, optical sensor, ultrasonic sensor.

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

V Plzni dne 6.6.2013

Jméno příjmení

.....

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Karlu Hromadkovi za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ	9
ÚVOD	10
1 ADITIVNÍ METODY VYTVÁŘENÍ VODIVÝCH OBRAZCŮ	11
1.1 SÍTOTISK	11
1.1.1 <i>Síto</i>	11
1.1.2 <i>Rám</i>	12
1.1.3 <i>Napínací zařízení</i>	13
1.1.4 <i>Sítotisková šablona</i>	14
1.1.5 <i>Těrka</i>	14
1.1.6 <i>Přesnost tisku</i>	15
1.2 ŠABLONOVÝ TISK	16
1.2.1 <i>Šablony a technologie jejich výroby</i>	16
1.3 NAPRAŠOVÁNÍ	18
1.3.1 <i>Reaktivní naprašování</i>	19
1.3.2 <i>Magnetronové naprašování</i>	19
1.4 VAKUOVÉ NAPAŘOVÁNÍ	20
2 SENZORY	23
2.1 INDUKČNÍ SENZORY	23
2.2 KAPACITNÍ SENZORY	24
2.3 MAGNETICKÉ SENZORY	25
2.3.1 <i>Senzory s Hallovou sondou</i>	26
2.3.2 <i>Magnetorezistivní sondy</i>	27
2.3.3 <i>Senzory s nasycovaným jádrem cívky</i>	27
2.4 ULTRAZVUKOVÉ SENZORY	28
2.5 OPTICKÉ SENZORY	28
3 SUBSTRÁTY	30
3.1 KERAMICKÉ SUBSTRÁTY	30
3.2 FLEXIBILNÍ SUBSTRÁTY	30
3.3 KŘEMÍKOVÉ SUBSTRÁTY	31
4 PRAKTICKÁ ČÁST	32
4.1 PŘÍPRAVA	32
4.2 NAPAŘOVÁNÍ	34
4.3 NAMĚŘENÉ HODNOTY A GRAFY	36
ZÁVĚR	40
POUŽITÁ LITERATURA	41
PŘÍLOHY	1

Seznam symbolů

r [m].....	Poloměr částice
N_V [-].....	Koncentrace částic na jednotku objemu
p [Pa].....	Tlak v daném prostředí
k [J.K ⁻¹].....	Boltzmannova konstanta
p_n [-]	Tenze nasycených par
M [-]	Molekulární hmotnost
μ_1, μ_2 [H.m ⁻¹]	Permeabilita
R_H [-]	Hallova materiálová konstanta
B [T]	Magnetická indukce
n [-]	Koncentrace volných elektronů
e [eV]	Náboj elektronu
v [m/s]	Rychlost elektronu
b, d [m]	Šířka a výška destičky
l [m]	Střední volná dráha vypařovaných částic
T [K]	Teplota
U_H [V]	Hallovo napětí
I [A].....	Proud
Z [Ω]	Impedance
t [s]	Čas napařování
φ [°]	Fázový posun

Úvod

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na aditivní metody vytváření vodivých obrazců na substráty pro senzorické aplikace.

Text je rozdělen do čtyř částí. První část je zaměřena na jednotlivé aditivní metody vytváření vodivých obrazců a jsou v ní vysvětleny principy jednotlivých aditivních metod. Mezi ně patří sítotisk, šablonový tisk, napařování a vakuové napařování. Druhá část se týká jednotlivých druhů senzorů, jejich principů a použití. Ve třetí části jsou popsány substráty, které se používají pro výrobu senzorů. Nejčastěji se používají keramické substráty, ale i substráty flexibilní a křemíkové. Čtvrtá část je praktická a týká se vakuového napařování uhlíku na keramické substráty.

1 Aditivní metody vytváření vodivých obrazců

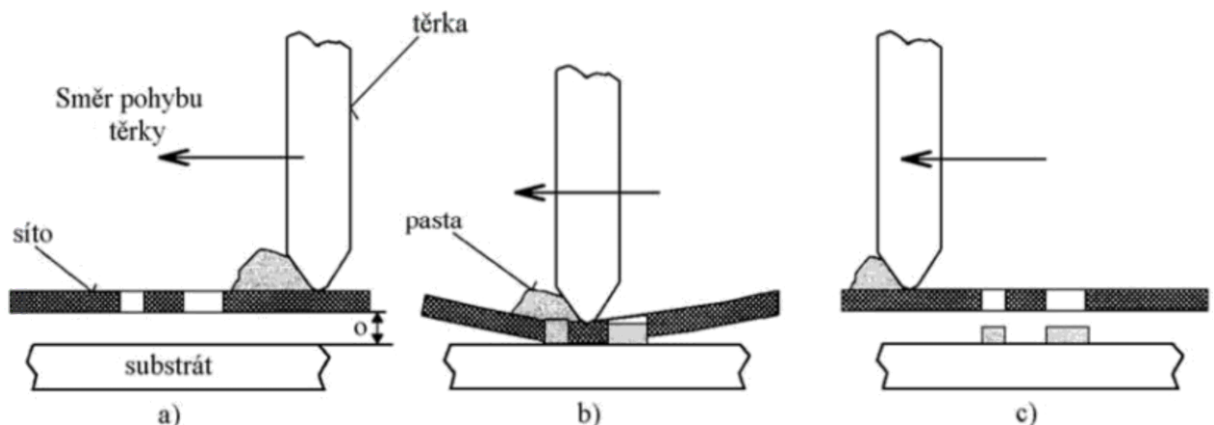
Aditivní metody jsou založeny na přidávání vrstev materiálu k podkladu. V této kapitole jsou popsány následující aditivní metody – sítotisk, šablonový tisk, napařování (reaktivní a magnetronové) a vakuové napařování.

1.1 Sítotisk

Sítotisk je základní technologií pro vytváření vodivých obrazců, která splňuje kritéria výkonnosti a hospodárnosti. I přes svou poměrně dlouhou historii se neustále vyvíjí a zdokonaluje. [1]

Sítotisk se skládá ze třech hlavních komponentů:

- síťovina (síto)
- pasta, barva (materiál, který má být nanášen)
- sítotiskový rám



Obr. 1.1 Princip sítotisku [20]

1.1.1 Síto

Sítotiskové šablony se vyrábí napnutím síťoviny na vhodný rám. Volba tkaniny je značně závislá na přesnosti rozměrů, tloušťce tisku, jemnosti motivu, velikosti částic pasty a na struktuře povrchu.

Typy tkanin a jejich vlastnosti:

- monofilní polyesterová tkanina
 - dobrá pevnost v tahu a pružnost
 - umožňuje zotavení (100 % do 2 % protažení)
 - dobrá rozměrová stálost
- VA-ťkanina
 - ocelová vlákna
 - téměř nulová pružnost
 - rozměrová stálost
- metalizovaná monofilní polyesterová tkanina
 - kompromis mezi kovovým a polyesterovým vláknem
 - pevnější v tahu než polyester
 - vyšší elasticita než u ocelového vlákna
- monofilní nylonová tkanina

Na technických parametrech tkaniny je závislá tloušťka tisku. Těmito parametry jsou počet vláken na cm, průměr vlákna d , velikost ok w , volná plocha tkaniny F_0 a tloušťka tkaniny a .

Podle těchto parametrů se tkaniny dělí do 3 kategorií:

- a) tkaniny s velikostí oka větší než tloušťka vlákna ($w > d$)
- b) tkaniny s velikostí oka stejnou jakou tloušťka vlákna ($w = d$)
- c) tkaniny s velikostí oka menší než tloušťka vlákna ($w < d$)

Velikost ok w by měla být 2,5 až 3 krát větší než velikost částic pasty, aby byl zajištěn dobrý průchod pasty tkaninou. [1]

1.1.2 Rám

Rám slouží k uchycení síta v napnutém stavu. Dříve se sítotiskové rámy vyráběly ze dřeva. V dnešní době se na výrobu rámu používají převážně trubky z hliníkových slitin nebo z oceli. Rámy z hliníkových slitin oproti ocelovým ráům vykazují velmi dobrou pevnost při nízké hmotnosti a nedochází u nich ke korozi, což zvyšuje životnost sítotiskových rámu. Důležitým parametrem je velikost rámu v poměru k velikosti tištěného motivu. [1,15]

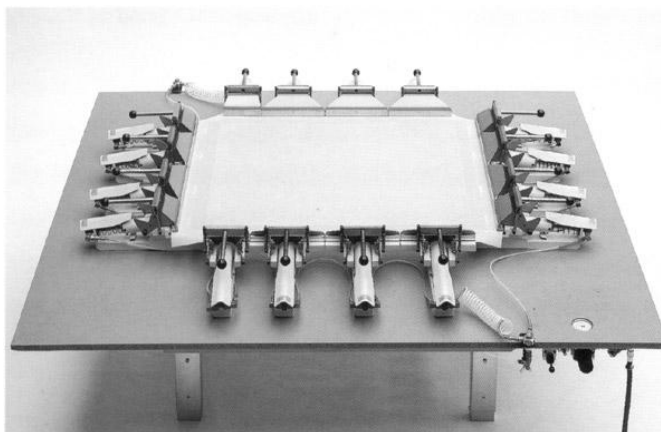


Obr. 1.2 Sítotiskový rám [6]

1.1.3 Napínací zařízení

Aby byla zajištěna dobrá kvalita tisku, musí být tkanina správně napnutá. To znamená, že je dodrženo napětí doporučené výrobcem tkaniny, napětí tkaniny je rovnoměrné po celé ploše a je dosaženo stabilní hodnoty napětí v čase. Pro napínání tkaniny existuje spousta zařízení, která pracují na pneumatickém nebo mechanickém principu. [1]

Mechanické napínací zařízení využívají k napnutí tkaniny mechanický tah, který je nejčastěji zajištěn šnekovým mechanismem poháněným motorem nebo klikou. Pneumatická napínací zařízení využívají písty s tlakovým vzduchem a dnes se používají nejvíce. Výhodou pneumatických napínacích zařízení je, že nabízejí větší a rovnoměrný tah oproti zařízením mechanickým. Jednotlivá napínací zařízení se liší způsobem uchycení síťoviny. Buď je síťovina uchycena pomocí samostatných klapek, nebo je uchycena do lišty (při uchycení do lišty nelze dosáhnout rovnoměrného tahu ve všech místech tkaniny).



Obr. 1.3 Napínací zařízení [7]

Napínání probíhá tak, že se jednotlivé klapky rozmístí po obvodu rámu a do jejich čelistí se upne síťovina. Napínání probíhá po krocích, to znamená, že síťovina není napnutá naráz,

ale postupně se zvyšujícím tahem. Po napnutí síťoviny je potřeba provést její fixaci k sítotiskovému rámu. K fixaci se nejčastěji používají dvousložková lepidla na bázi polyuretanu. Po úplném zatuhnutí lepidla se uvolní tlak napínacího zařízení a oříznou se přebytky síťoviny z vnější strany rámu. Tkanina časem podléhá poklesu napětí. Během prvních 4 hodin po napětí klesá hodnota napětí strmě dolů a na konečném stavu se ustálí asi po 48 hodinách. Z tohoto důvodu nelze rámy s napnutou tkaninou používat ihned po napnutí, ale nejdříve po 24 – 48 hodinách. [17]

1.1.4 Sítotisková šablona

Sítotisková šablona se vytváří pomocí fotocitlivé emulze. Výsledkem je to, že některá oka tkaniny zůstanou vyplněna emulzí a některá oka budou průchozí, to znamená bez emulze.

Základní typy šablon:

- přímá šablona – vytváří se nanesením emulze na oka sítě, expozicí a vyvíjením, životnost až 100 000 tisků
- nepřímá šablona – fotocitlivá emulze je ve formě listu a může být exponována a vyvíjena před aplikací na síto, životnost 2 000 až 4 000 tisků
- kombinovaná šablona – emulze je ve formě listu, ale je aplikována na síto před exponováním a vyvíjením, životnost 60 000 až 80 000 tisků [1]

1.1.5 Těrka

Těrka je nástroj, kterým se po ploše síta roztírá pasta a vtačuje se do jeho otvorů. Jedná se o plochou desku, která má na spodní straně břit. Tento břit se pohybuje po sítu, kam je předepsanou silou přitlačován. Těrka výrazně ovlivňuje výslednou kvalitu tisku. Pro dobrou kvalitu tisku musí být zajištěna rovnost hrany těrky, její ostrost a geometrická přesnost. Nerovnost hrany nebo opotřebení těrky se okamžitě přenese na potiskovaný materiál. [1]

Materiálem pro výrobu těrek je buď pryž, nebo kov. Volba mezi pryžovou a kovovou těrkou závisí na vlastnostech pasty a šablony. Důležitými parametry jsou rychlost posunu těrky, přítlak a úhel náklonu těrky a také kvalita povrchu. Tyto požadavky jsou lépe dodržitelné i volitelné při strojním tisku. Při ručním tisku je jejich dodržení velmi obtížné. [16]

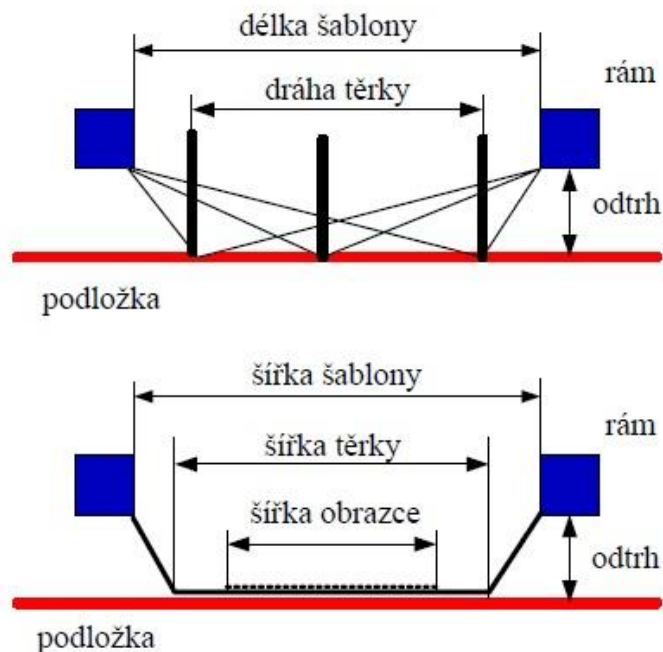


Obr. 1.4 Ruční sítotisk [7]

1.1.6 Přesnost tisku

Přesnost tisku závisí na:

- správné volbě poměru formátu rámu a obrazce
- vzdálenosti síta od podložky
- šířce, délce dráhy a tlaku těrky (příliš velký tlak může narušit elasticitu vláken)
- úhlu směru vláken síta a tištěného motivu (optimální úhel 22,5°)



Obr. 1.5 Sítotisková tkanina při tisku [8]

Tloušťka nanesené vrstvy závisí na tkanině, vzdálenosti tkaniny od podložky, pastě, náklonu a rychlosti pohybu těrky a na struktuře a nasákavosti povrchu podložky. Množství protlačené pasty závisí na průměru vlákna a na velikosti ok tkaniny. Na kvalitu tisku má velký

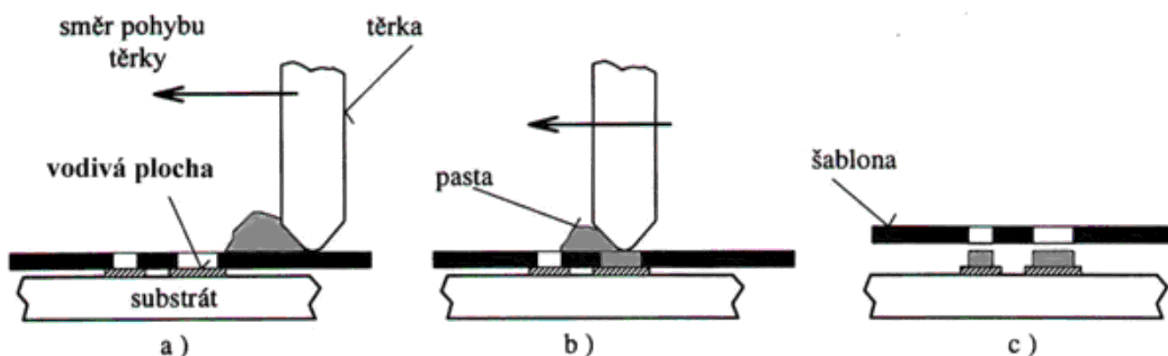
vliv i odtrh síta. Odtrh je vzdálenost síta nebo šablony od podložky, na kterou se obraz tiskne. Vlivem tlaku těrky dojde k prohnutí síta až k podložce a protlačení pasty v místě dotyku. Pokud je odtrh příliš malý nebo velký, dojde ke znemožnění kvalitního přenosu tištěného obrazce na podložku. [1]

1.2 Šablonový tisk

Šablonový tisk je založený na principu sítotisku, ale místo síta se používá folie. Folie má na rozdíl od síta lepší rozměrovou stabilitu a přesnost, ale nižší pružnost. Šablona se přikládá přímo na substrát a odtržena je až po ukončení pohybu těrky. Tloušťka natištěného motivu je přímo úměrná tloušťce šablony. Tloušťka šablony se volí podle velikosti a uspořádání motivu. Na rozdíl od sítotisku nelze šablonovým tiskem tisknout uzavřené obrazce.

1.2.1 Šablony a technologie jejich výroby

K výrobě šablon se používá tenká folie. Ta může být vyrobena z mosazi, mědi, nerezové oceli nebo z plastu. Nejpoužívanějším materiálem pro výrobu šablon je mosaz. Výhodou mosazi je snadné leptání. Šablony z nerezové oceli mají delší životnost a otvory se vytváří leptáním nebo laserem. Měděné šablony se také snadno leptají, ale vzhledem k tomu, že samotná měď je měkká a snadno poškoditelná, se měděné šablony pokovují niklem. Plastové šablony se vyznačují dobrou pružností i při vyšších tloušťkách.



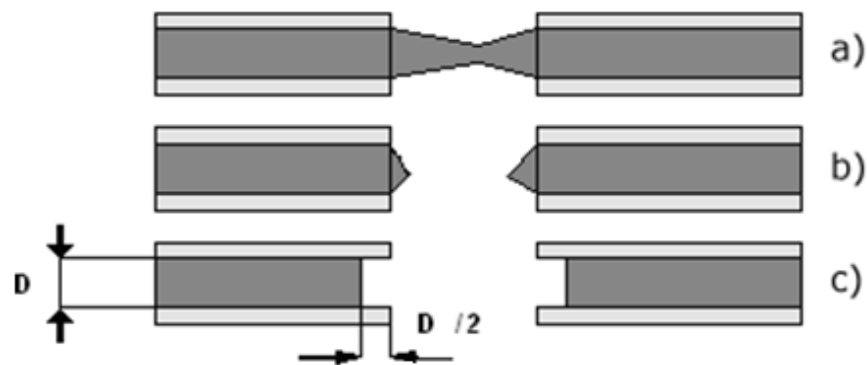
Obr. 1.6 Proces šablonového tisku [4]

Kovové šablony se usazují do litých nebo svařovaných rámců. Rozšířená je i bezrámová technologie – šablony jsou uchyceny za pomoci speciálních držáků do tiskařského stroje, neusazují se do rámců. [1]

Technologie pro výrobu šablon:

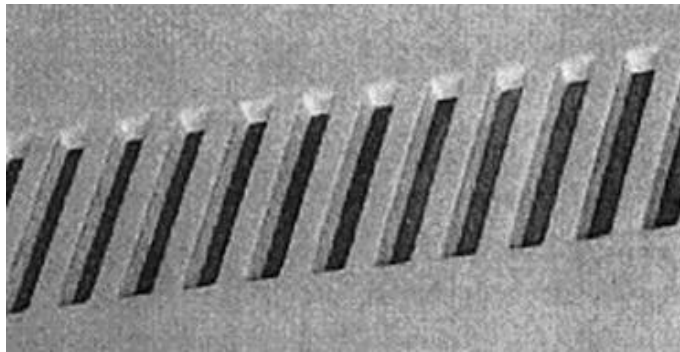
- leptání
- galvanoplastika
- řezání laserem

Leptané šablony se vytváří pomocí fotorezistů nanesených na obou stranách šablony. Po osvitu dojde k vytvrzení rezistu a poté následuje chemické leptání (šablona je leptána souběžně z obou stran). V místě spojení leptání vznikne zúžení, které by při tisku mohlo ztížit průchod pasty otvorem. Z tohoto důvodu je nutné vytvářet otvory užší než tloušťka šablony plus 50 %.



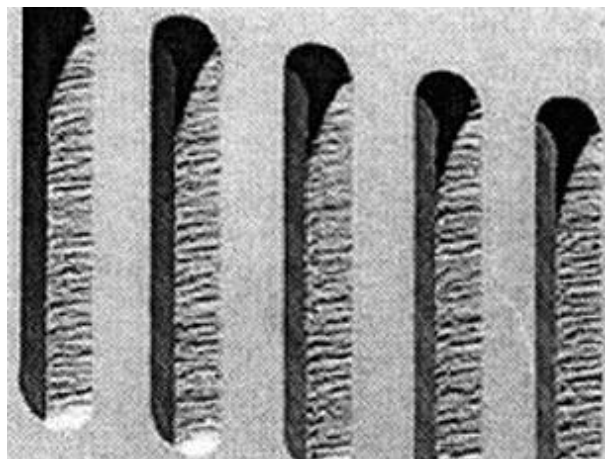
Obr. 1.7 Postup při leptání šablony [4]

Galvanoplastika je založena na chemickém aditivním nanášení kovové vrstvy na podklad z nerezové oceli, nesoucí fotorezistem vytvořené obrazce otvorů. Tam, kde není nanesen fotorezist, je elektrolyticky nanášena kovová vrstva. Po dosažení požadované tloušťky se podklad s naneseným fotorezistem oddělí a šablona je hotová. U šablon vytvářených galvanoplastikou lze docílit velmi malé tloušťky šablony (desítky μm), proto jsou vhodné pro vytváření velmi jemných motivů s velmi hladkou stěnou otvoru a s velmi ostrým okrajem na spodní straně šablony. Výroba těchto šablon je náročnější a nákladnější než u leptaných šablon, ale zároveň je několikanásobně levnější než výroba šablon laserem.



Obr. 1.8 Galvanicky vytvořená šablona [4]

Šablony řezané laserem se vyrábějí úzkým laserovým paprskem kruhového tvaru. Jedná se o velmi přesnou metodu vytváření motivů. Na rozdíl od leptání probíhá proces řezání laserem jen z jedné strany. Otvory mají mírně kónický profil, proto hlavně u úzkých motivů umožňují lepší průchod pasty šablonou. Laserový proces je především u šablon větších rozměrů dražší, cena je závislá na počtu otvorů. [1,4]



Obr. 1.9 Laserem vytvořená šablona [4]

1.3 Naprašování

Princip naprašování spočívá ve vytržení jednotlivých atomů, molekul, či jejich shluků následkem bombardování plochého nebo válcového terče (targetu) ionty s vysokou energií (v řádech tisíců eV). Zdrojem iontů (pracovního plynu) je nejčastěji inertní plyn (helium, neon, argon, xenon atd.). Ionty jsou elektricky urychlovány na požadovanou energii. Po nárazu iont předá hybnost částicím terče, dojde k vytržení a následně k depozici vytržených částic na substrát. Proces naprašování probíhá ve vakuu ve speciálních zařízeních.



Obr. 1.10 Naprašovací zařízení [10]

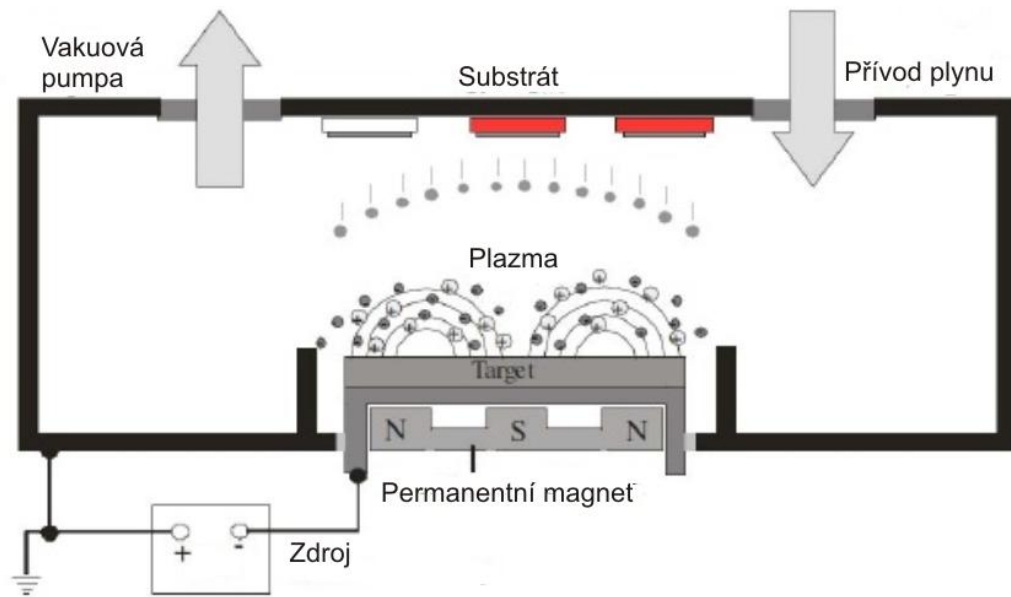
Výhodou naprašování je, že se dají naprašovat téměř všechny termálně stabilní látky. Vytržené atomy nebo molekuly mají vyšší energii, migrují po povrchu substrátu a tím podporují jeho stupňovité pokrývání. Nevýhodou naprašování je, že není vhodné pro organické materiály a je potřeba zdroj iontů s vysokou čistotou.

1.3.1 Reaktivní naprašování

Reaktivní naprašování se běžně používá pro tvorbu vrstev například oxidů a nitridů. Naprašování probíhá v přítomnosti plazmatu buď inertního plynu, nebo směsi inertního a reaktivního plynu. Vlastnosti naprašované vrstvy závisí na složení plynu. Je možné nanášet vrstvy s různou vodivostí.

1.3.2 Magnetronové naprašování

Při magnetronovém naprašování je před terčem vytvořeno magnetické pole definovaného tvaru (elektromagnetem nebo permanentními magnety). Elektronů, které by při klasickém naprašování unikaly z prostoru před terčem, se při magnetronovém naprašování v důsledku Lorentzovy síly musí pohybovat po šroubovici podél siločar. Tím se značně prodlouží jejich délka, zvýší se počet srážek a vytvoří se husté plazma. Následkem toho je možné udržet výboj při nižším tlaku i napětí. Díky nižšímu tlaku jsou vytvářené vrstvy čistší.

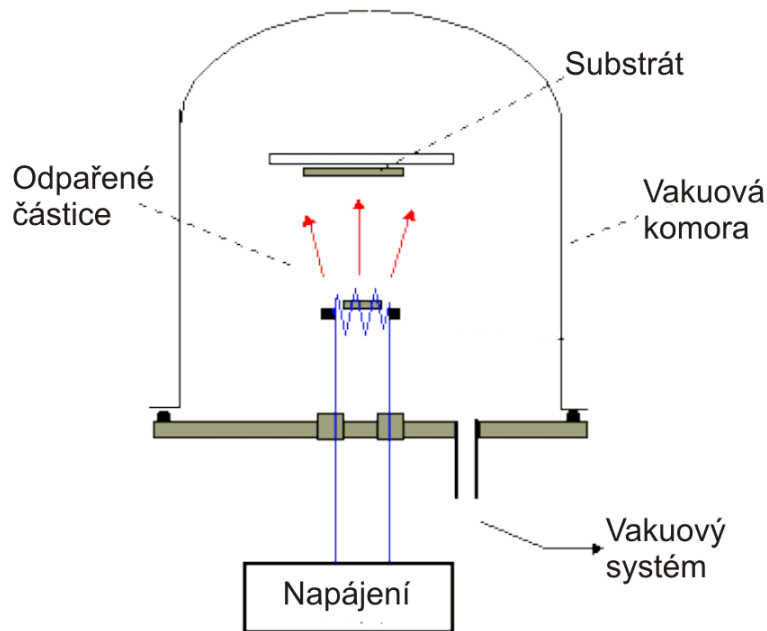


Obr. 1.11 Princip magnetronového napařování [9]

Pokud se společně s pracovním plynem připoustí do vakuové komory reaktivní příměs (kyslík, dusík atd.), lze vytvářet oxidy a nitridy rozprašovaného materiálu. Magnetronovým napařováním lze napařovat i nevodivé targety. [5,9]

1.4 Vakuové napařování

Vakuové napařování je metoda, která umožňuje nanášení tenkých vrstev kovů, polovodičů a některých dielektrik. Napařovaný materiál se v prostoru s vytvořeným vakuem ohřeje průchodem elektrického proudu (odporový ohřev), iontovým svazkem nebo pomocí laseru. Pokud jeho teplota vzroste nad předepsanou mez, dojde ke zvýšení kinetické energie částic v povrchové vrstvě na takovou hodnotu, že se z ní začnou uvolňovat atomy, případně i molekuly napařovaného materiálu. Uvolněné částice dopadají na podložku (substrát), která má mnohem nižší teplotu než napařovaný materiál, a dochází k jejich kondenzaci ve formě tenké vrstvy.



Obr. 1.12 Princip napařování (odporový ohřev) [19]

Vakuum (10^{-4} až 10^{-6} Pa, v některých aplikacích 10^{-2} Pa) se v procesu napařování využívá proto, aby byl přenos částic napařovaného materiálu co nejefektivnější. Dále je nutné minimalizovat srážky s ostatními částicemi. Dráha vypařovaných částic musí být přímočará. Střední volná dráha (vzdálenost mezi jednotlivými srážkami částic) vypařovaných částic musí být co nejdelší a musí mít minimální vzdálenost od výparníku k substrátu. Střední volnou dráhu lze spočítat pomocí vztahu:

$$\bar{l} = \frac{1}{\sqrt{2}\pi r^2 N_v} = \frac{kT}{\sqrt{2}\pi r^2 p} [m] \quad (1.1)$$

kde r – poloměr částice

N_v – koncentrace částic na jednotku objemu

k – Boltzmannova konstanta

p – tlak v daném prostředí

$$N_v = 3,5 \cdot 10^{22} \frac{p_n}{\sqrt{MT}} [m^{-3}] \quad (1.2)$$

kde p_n – tenze nasycených par

T – teplota

M – molekulární hmotnost

Při napařování je velmi důležitá také čistota substrátu. Před samotným nanášením tenké vrstvy je nutné povrch substrátu odmastit, očistit a osušit. Dále je vhodné ve vakuu ještě

zbavit substrát adsorbované vrstvy plynů a par. To se provádí buď zahřátím substrátu na několik set stupňů Celsia, nebo doutnavým výbojem v napařovacím prostoru naplněným plynem (např. argonem).

K vakuovému napařování se používá vakuové napařovací zařízení. Skládá se z napařovacího prostoru (recipientu), který obsahuje výparník z vysokotavitelného kovu a držák substrátu v předepsané vzdálenosti od výparníku. Další součástí bývá clona mezi substrátem a výparníkem. Tato clona slouží k zachycení první dávky par, která bývá znečištěná. V recipientu bývá také čidlo snímající tloušťku napařené vrstvy. [3,18]

Metody napařování:

- odpařování pomocí odporového ohřevu
- bleskové odpařování
- obloukové odpařování
- explozivní odpařování
- odpařování vysokofrekvenčním ohřevem
- odpařování elektronovým paprskem
- odpařování laserem

2 Senzory

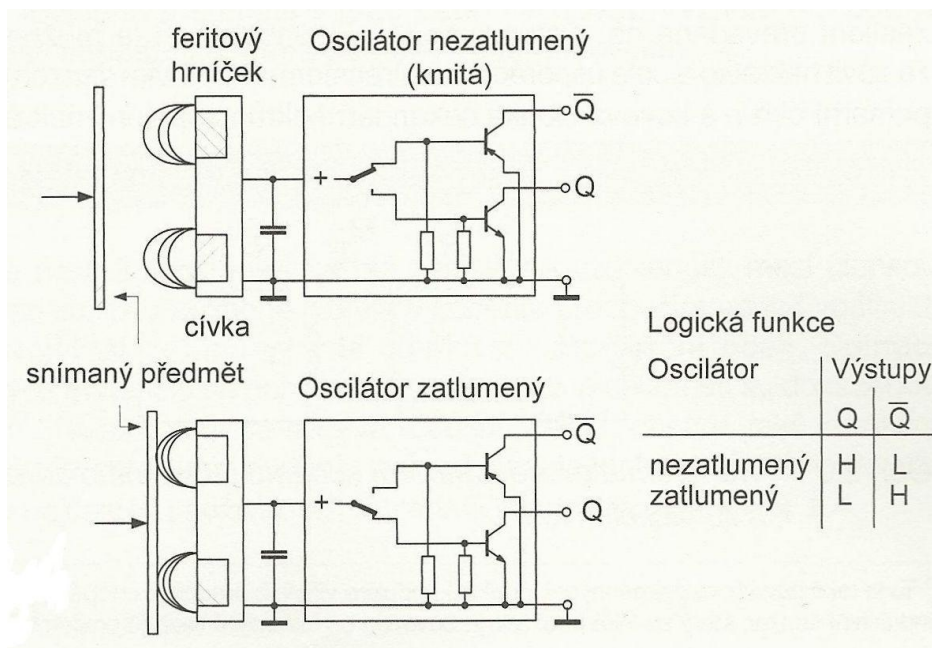
Senzor je funkční prvek, který je v přímém styku se snímaným prostředím a tvoří vstupní blok měřicího řetězce. Citlivá část senzoru se často označuje jako čidlo. Senzor snímá sledovanou fyzikální, chemickou nebo biologickou veličinu a převádí ji na měřicí veličinu (nejčastěji elektrickou).

2.1 Indukční senzory

Indukční senzory mají široké využití. Jsou odolné vůči vnějším vlivům provozního prostředí a vyznačují se vysokou spolehlivostí. Jedná se o zcela polovodičové bezkontaktní prvky, které pracují s vysokou spínací frekvencí. Nedojde-li k jejich mechanickému poškození, mají prakticky neomezenou životnost.

Příklady použití indukčních senzorů:

- náhrada mechanických koncových spínačů
- zpětné hlášení polohy akčního členu (ventilu, pohonu)
- počítání kusů
- regulační úlohy (poloha, rychlost)

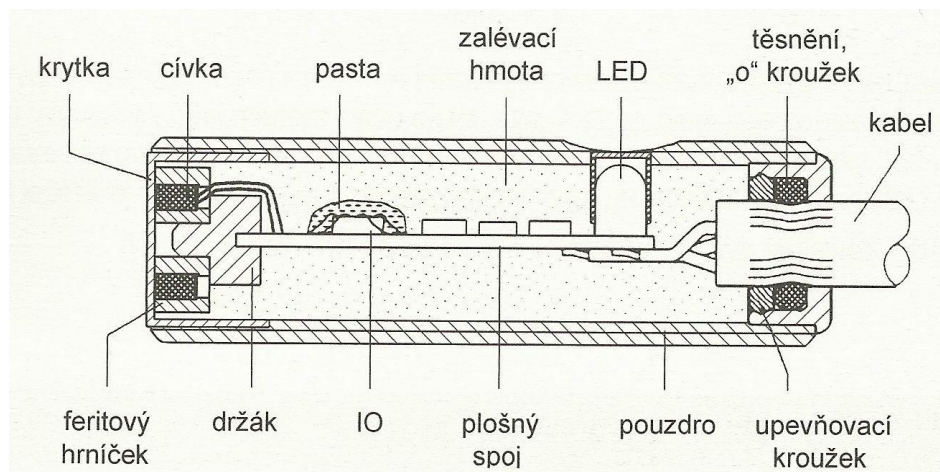


Obr. 2.1 Princip indukčního senzoru [2]

Princip indukčního senzoru je založen na průtoku vysokofrekvenčního proudu generovaného oscilátorem cívkou s feritovým jádrem. Tento proud vytvoří v okolí cívky magnetické pole. Jestliže do tohoto pole umístíme předmět z elektricky vodivého materiálu,

indukují se v něm vířivé proudy. Vlivem vířivých proudů dojde ke změně magnetického pole a ke změně impedance cívky, která je následně vyhodnocena elektronikou senzoru a převedena na výstupní signál.

Indukční senzory se vyrábí nejčastěji ve válcovém nebo kvádrovém tvaru. Čelní plocha válce nebo kvádrů je zároveň aktivní plochou senzoru. Válcové senzory mají plastové nebo kovové pouzdro (chromovaná nebo nerezová ocel). Pouzdro může být buď v hladkém provedení, nebo v provedení se závitem. Senzor se skládá z aktivní plochy a z elektronického obvodu na plošném spoji, na kterém je umístěna LED dioda pro indikaci stavu sepnutí. Pouzdro je zakončeno krytkou, kterou prochází připojovací kabel. Kromě varianty s připojovacím kabelem se ještě vyrábějí varianty s konektorem nebo se svorkovnicí (kvádrové senzory). Vnitřní prostor pouzdra je vyplněn zalévací hmotou. [2]



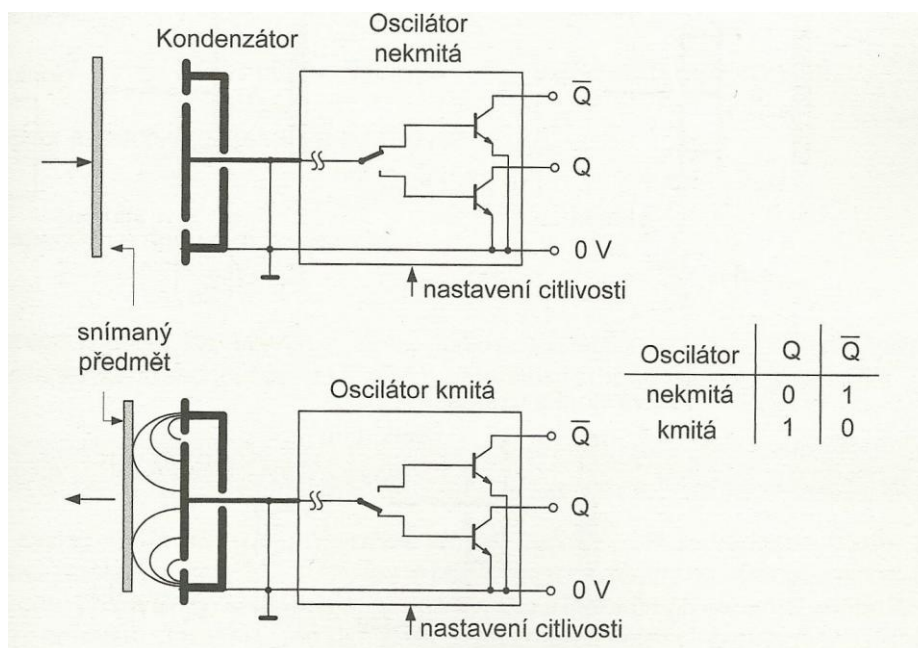
Obr. 2.2 Vnitřní uspořádání válcového indukčního senzoru [2]

2.2 Kapacitní senzory

Kapacitní senzory pracují stejně jako indukční senzory bezdotykově a s polovodičovým výstupem. Umožňují detekovat vodivé i nevodivé materiály. Nejčastěji se používají jako senzory přiblížení. Kapacitní senzory se používají ke snímání úrovně hladiny v nádržích a kontejnerech. Lze snímat kapaliny i sypké materiály. Dále se používají ke snímání polohy nekovových předmětů. V průmyslových aplikacích nejsou tak rozšířené jako indukční senzory. Hlavním důvodem je větší závislost na teplotě a na rušivých vlivech.

Aktivní část kapacitního senzoru je tvořena dvěma elektrodami měřicího kondenzátoru. Elektrody jsou zapojeny v obvodu RC oscilátoru. Přiblížením předmětu k aktivní části čidla dojde ke změně kapacity kondenzátoru. To vede ke změně kmitočtu oscilátoru, která je

následně vyhodnocena elektronikou senzoru a po zesílení je převedena na výstupní signál. Citlivost kapacitního senzoru lze plynule nastavovat víceotáčkovým trimrem.



Obr. 2.3 Princip kapacitního senzoru [2]

Kapacitní senzory se vyrábějí převážně ve válcovém a kvádrovém provedení. Podobně jako u indukčních senzorů je aktivní plocha na čelní straně senzoru. Senzory pro měření výšky hladiny se vyrábějí v tyčovém provedení. [2]

2.3 Magnetické senzory

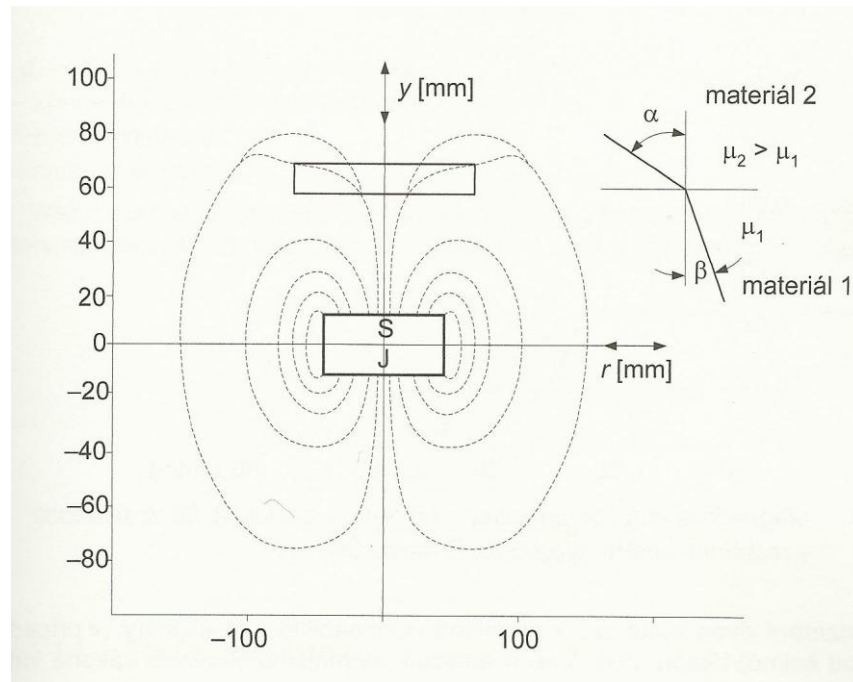
U magnetických senzorů bývá zdrojem magnetického pole permanentní magnet umístěný na snímaném předmětu. Pokud je snímaný předmět feromagnetický, může být magnet přímo součástí senzoru (tato varianta se příliš nepoužívá). Magnetické senzory se používají ke snímání poloh pneumatických válců, snímání hladiny kapalin a sypkých hmot nebo v jednoduchých identifikačních systémech.

Na rozhraní dvou materiálů s různou permeabilitou dochází k lámání magnetických siločar. Platí zde analogie Snellova zákona:

$$\frac{\operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \beta} = \frac{\mu_2}{\mu_1} \quad (2.1)$$

Siločáry se dají dle potřeby nasměrovat pomocí feromagnetických předmětů. Na obrázku 2.4 je vidět, jak se vlivem ocelové destičky deformuje magnetické pole. Ke změření této

deformace se používají Hallovy sondy, snímací cívky s přesycovaným jádrem a magnetorezistivní prvky. [2]



Obr. 2.4 Magnetické pole válcového magnetu ovlivněné feromagnetickým předmětem [2]

2.3.1 Senzory s Hallovou sondou

Tyto senzory jsou založeny na principu Hallova jevu. Ten spočívá ve vychylování směru toku elektrického proudu v závislosti na velikosti vektoru magnetické indukce, který je kolmý na tenkou polovodičovou destičku. Výsledkem je generování rozdílového napětí U_H na bočních stranách destičky:

$$U_H = \frac{R_H}{d} \cdot I \cdot B = \frac{I \cdot B}{n \cdot e \cdot d} [V] \quad (2.2)$$

kde R_H – Hallova materiálová konstanta

B – magnetická indukce

n – koncentrace volných elektronů

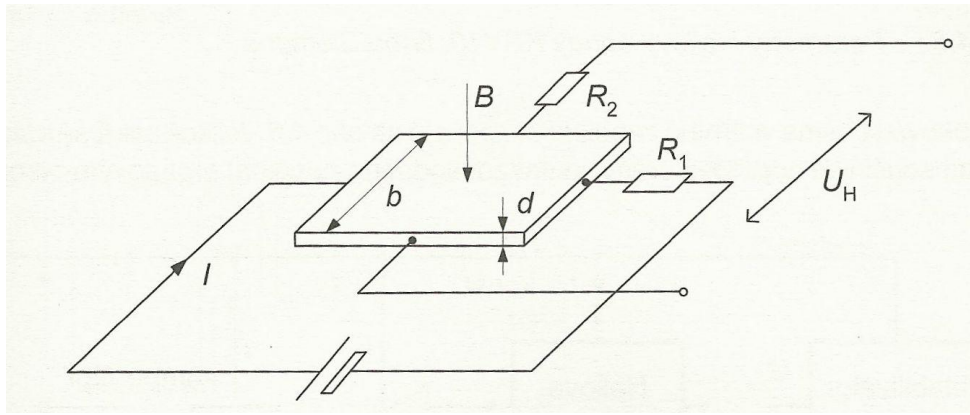
e – náboj elektronu

Vodičem tvaru destičky protéká proud:

$$I = b \cdot d \cdot n \cdot e \cdot v [A] \quad (2.3)$$

kde b , d – šířka a výška destičky

v – rychlost elektronu

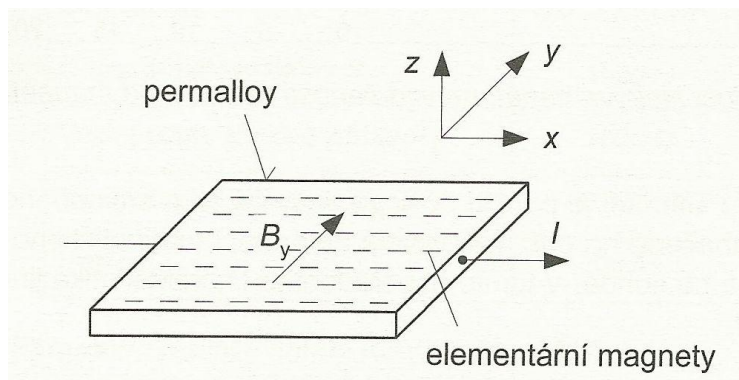


Obr. 2.5 Princip Hallovy sondy [2]

K výrobě těchto senzorů se používá křemík, ale i InSb, InAs, GaAs a další polovodiče. Senzory s Hallovou sondou se používají hlavně pro snímání polohy, rychlosti otáčení a bezkontaktní měření proudu. Využívají se i v automobilovém průmyslu v systémech ABS, tachometrech nebo při řízení zapalování. Velkým problémem Hallovoy sondy je offset a teplotní závislost. [2]

2.3.2 Magnetorezistivní sondy

Stejně jako u Hallovoy sondy je základem magnetorezistivní sondy polovodičová destička. Ta je nejčastěji vyrobena z InSb, ve kterém jsou příměsi NiSb. Destička může být vyrobena i z feromagnetického materiálu – permalloy. Působením magnetického pole dojde k vychýlení proudu, který pak musí urazit delší dráhu a odpor destičky se zvětší. Magnetorezistivní sondy se nejčastěji používají jako senzory přiblížení. [2]



Obr. 2.6 Magnetorezistivní čidlo z materiálu permalloy [2]

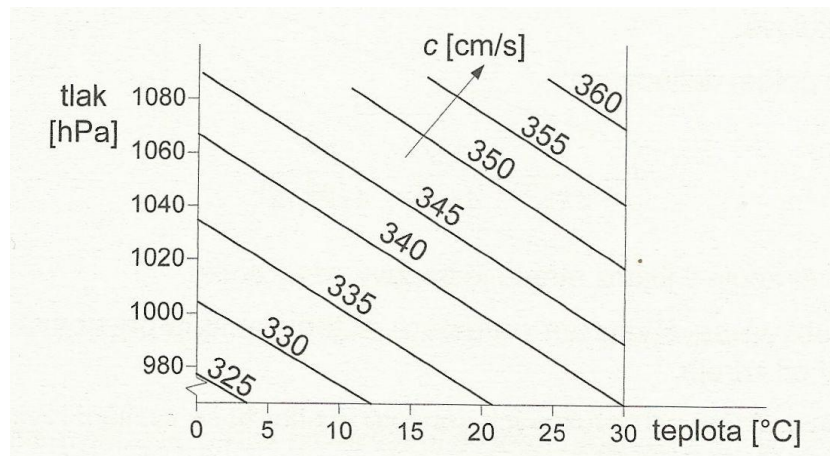
2.3.3 Senzory s nasycovaným jádrem cívky

Senzory s nasycovaným jádrem cívky využívají nelinearity magnetické křivky měkkých magnetických materiálů s vysokou permeabilitou. Jádro magnetizační cívky je periodicky nasycováno a dochází k indukovaní napětí ve druhé snímací cívce sondy. Vzhledem ke složité

konstrukci sondy a složité vyhodnocovací elektronice se tato metoda používá pouze v drahých měřicích přístrojích. Častěji se používá zjednodušená verze s jádrem cívky z amorfního kovu. Tyto senzory mají větší citlivost než Hallovy a magnetorezistivní sondy. Používají se například ke snímání poloh pneumatických a hydraulických válců nebo ke zjišťování předmětů (plováků s magnety) v nerezových nebo plastových nádobách. [2]

2.4 Ultrazvukové senzory

Princip ultrazvukových senzorů je založen na cyklickém vysílání vysokofrekvenčního impulzu, který se šíří prostorem rychlostí zvuku. Pokud narazí na nějaký předmět, odrazí se od něj a vrací se k senzoru jako ozvěna. Z doby, která uplyne od vyslání impulzu do návratu ozvěny, odvodí senzor vzdálenost k předmětu. Rychlost šíření impulzu je závislá na teplotě, na tlaku a složení vzduchu. S rostoucím tlakem se rychlost šíření impulzu snižuje.



Obr. 2.7 Vliv teploty a tlaku vzduchu na rychlost šíření [2]

Ultrazvuková čidla měří vzdálenost na principu časové odezvy na vyslaný zvukový impulz při konstantní rychlosti šíření zvuku. Díky tomu mají vynikající schopnost potlačení pozadí. Tyto senzory umožňují detekovat téměř všechny materiály. Lze je využít i pro detekci průhledných materiálů a fólií. Velmi důležitým parametrem těchto senzorů je jejich dosah a s tím spojené trojrozměrné šíření signálu prostorem. Dosah určuje, do jaké vzdálenosti může čidlo měřit běžné odrazivé předměty s dostatečnou rezervou spolehlivé funkce. Ultrazvukové senzory se používají pro měření vzdálenosti nebo jako hlídače hladiny kapalných a sypkých hmot v nádobách. [2]

2.5 Optické senzory

Optické senzory (přesněji optoelektronické nebo fotoelektronické) jsou vzhledem ke svému funkčnímu rozsahu a aplikačním schopnostem nejvíce používané. Používají se například v jednoduchých binárních aplikacích, bezpečnostních aplikacích, měřicích

a kontrolních úlohách, hlídání hladin a rozměrů. Jejich velkou výhodou a důvodem rostoucího zájmu jsou zmenšující se rozměry a stoupající výkonnost. Další výhodou je odolnost proti rušivým elektromagnetickým polím a hluku. Mezi nevýhody patří malá odolnost proti vlhkosti, infrazářením a silnému znečištění.

V optických senzorech se používají prvky, jejichž základní vlastností je přeměna elektrického proudu na elektromagnetické vlnění a naopak. Dříve se v optických senzorech jako vysílací prvky používali žárovky a jako přijímací prvky fotobuňky nebo fotoodpory. V dnešní době se jako vysílací prvky používají luminiscenční diody (LED) a polovodičové laserové diody. Přijímacími prvky v moderních optických senzorech jsou fotodiody, fototranzistory a diody s laterálním efektem (PSD).

Optické senzory se dělí na reflexní senzory, reflexní senzory s odrazkou (reflexní závory) a na senzory obsahující oddělený vysílač a přijímač (jednocestné závory). [2]

3 Substráty

3.1 Keramické substráty

Jedním z druhů substrátů, které se používají k výrobě senzorů, jsou keramické substráty. Vyznačují se dobrou mechanickou pevností, odolností proti otěru, vysokou tepelnou vodivostí a výbornou elektrickou izolací. Jsou velmi stabilní při vysoké teplotě a odolávají agresivním chemickým látkám.

Mezi keramické substráty se dají zařadit oxid hlinitý (Al_2O_3), nitrid hliníku (AlN), oxid berylia (BeO) a silikon karbid (SiC).

Nejpoužívanějším keramickým substrátem je oxid hlinitý. Vyznačuje se vynikající tepelnou vodivostí, vysokou mechanickou pevností, odolností proti otěru a malými dielektrickými ztrátami. Povrch tohoto substrátu je hladký a má nízkou pórovitost.

Nitrid hliníku má oproti substrátu z oxidu hlinitého 7-8 krát vyšší tepelnou vodivost.[13]

Tab. 3.1 Vlastnosti keramických substrátů [11]

Parametr / materiál	96% Al_2O_3	99,5% Al_2O_3	99% BeO	AlN
Tepelná vodivost [$\text{J}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	35	37	250	170
Součinitel teplotní roztažnosti [K^{-1}]	6,4	6,6	5	4,5
Elektrická pevnost [$\text{kV}\cdot\text{mm}^{-1}$]	8	9	14	12
Měrný odpor [$\Omega\cdot\text{mm}$]	$7\cdot 10^{13}$	$7\cdot 10^{13}$	10^{14}	$>10^{13}$
Relativní permitivita	9	10	6,6	9 - 10

3.2 Flexibilní substráty

K výrobě senzorů se používají také flexibilní substráty, které lze na rozdíl od keramických substrátů ohýbat a různě tvarovat. Flexibilní substráty se vyznačují lehkostí, trvanlivostí a své využití mají i v miniaturizaci zařízení.

Pro výrobu flexibilních substrátů se používají hlavně polyimid a polyester. Polyimid (nazývaný Kapton) je známý pro svou tepelnou stabilitu, dobrou chemickou odolnost a velmi dobré mechanické vlastnosti. Tyto vlastnosti si udržuje až do teploty 450 °C. Polyester (nazývaný Mylar) je mnohem levnější než polyimid, ale lze ho použít pouze do teploty 85 °C (polyester nelze použít při pájení přetavením).

Flexibilní substráty umožňují díky svým vlastnostem několik možností konstrukčního uspořádání – jednostranné, oboustranné, vyztužené, vícevrstvé nebo ohebné pevné. [11]

3.3 Křemíkové substráty

K výrobě senzorů se používají také křemíkové substráty. Tyto substráty se vyrábějí z vysoce čistého křemíku a příměsí bóru, fosforu, arzénu nebo antimonu. Vyrábějí se řezáním monokrystalu křemíku na tenké plátky. Na těchto plátcích se leptáním a nanášením vytvoří obvodová mřížka. Křemíkové substráty se vyrábějí v několika velikostech od 2,54 mm (1 palec) až 450 mm (18 palců). [14]

4 Praktická část

Praktická část bakalářské práce je zaměřena na vakuové napařování uhlíku na keramické substráty o tloušťce 0,635 mm. Cílem této praktické části práce bylo zjištění možností nově zakoupeného proudového zdroje. Uhlík byl napařován na substráty z 96 % Al_2O_3 s dvojicí zlatých interdigitálních elektrod vytvořených pomocí metody lift off. Šířka prstů i mezer byla 25 μm . Uhlík se na substráty napařuje z důvodu toho, že má velkou plochu a při nanášení organické vrstvy na substrát se do něj tato vrstva lépe zafixuje, což je možné využít například v senzorických aplikacích.

Uhlík byl na substráty napařován při třech hodnotách proudu – 140 A, 160 A a 180 A a po dobu třech časů – 10 s, 30 s a 50 s. Při proudu 180 A bylo napařování provedeno pouze v časech 10 a 30 sekund, protože při napařování po dobu 50 s by mohlo dojít k poškození napařovací aparatury. Při každém proudu a čase byly napařeny tři vzorky a u každého vzorku byla změřena impedance a fázový posun před a po napařování. Výsledné hodnoty impedance a fázového posunu v tabulce naměřených hodnot jsou aritmetickým průměrem příslušných třech vzorků (vzorky u kterých se hodnoty řádově lišily od ostatních, byly vyřazeny).

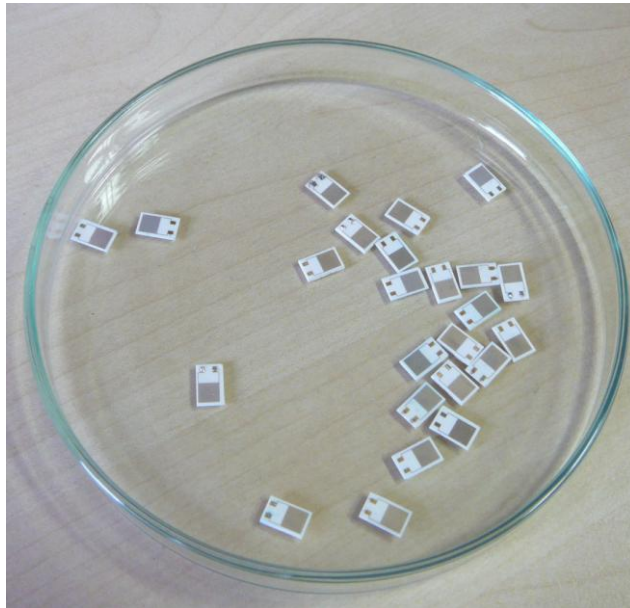


Obr. 4.1 Používaná napařovací aparatura

4.1 Příprava

Příprava se skládala z několika kroků. Nejprve bylo potřeba připravit substráty a očistit je od nečistot. Čistění probíhalo v ultrazvukové čističce v izopropylalkoholové lázni. Po ultrazvukovém čistění byly substráty a ještě opláchnuty demineralizovanou vodou

a následně osušeny. Po osušení se u každého substrátu RLC metrem změřila impedance a fázový posun. Posledním krokem přípravy substrátů bylo zamaskování elektrod lepicí páskou.

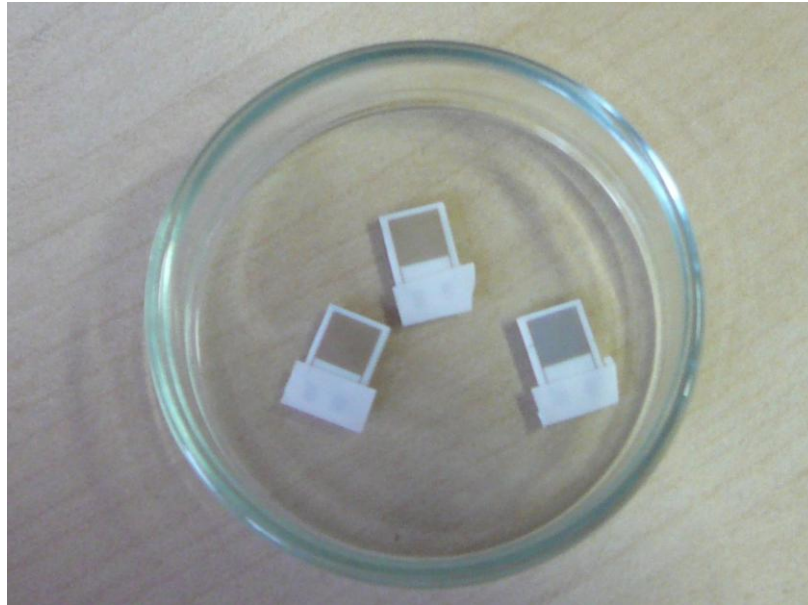


Obr. 4.2 Keramické substráty



Obr. 4.3 Sušení substrátu po očištění

Dalším krokem byla příprava vakuové napařovací aparatury. Do vakuové komory se vložily dvě uhlíkové elektrody, z nichž jedna byla seříznuta do špičky, aby byl v místě dotyku elektrod co největší přechodový odpor a elektrody se snáze zahřály.



Obr. 4.4 Substráty se zamaskovanými elektrodami

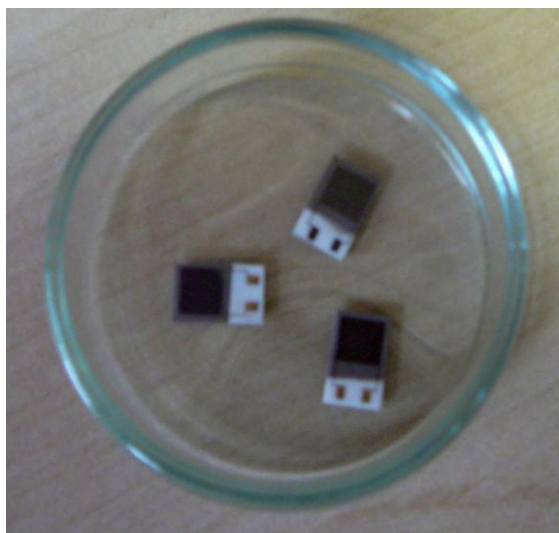
4.2 Napařování

Po přípravě vzorků a napařovací aparatury byly vzorky po třech vkládány do vakuové komory a vrstva uhlíku byla napařována při proudech 140 A, 160 A a 180 A a v časech 10 s, 30 s a 50 s.



Obr. 4.5 Substráty ve vakuové komoře

Po zapnutí aparatury bylo nutné počkat přibližně 20 minut na první odčerpání vzduchu. Po prvním odčerpání vzduchu se do vakuové komory vpustil argon a poté se obsah komory znovu odčerpál. Druhé odčerpání trvalo přibližně 5 minut. Poté se do komory znovu napustil argon a provedlo se třetí odčerpání, které trvalo zhruba dvě minuty. Následně se na proudovém zdroji nastavil požadovaný proud a po požadovanou dobu byl přiváděn na uhlíkové elektrody. Po ukončení napařování bylo nutné počkat, než se vakuová komora ochladí. Poté byly vzorky z komory vyzdány, odmaskovány a byla u nich RLC metrem změřena impedance a fázový posuv. Vzorky byly ještě jednou změřeny po ustálení hodnoty impedance. Toto ustálení je způsobeno stabilizací napařené vrstvy na vzduchu, především absorpcí vzdušné vlhkosti do uhlíkové vrstvy.



Obr. 4.6 Substráty s napařenou vrstvou uhlíku

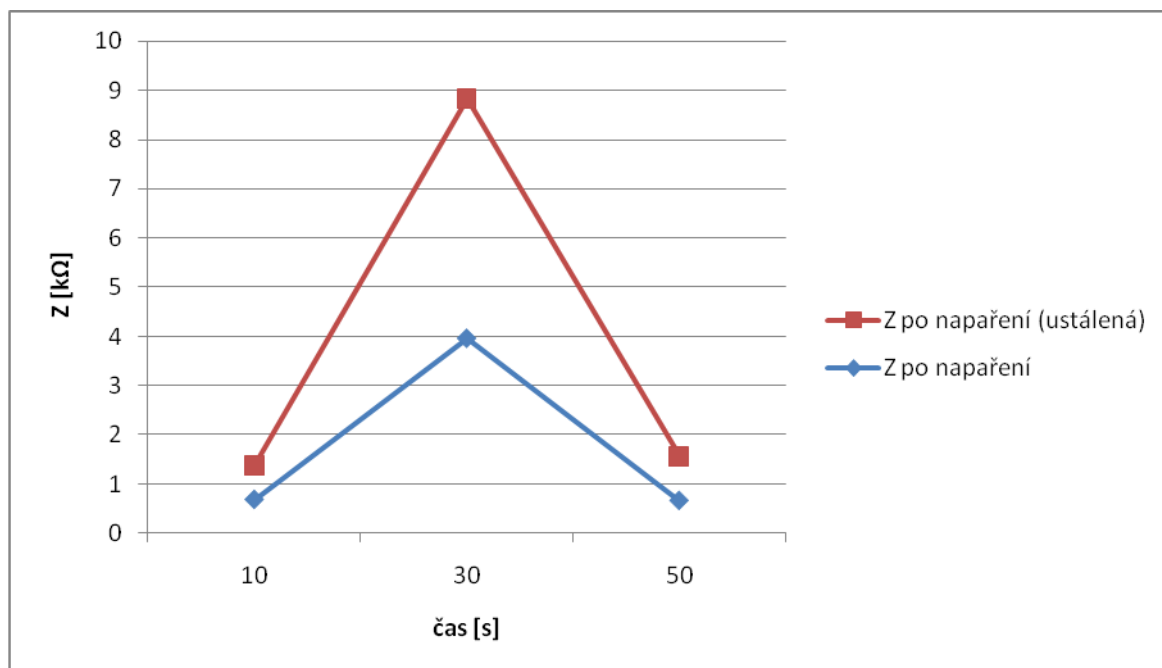


Obr. 4.7 RLC metr MOTEC MT 4090 používaný k měření impedance a fázového posunu

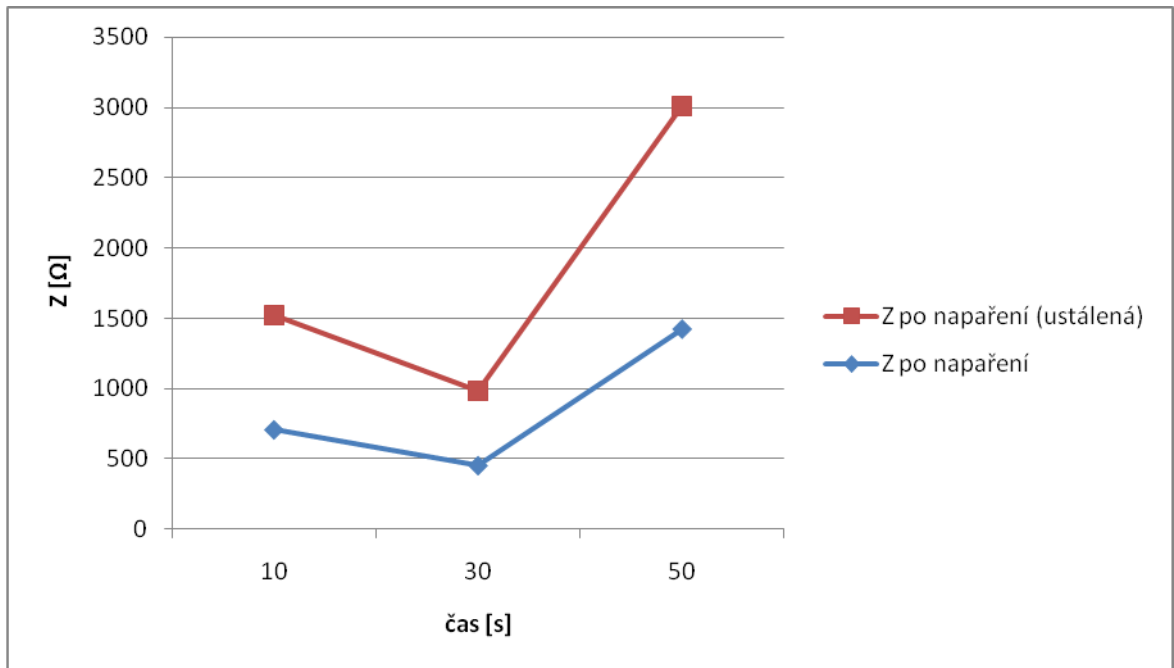
4.3 Naměřené hodnoty a grafy

Tab. 4.1 Naměřené hodnoty

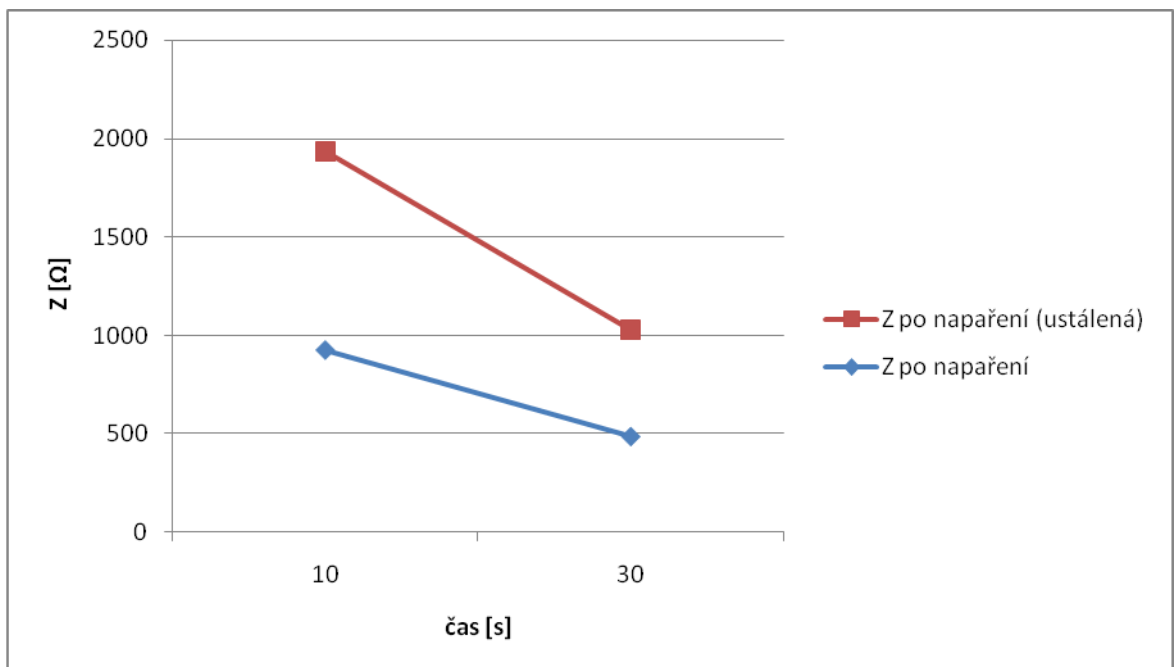
Podmínky napařování		Hodnoty před napařením		Hodnoty po napaření		Hodnoty po napaření (ustálené)	
I [A]	t [s]	Z [M Ω]	φ [°]	Z [Ω]	φ [°]	Z [Ω]	φ [°]
140	10	9.37	-89.53	680.30	-0.033	696.50	-0.125
140	30	10.66	-89.66	3957.50	-0.997	4881.50	-1.805
140	50	9.14	-89.64	658.90	-0.118	899.60	-0.635
160	10	9.00	-88.00	707.67	-0.085	816.57	-0.190
160	30	10.40	-90.23	454.40	-0.026	531.57	-0.067
160	50	9.48	-89.43	1422.67	-0.011	1585.33	-0.023
180	10	9.30	-89.83	926.80	-0.011	1008,53	-0,001
180	30	3.45	-90.01	486.23	-0.003	541,53	-0,004



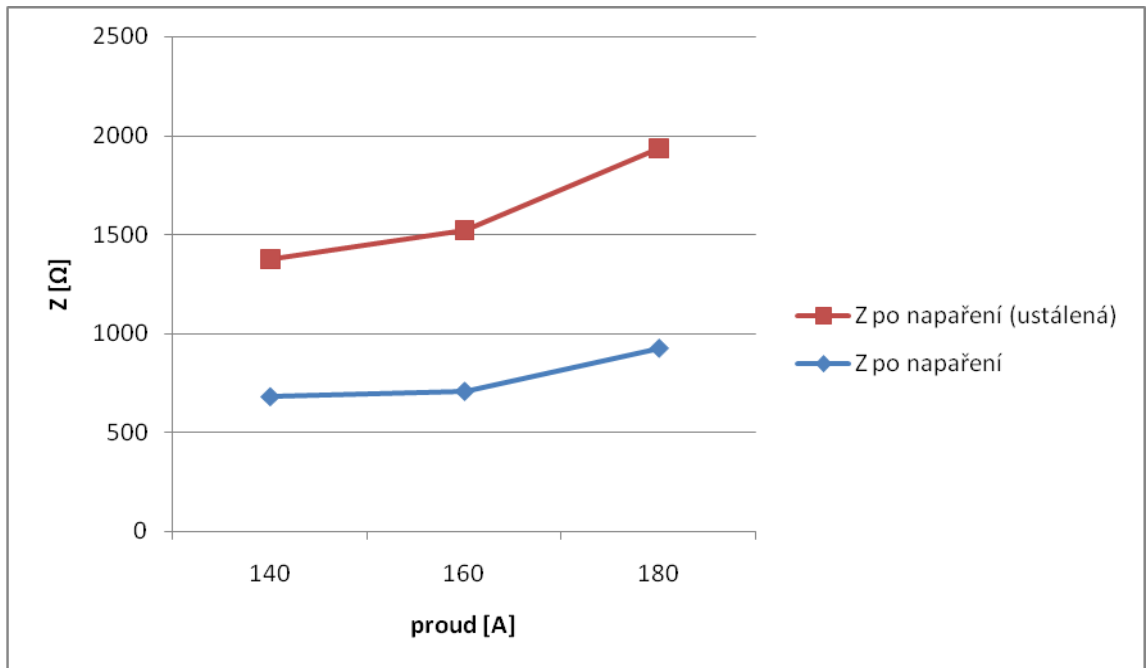
Obr 3.8 Závislost impedance na čase napařování při proudu 140 A



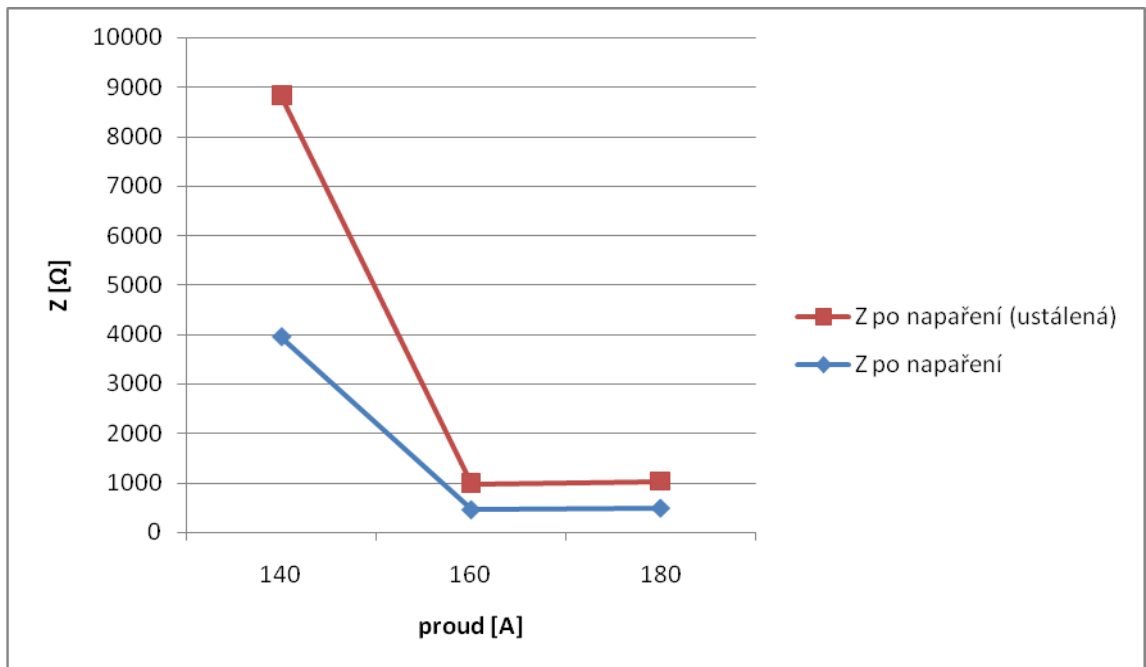
Obr 3.9 Závislost impedance na čase napařování při proudu 160 A



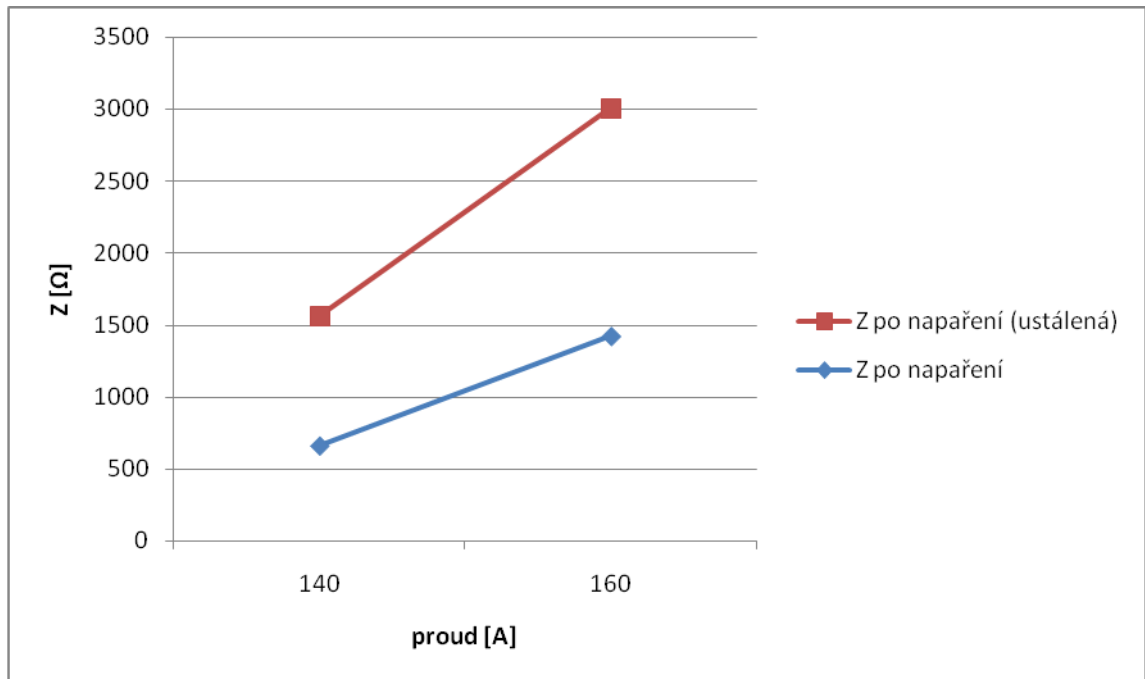
Obr 3.10 Závislost impedance na čase napařování při proudu 180 A



Obr 3.11 Závislost impedance na proudu při čase napařování 10 s



Obr 3.12 Závislost impedance na proudu při čase napařování 30 s



Obr 3.13 Závislost impedance na proudu při čase napařování 50 s

Závěr

Principy jednotlivých metod pro vytváření vodivých obrazců jsou shrnuty v kapitole 1. V kapitole 2 byly popsány principy indukčních, kapacitních, magnetických, ultrazvukových a magnetických senzorů. Jednotlivé typy senzorů lze použít v celé řadě aplikací a výběr konkrétního senzoru závisí na mnoha faktorech. V kapitole 3 byly popsány jednotlivé typy substrátů – keramické, křemíkové a flexibilní. K výrobě senzorů se nejčastěji používají keramické substráty. Velmi často se používají i flexibilní substráty a to hlavně díky tomu, že se dají ohýbat a různě tvarovat, což keramické substráty neumožňují.

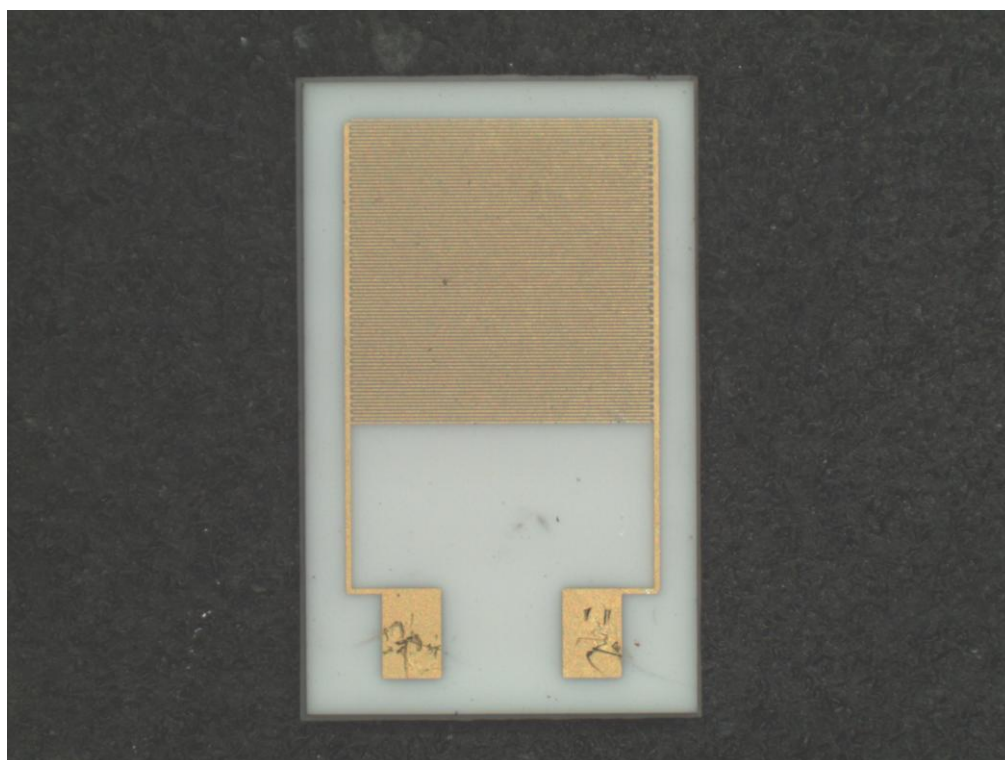
Cílem praktické části, která je popsána v kapitole 4, bylo otestování nového proudového zdroje. Nejvyšší hodnota proudu, při které byl uhlík napařován, byla 180 A a tuto hodnotu dokázal zdroj dodávat do aparatury po celou požadovanou dobu 30 s. Podle teoretických předpokladů by měla impedance jednotlivých vzorků klesat v závislosti na narůstajícím proudu a čase napařování. Grafy na obrázcích 3.10, 3.11 a 3.12 tedy přibližně odpovídají teoretickým předpokladům. Z ostatních grafů je patrné, že teoretickým předpokladům neodpovídají, a tudíž došlo k určitým nepřesnostem. Tyto nepřesnosti mohou být způsobeny tím, že používané substráty byly již jednou použité a poté pouze vyčištěné, a tudíž na nich mohly zůstat zbytky jiných chemických látek. Dalším důvodem by mohlo být to, že při každém proudu a čase byly napařeny pouze tři vzorky. Aby byly hodnoty impedance statisticky vypovídající, muselo by být napařeno více vzorků. Na nepřesnosti by také mohlo mít vliv to, že používaná napařovací aparatura se běžně používá pro jiné aplikace, kde není potřeba takto tlustých vrstev.

Použitá literatura

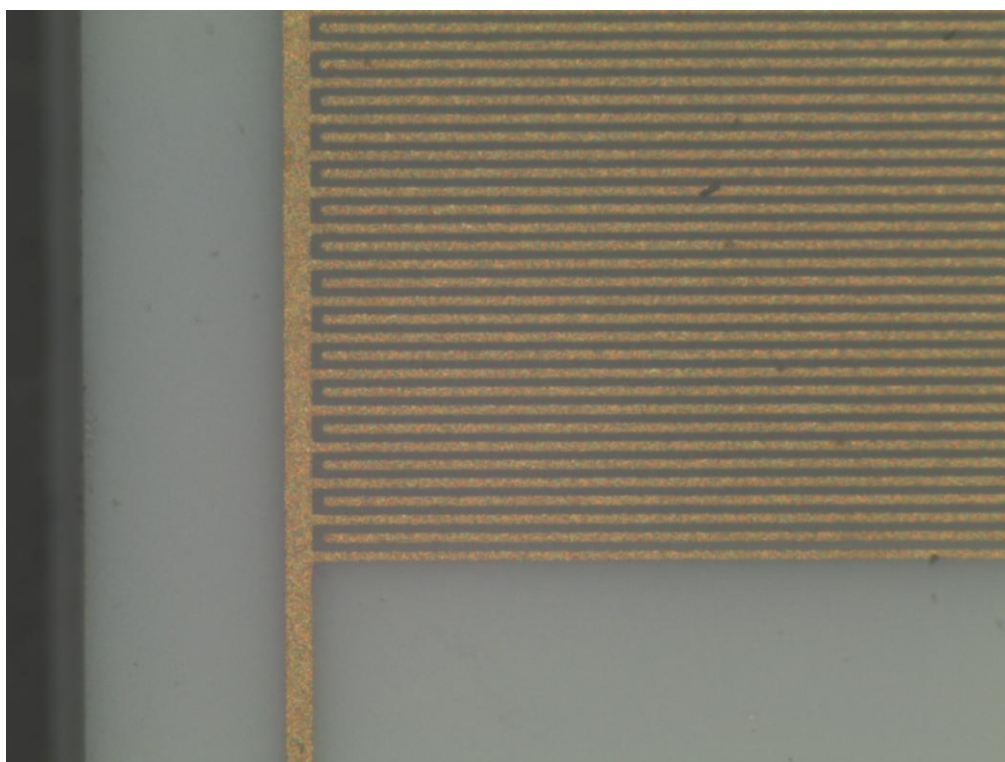
- [1] Mach, P.; Skočil, V.; Urbánek, J.: *Montáž v elektronice*, Vydavatelství ČVUT, Praha 2001
- [2] Martínek, R.: *Senzory v průmyslové praxi*, BEN, Praha 2004
- [3] Mattox, D. M.: *Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing*, Elsevier Inc.,
- [4] Technologické procesy v montážních technologiích. In: [online]. [cit. 2013-02-15]. Dostupné z: <http://www.umel.feec.vutbr.cz/~vasko/multimedialni-ucebnice/depozice-a-osazovani/>
- [5] Naprašování tenkých vrstev. In: [online]. [cit. 2013-02-20]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=25484
- [6] Síto pro sítotisk 43T. In: [online]. [cit. 2013-02-10]. Dostupné z: <http://www.cart.cz/sito-pro-sitotisk-43t/>
- [7] Ruční sítotisk. In: [online]. [cit. 2013-02-24]. Dostupné z: <http://www.evermax.cz/nase-vybaveni>
- [8] Skočil, V.: *Diferenciace, Z prezentace předmětu KET/Technologie elektroniky*, Plzeň: Západočeská univerzita, 2011
- [9] Iontové, reaktivní, magnetronové naprašování. In: [online]. [cit. 2013-03-15]. Dostupné z: http://fchi.vscht.cz/uploads/pedagogika/nano/predmety/senzory/04_naprasov%C3%A1n%C3%AD.pdf
- [10] Naprašovací zařízení. In: [online]. [cit. 2013-03-02]. Dostupné z: http://www.naprasovani.cz/pages/vybaveni/naprasovacka_4.jpg
- [11] Pouzdření v elektronice - substráty, tepelný management a moderní typy pouzder. [online]. [cit. 2013-04-12]. Dostupné z: <http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/bmts/2012-07A-Modern%C3%AD%20pouzdra%20a%20substr%C3%A1ty%28Bc%29.pdf>
- [12] Polyimide. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. [cit. 2013-05-20]. Dostupné z: <http://en.wikipedia.org/wiki/Polyimide>
- [13] Ceramic wafer. In: [online]. [cit. 2013-05-21]. Dostupné z: <http://www.semiwafer.com/products/ceramic.htm>
- [14] Wafer (electronics). In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. [cit. 2013-05-21]. Dostupné z: [http://en.wikipedia.org/wiki/Wafer_\(electronics\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Wafer_(electronics))
- [15] Sítotiskové rámy a síťovina. In: THOMA, Patrik. *Svět tisku* [online]. [cit. 2013-03-10]. Dostupné z: http://www.svettisku.cz/buxus/generate_page.php?page_id=1717
- [16] Sítotiskové těrky. In: THOMA, Patrik. *Svět tisku* [online]. [cit. 2013-03-11]. Dostupné z: http://www.svettisku.cz/buxus/generate_page.php?page_id=2114
- [17] Napínání sítotiskových rámu. In: THOMA, Patrik. *Svět tisku* [online]. [cit. 2013-03-11]. Dostupné z: http://www.svettisku.cz/buxus/generate_page.php?page_id=1872
- [18] Vakuová depozice materiálů - napařování. In: LIBICH, Jiří. [online]. [cit. 2013-03-25]. Dostupné z: http://www.umel.feec.vutbr.cz/~bousek/vak/VRSTVY/FLASH_LIBICH.pdf
- [19] Thermal evaporation in vacuum. In: [online]. [cit. 2013-04-12]. Dostupné z: http://www.icmm.csic.es/fis/english/evaporacion_resistencia.html
- [20] Tlusté vrstvy. In: [online]. [cit. 2013-05-23]. Dostupné z: [http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/bmts/2012-02A-tlust%C3%A9%20vrstvy\(Bc\).pdf](http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/bmts/2012-02A-tlust%C3%A9%20vrstvy(Bc).pdf)

Přílohy

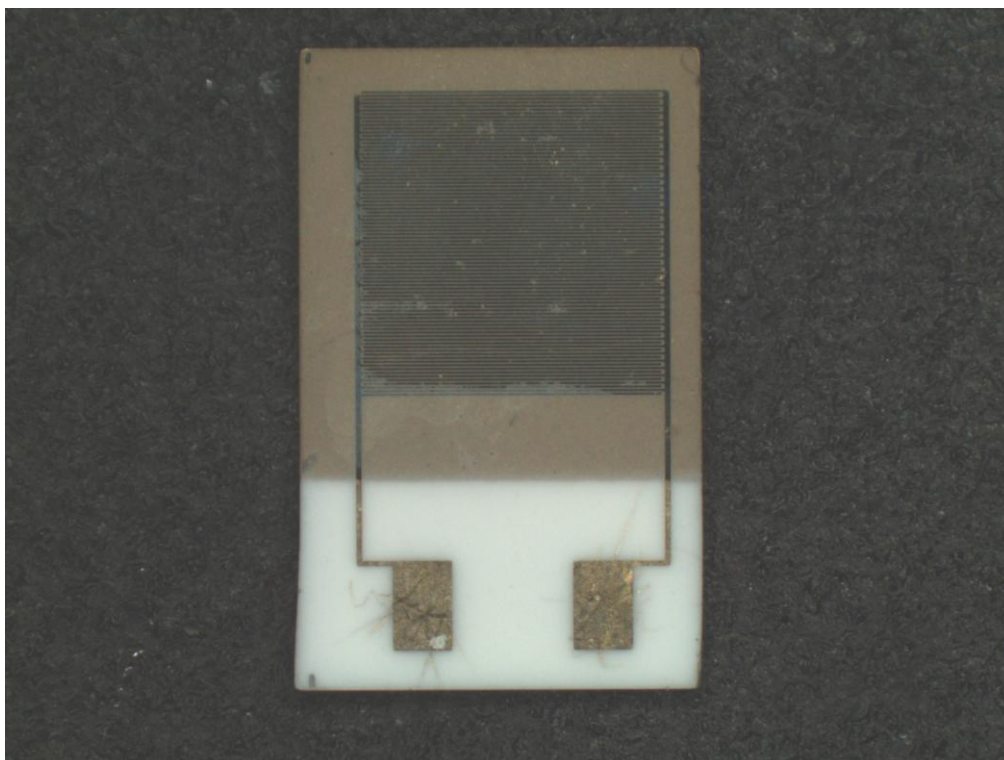
Příloha A – Vzorčky nafocené mikroskopem



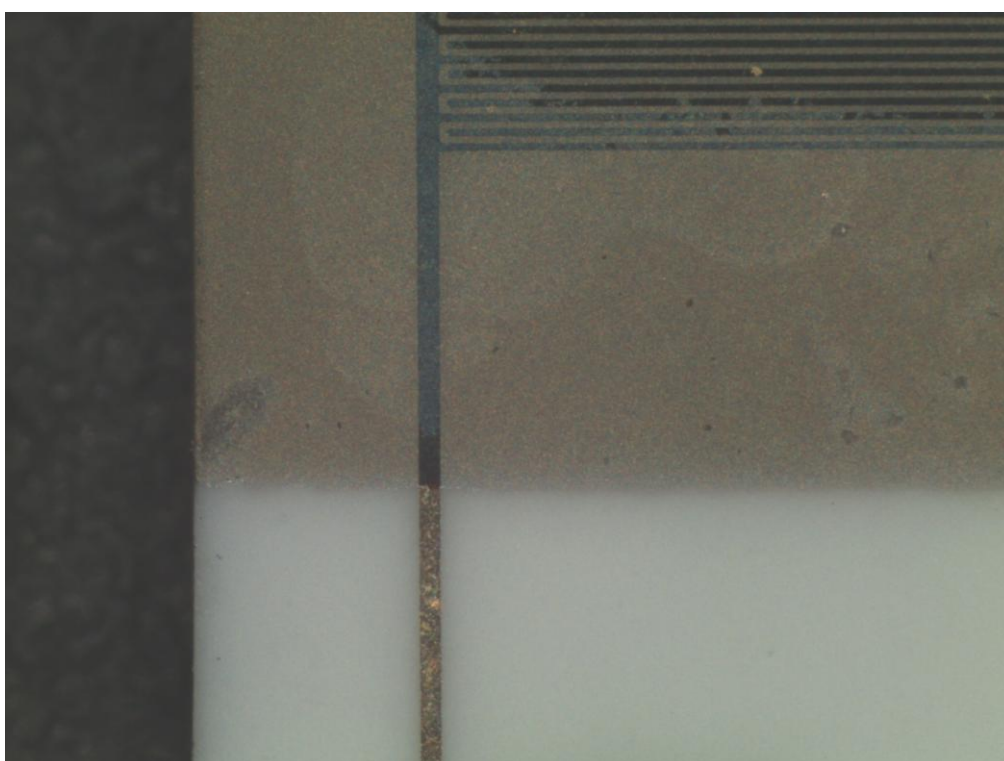
Obr. 1 Substrát bez napařené vrstvy uhlíku



Obr. 2 Detail na strukturu



Obr. 3 Substrát s napařenou vrstvou uhlíku



Obr. 4 Detail na strukturu