



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY

A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

KONTAKTOVÁNÍ POLOVODIČOVÝCH ČIPU  
SLITINAMI STŘÍBRA

SILVER ALLOY WIRE-BONDING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Martin Búran

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Michal Řezníček Ph.D.

BRNO 2017

## **Abstrakt**

Práca sa zaoberá kontaktovaním polovodičových čipov, špeciálne kontaktovaním s pomocou zliatin striebra. V prvej časti sú rozobraté spôsoby kontaktovania a rozbor materiálov, ktoré sú pri kontaktovaní použité. Do textu sú zahrnuté rizikové faktory a najčastejšie poruchy, ktoré môžu pri kontaktovaní vzniknúť. Ďalšia časť textu sa zaoberá návrhom testov a testovaním nakontaktovaných polovodičových čipov, spolu s možnosťou overenia deklarovaných vlastností o hotových súčiastok.

## **Kľúčové slová**

kontaktovanie, drôtové prepojenie, zliatiny striebra, štandardy, testovanie

## **Abstract**

This project deals with interconnection of semiconductor chips, especially interconnection using silver alloys. First part of this project contains interconnection methods and comparison of materials, which are used in wire bonding. Project include risk factors and the most frequent defects, which can appear during bonding. Next part contains testing proposals and testing of interconnected semiconductor chips.

## **Keywords**

interconnection, wire bonding, silver alloy, standards, testing

## **Bibliografická citácia**

BÚRAN, M. *Kontaktovanie polovodičových čipov zliatinami striebra*. Brno: Vysoké Učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017. 51 s. Vedúci bakalárskej práce Ing. Michal Řezníček, Ph.D.

## Prehlásenie

Prehlasujem, že svoj semestrálny projekt na tému „**Kontaktovanie polovodičových čipov zliatinami striebra**“ som vypracoval samostatne pod vedením vedúceho semestrálneho projektu a s použitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej bakalárskej práce ďalej prehlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto bakalárskej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, najmä som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a som si úplne vedomí následkov porušenia ustanovení § 11 a nasledujúcich autorského zákona č. 121/2000 Sb., vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovení časti druhej, hlavy VI. diel 4 Trestného zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dňa: **6. júna 2017**

.....  
podpis autora

## Pod'akovanie

Ďakujem vedúcemu bakalárskej práce Ing. Michalovi Řezníčkovi, Ph.D. za účinnú metodickú, pedagogickú, odbornú pomoc a ďalšie cenné rady pri realizácii a spracovaní mojej bakalárskej práce.

Ďalej ďakujem doc. Ing. Jane Drbohlavovej, Ph.D., Ing. Martinovi Buršíkovi, Ph.D. a Ing. Alexandrovi Otáhalovi za ich odbornú pomoc pri realizácii tejto práce.

Pod'akovanie patrí aj laboratoriu LabSensNano za možnosť využitia elektronového mikroskopu pri riešení a vyhodnocovaní tejto práce

Nakoniec ďakujem Ing. Martinovi Laštovicovi a spoločnosti HONEYWELL za poskytnutie potrebných informácií a materiálu pre realizáciu tejto práce.

V Brně dňa: **6. júna 2017**

.....  
podpis autora

## Obsah

1	ÚVOD.....	7
2	Základný prehľad problematiky .....	8
2.1	Kontaktovanie .....	8
2.2	Technológie kontaktovania .....	8
2.3	Typy spojov.....	11
3	Popis materiálov pre kontaktovanie.....	14
4	Priemyselné štandardy .....	16
4.1	Rizikové faktory pre kontakty realizované zliatinami striebra .....	16
4.2	Typické poruchy bondov.....	17
4.3	Typické poruchy spoľahlivosti.....	18
4.4	Hodnotenie kvality spoja.....	19
4.5	Vizuálna kontrola .....	19
5	Popis testovacích metód a návrh parametrov testovania .....	20
5.1	Testovanie kontaktovania.....	20
5.2	Testovanie zapuzdrených komponentov .....	23
5.3	Overenie originality komponentov .....	24
6	Praktická realizácia .....	25
6.1	Kontaktovanie polovodičových čipov a testovanie.....	25
6.2	Testovanie zapuzdrených komponentov .....	34
6.3	Overenie originality .....	38
	Záver .....	42
	Zoznam literatúry.....	43
	Zoznam obrázkov .....	44
	Zoznam tabuliek .....	44
	Zoznam symbolov, veličín a skratiek .....	45
	Príloha A BOND PULL test .....	46
	Príloha B Testovanie komponentu MIC4427YM.....	49

# 1 ÚVOD

Pri výrobe integrovaných obvodov je technológia wire bonding najrozšírenejšou pre prepojenie polovodičového čipu a vývodu súčiastky resp. iného substrátu. Pomocou tejto technológie je možné prepojiť jednak logické obvody s nižším prúdovým odberom, tak aj výkonové polovodiče kde je prúdový odber rádovo až tisíc násobne väčší. Obe strany kontaktu sú prepojené mechanicky pevne, drôtom daného prierezu v rozmedzí 15-500 $\mu$ m v závislosti na použiteľnom materiáli drôtu a druhu polovodičového obvodu. Najčastejšie používanými materiálmi sú zlato, hliník a meď. Okrem materiálu drôtu ďalej rozlišujeme metódy kontaktovania. Kontaktovanie pomocou termokompresie využíva teplotu a tlak. Kontaktovanie ultrazvukom je založené na prelínaní častíc dvoch materiálov v dôsledku šmykového trenia. Termosonické kontaktovanie je kombináciou termokompresie a ultrazvuku. Pre zlato je najpoužívanejší spôsob kontaktovania pomocou termokompresie, prípadne termosonicky. Hliník je najpoužívanejší pre kontaktovanie pomocou ultrazvuku. Medené drôty je potrebné kontaktovať v inertnej atmosfére kvôli oxidácii. Drôty z medi a hliníku sú najpoužívanejšie pre výkonové aplikácie kde je predpokladané vyššie prúdové zaťaženie kontaktu, pričom je pre kontaktovanie použitý vodič s väčším priemerom až do 500 $\mu$ m. Pre logické obvody (procesory, pamäte) s nižším prúdovým odberom kde je vyžadovaná vysoká spoľahlivosť, minimálne skreslenie signálu a zachovanie týchto vlastností po dlhý čas, je najvhodnejším materiálom v súčasnosti zlato.

Zlato má výborné elektrické vlastnosti (nízky prechodový odpor) a stabilné chemické vlastnosti (vysokú odolnosť proti korózii). Cena zlata a ďalších drahých kovov sa však v posledných rokoch zvyšuje čo vedie u výrobcov k prehodnoteniu ekonomických nákladov a zavádzanie lacnejších alternatív. Konkrétne pri technológii wire bonding dochádza k nahrádzaniu zlatých drôtov za drôty zo striebra a jeho zliatin predovšetkým pre jeho cenu. Pre porovnanie, v súčasnosti je cena zlata (37,4 EUR/g) proti cene striebra (0,72 EUR/g) asi 70x vyššia. Najdôležitejšia otázka ktorá sa vynára pri tejto situácii je tá, či je možné nahradiť zlato za striebro a jeho zliatiny pri zachovaní pôvodných elektrických, mechanických a iných vlastností, ktoré sú kladené v odvetviach kde je požadovaná najvyššia kvalita t.j. automobilový, letecký a vojenský priemysel.

Tieto vlastnosti a parametre je možné overiť krátkodobými a dlhodobými testami. Základný a najjednoduchší test je optická kontrola, ktorá je vykonávaná mikroskopom. Medzi krátkodobé spôsoby testovania sa radia deštruktívne testy ako „bond pull“ a „bond shear“ pomocou ktorých je testovaná mechanická pevnosť prepojení. Dlhodobé testy sledujú zmeny vlastností materiálov spôsobené opotrebovaním a únavou materiálu.

Na základe vyhodnotenia týchto testov je možné posúdiť kvalitu prepojení realizovaných zliatinami striebra, prípadne ich porovnávať s inými materiálmi.

## 2 Základný prehľad problematiky

### 2.1 Kontaktovanie

Kontaktovanie alebo bondovanie je spôsob vytvorenia elektrického a mechanicky pevného spoja, medzi integrovaným obvodom (IC) a vývodmi súčiastky. Využíva sa drôt z elektricky vodivého materiálu. Tento spoj je tvorený mikrodrôtom, ktorého prierez sa pohybuje od 15 do 500  $\mu\text{m}$ . K tomuto úkonu sa využíva kombinácia síl v podobe teploty, tlaku a ultrazvukovej energie. Ako náhle sú drôt a kontaktná plocha v tesnom kontakte, začne dochádzať k ich deformácii a spojeniu vplyvom difúzie, kedy jeden materiál začne prenikať do štruktúry druhého.

Technológia kontaktovanie existuje už od doby prvých tranzistorov t.j. od roku 1957 (viz obr. 1). Od tejto doby prešla vývojom a mnohými zmenami. Došlo ku zmenšeniu rozmerov realizácie spojov, automatizácii celého procesu, zvýšeniu kvality a variabilnosti parametrov kontaktovania, zdokonaleniu nástrojov a ku zvýšeniu spoľahlivosti.



Obr. 1 Prvý tranzistor prepojený s vývodmi pomocou kontaktovania[1]

### 2.2 Technológie kontaktovania

V závislosti na použitých materiáloch pre prepoj a kontaktnú plochu na ktorý je realizovaný prepoj delíme procesy kontaktovania na:

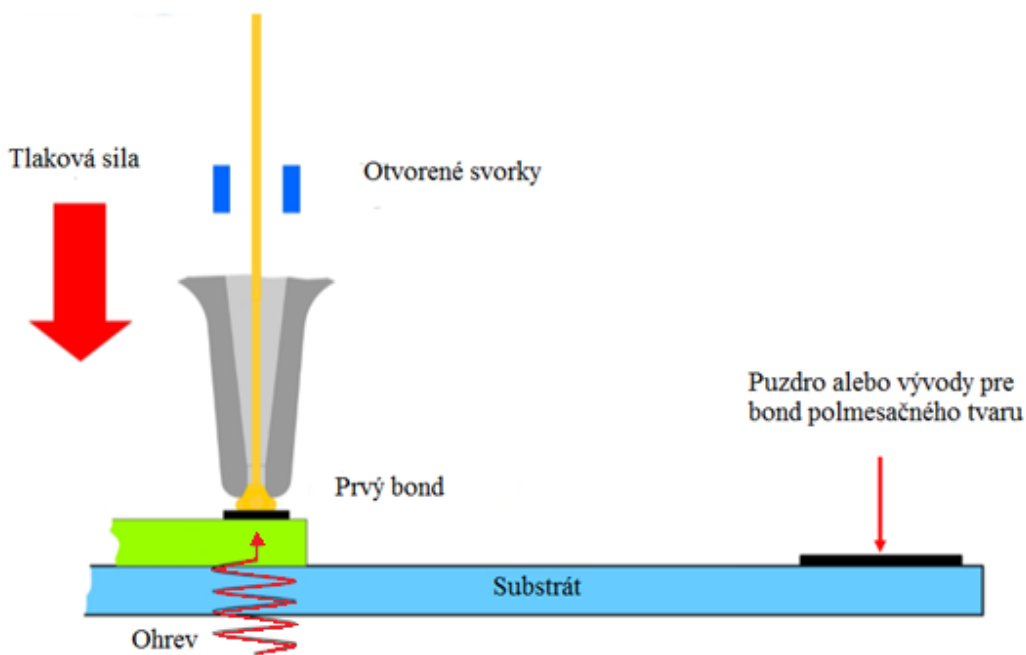


## Termokompresné kontaktovanie

Pre vytvorenie spoja sa využíva vzájomná kombinácia teploty a tlaku takým spôsobom aby došlo k čo najvhodnejšiemu prepojeniu materiálov drôtu a kontaktu vplyvom difúzie (viz obr. 2). Kontaktovacia ploška je ohrievaná na teplotu okolo 300°C, ktorá je nižšia ako teplota jej tavenia. Chýbajúca energia pre vytvorenie spoja je dodaná pomocou tlaku. U tejto technológie sa nevyužíva iný materiál ako zlato vzhľadom k oxidácii.[2][6]

Výhody: výborná spoľahlivosť spojov zlato-zlato  
spoj z guľôčky je možné viesť do všetkých smerov  
malé riziko vzniku kráterov

Nevýhody: vysoká požadovaná teplota rozhrania (300°C)  
vysoká citlivosť na kontamináciu



Obr. 2 Ukážka termokompresného kontaktovania [1]

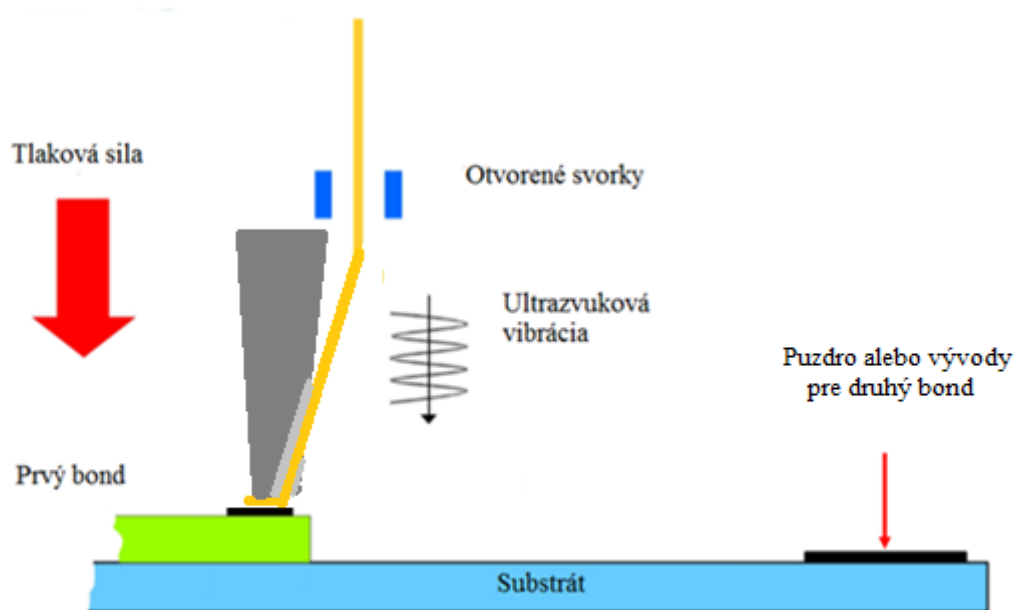
## Ultrazvukové kontaktovanie

Drôt typ. z hliníku alebo zlata je pritláčaný ku kontaktovacej ploche špeciálne tvarovaným hrotom v tvare klinu cez ktorý sa prenáša do drôtu a na kontakt ultrazvuková energia (viz obr. 3). Tá zmení povrchovú štruktúru pomocou šmykového

trenia vo vodorovnom smere až prejde povrch materiálu kontaktu a drôtu do plastického stavu a vytvoria spoj.[2][6]

Výhody: najnižšia citlivosť na kontamináciu  
kontaktovanie pri izbovej teplote  
rozstup nižší ako 50 $\mu$ m  
výborná spoľahlivosť spojov hliník-hliník

Nevýhody: nižšia rýchlosť kontaktovania  
spoj možné viesť len v smere osi X a Y  
náchylnosť na vznik kráterov  
sú potrebné špeciálne nástroje



Obr. 3 Ukážka ultrazvukového kontaktovania [1]

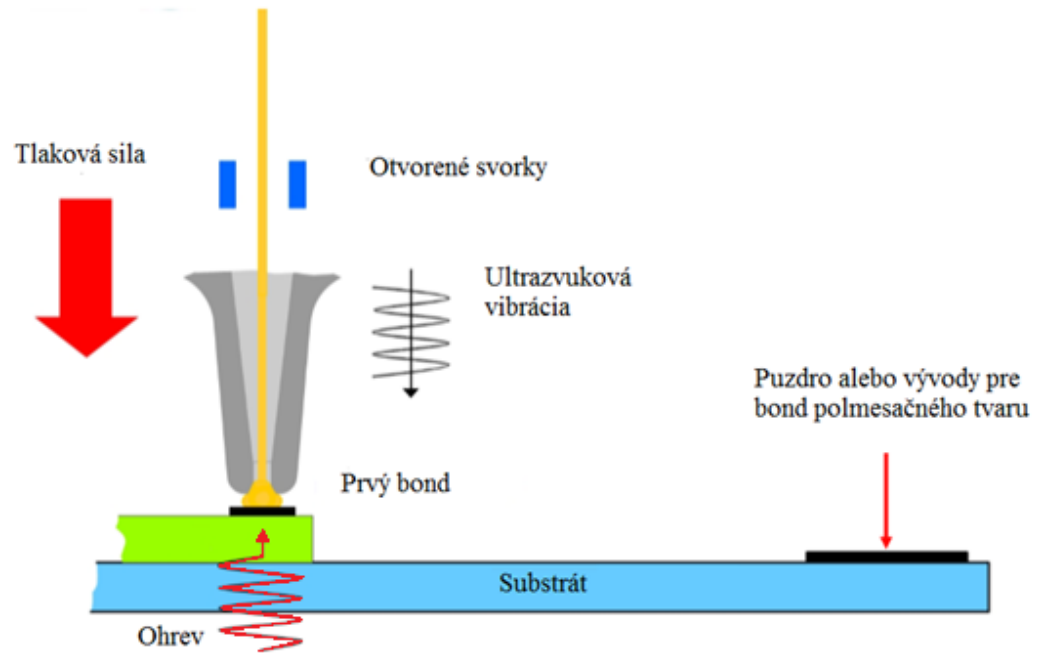
### Termosonické kontaktovanie

Pomocou tohto typu kontaktovania je dnes realizovaná väčšina drôtových prepojov zo zlata v integrovaných obvodoch. Materiály drôtov používané pre toto kontaktovanie sú meď, zlato a striebro. Táto metóda je kombináciou termokompresného a ultrazvukového kontaktovania (viz obr. 4). Pri tejto metóde je použitý vonkajší zdroj tepla podobne ako pri termokompresii avšak, teplota na ktorú je spoj zahrievaný je nižšia (125-220 °C). Čas vytvorenia spoja je oproti termokompresii kratší ( menší ako 10 ms).[2][6]

Výhody: výborná spoľahlivosť spojov zlato-zlato  
stredná teplota rozhrania (150°C)

spoj z guľôčky je možné viesť do všetkých smerov  
 nižšia ultrazvuková energia  
 rýchlosť autobonderov  
 menšie riziko vzniku kráterov ako u ultrazvukového kontaktovania

Nevýhody: väčšie riziko vzniku kráterov ako u termokompresného kontaktovania  
 vyššia citlivosť na kontamináciu ako u ultrasonického kontaktovania



Obr. 4 Ukážka termosonického kontaktovania [1]

Tab. 1 Porovnanie vlastností procesov kontaktovania [3]

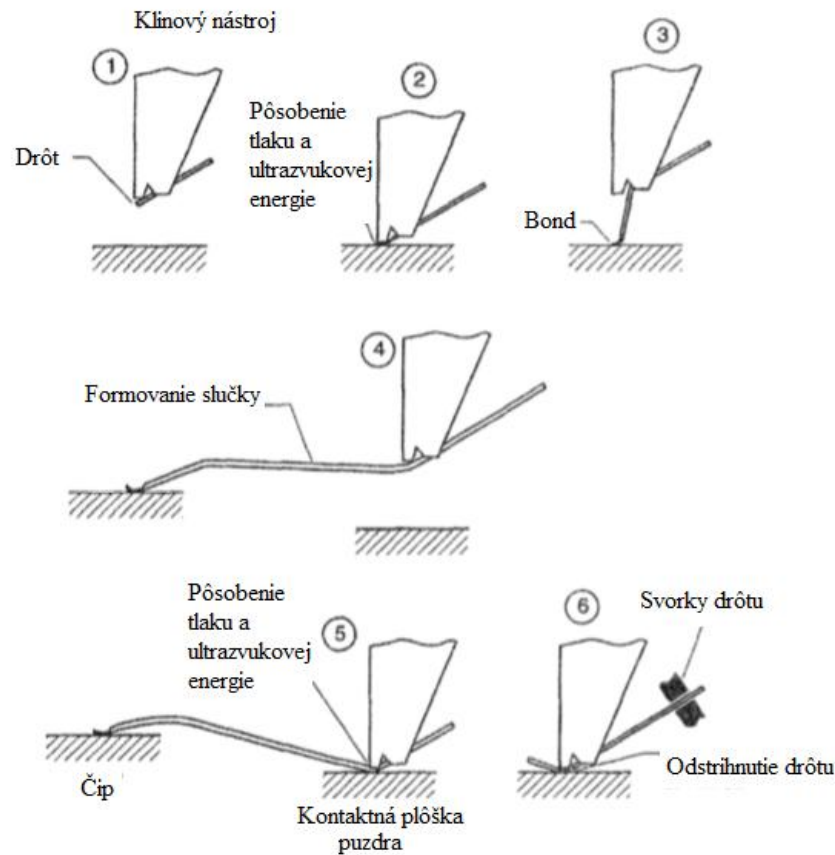
Proces	Tlak	Teplota	Ultrazvuková energia	Materiál drôtu	Materiál kontaktnej plochy
Termokompresia	vysoký	300-500 °C	nie	Au	Al, Au
Ultrazvuk	nízky	25 °C	áno	Au, Al, Ag	Al, Au
Termosonicky	nízky	125-220 °C	áno	Au, Cu, Ag	Al, Au

## 2.3 Typy spojov

### Klinový spoj

Na vytvorenie klinového spoja sa využíva nástroja v tvare klinu. Drôt je vedený a ohýbaný popod klinový nástroj cez jeho telo v uhle okolo 45°. Bondovací automat

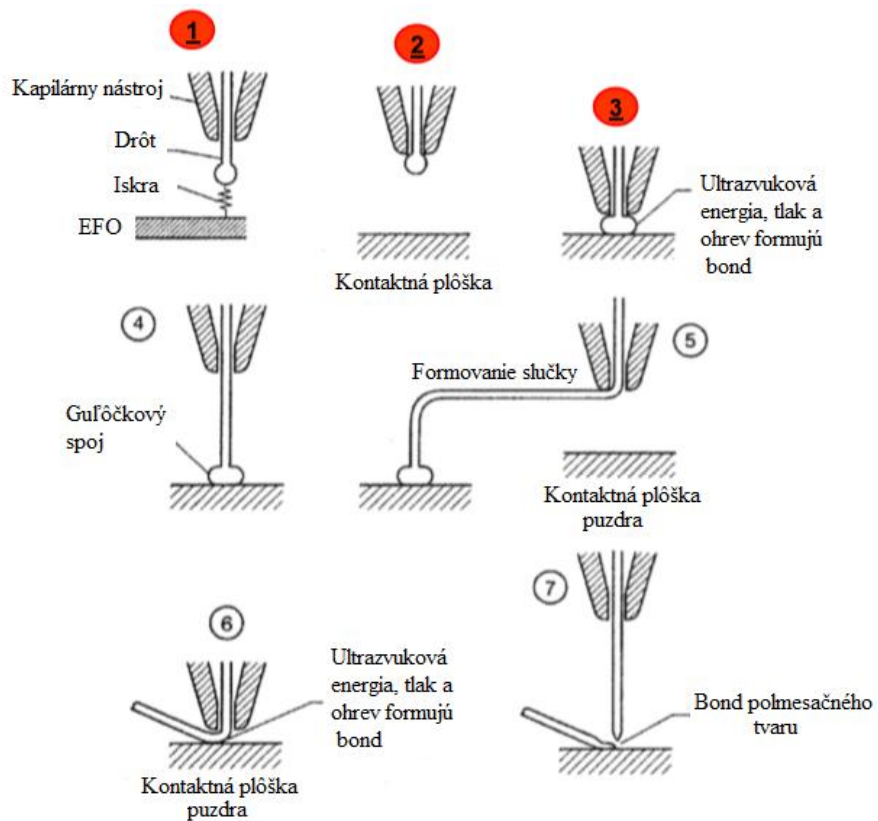
presunie klinový nástroj do presnej polohy kde je pritlačený ku ploche kontaktu. Za súčasného pôsobenia tlaku, tepla a ultrazvukovej energie dôjde k vytvoreniu spoja medzi drôtom v nástroji a kontaktnou plochou (viz obr. 5).[2][6]



Obr. 5 Vytvorenie klinového spoja [1]

## Kapilárny spoj

Na realizáciu kapilárneho spoja sa využíva nástroj v ktorom je umiestnená kapilára. Najčastejšie sa používa nástroj vyrobený z oxidu hlinitého ( $Al_2O_3$ ). Vstupný otvor do kapiláry je širší a zaoblený, postupne sa zúži na rozmer kapiláry ktorý je závislý od prierezu drôtu. Hrot obsahuje toto zaoblenie z dôvodu vytvorenia guľôčky pomocou materiálu drôtu a jej udržania v strede drôtu. Guľôčka je vytvorená na konci kapiláry elektrickým výbojom pomocou bezplameňového elektronického systému EFO. Kapilárny nástroj zatlačí na guľôčku definovanou silou za súčasného pôsobenia ultrazvukovej energie a tepla tak že vzájomnou difúziou materiálov vznikne spoj (viz obr. 6).[2][6]



Obr. 6 Vytvorenie kapilárneho spoja [1]

Tab. 2 Porovnanie typov spojov [3]

Spoj	Nástroj	Kontaktovací proces	Materiál drôtu	Materiál kontaktnej plochy	Rýchlosť
Gul'ôčkový	Kapilára	T/C, T/S	Au, Ag, Cu	Al, Au	10 drôtov/s
Klinový	Klin	T/S, U/S	Au, Al, Cu	Al, Au	4 drôty/s

## 3 Popis materiálov pre kontaktovanie

### Hliník

Hliník sa najčastejšie používa pri kontaktovaní pomocou ultrazvuku. Malé priemery hliníkových drôtov obsahujú 1% kremíku alebo horčíku pre zvýšenie pevnosti (čistý hliník je príliš mäkký pre ťaženie tenkých drôtov). Vzhľadom na lepšiu rozpustnosť horčíku v hliníku je zliatina Al-Mg kvalitnejšia. Táto vlastnosť sa prejaví až pri zvýšenom namáhaní alebo vyššej teplote pôsobiacich na zliatinu.[1] [2][6]

### Meď

Meď je preferovaným materiálom pre vytváranie prepojení pre technológiu wire bonding. Môže sa používať aj pri menších priemeroch drôtu pričom má podobné výkonové vlastnosti ako zlato. Tento materiál je však nutné kontaktovať v ochrannej atmosfére (95% dusíku, 5% vodíku) vzhľadom na jeho oxidačné vlastnosti, pričom je nutné zároveň dbať aj na podmienky v ktorých sa medený drôt skladuje. Špeciálne ochranné balenie je nutné, zároveň sa však odporúča používať meď s povrchovou úpravou. Bežne používaný materiál pre povrchovú úpravu medi je paládium. Paládium je odolné voči korózii, zvyšuje však cenu drôtu. Nie však natoľko aby sa vyrovnala zlato. Meď sa vyznačuje vyššou tvrdosťou ako hliník a teda je treba pri kontaktovaní použiť viac tlakovej energie čo môže mať za následok poškodenie kontaktu, polovodiča pod kontaktom alebo nosného substrátu.[1] [2][6]

### Zlato

Zlato sa používa najčastejšie pri termokompresnom alebo termosonickom kontaktovaní. Čisté zlato sa úmyselne znečisťuje beríliom alebo meďou kvôli zvýšeniu pevnosti drôtu. Tejto zvýšenej pevnosti sa využíva najmä pri termokompresnom kontaktovaní kde sú vytvárané spoje automatom pri vysokej rýchlosti a teda je aj zvýšené namáhanie drôtu.[1] [2][6]

### Striebro

Strieborný drôt má výborné elektrické vlastnosti a vysokú tepelnú vodivosť. Používa sa predovšetkým ako náhrada za drôty zo zlata kvôli nižšej cene. Vzhľadom na tvrdosť má nižší vplyv na mechanické poruchy polovodičového skla spôsobené tlakovou silou bondovacieho nástroja ako meď. Drôt z čistého striebra má nižšiu odolnosť proti oxidácii. Pre zlepšenie tohto parametra sa do striebra pridáva zlato a paládium. [1] [2][6]

**Tab. 3** Fyzikálne vlastnosti čistých materiálov

Materiál	Al	Cu	Au	Ag
Hustota (g/cm <sup>3</sup> )	2,7	9,0	19,3	10,5
Teplota topenia ( °C)	660,3	1084,6	1064,2	961,8
Merný elektrický odpor (nΩ/m)	28,2	16,8	22,1	15,9
Tepelná vodivosť (W*m <sup>-1</sup> *K <sup>-1</sup> )	237,0	401,0	318,0	429,0
Tepelná rozťažnosť (μm/(m·K))	23,1	16,5	14,2	18,9
Tvrdosť podľa Vickersa (MPa)	350,0	369,0	216,0	251,0

**Tab. 4** Porovnanie parametrov drôtov rôznych materiálov [4][8]

Materiál	Al	Cu	Au	Ag
Cena	nízka	nízka	vysoká	stredná
Merný elektrický odpor v závislosti na zložení zliatiny (uΩ/m)	2,7 - 3,3	1,7 - 2,0	2,2 - 3,1	2,6 - 9,1
Riziko poškodenia čipu	stredné	vyššie	nízke	nízke
Ochranná atmosféra	-	N <sub>2</sub> -H <sub>2</sub>	-	N <sub>2</sub>
Tvrdosť FAB	-	vyššia	nižšia	nižšia

# 4 Priemyselné štandardy

## 4.1 Rizikové faktory pre kontakty realizované zliatinami striebra

Pri zmene výrobnnej technológie je jasné, že môže dôjsť ku zmene určitých rizikových vlastností, prípadne k náchylnosti na iné typy porúch.

### Spôsob realizácie kontaktu

Pri zmene materiálu drôtu je potrebné prehodnotiť a upraviť spôsob realizácie kontaktu. Konkrétne veľkosť a typ energie akým bude kontakt realizovaný. Tvrdší materiál potrebuje viac energie preto, aby mohol vzniknúť spoj s dostatočnou pevnosťou. Tvrdší materiál kontaktovaný s väčšou silou môže na čipe spôsobiť poškodenie kráterom. Toto riziko môže byť zmenšené zmenou materiálu kontaktnej plochy, alebo zmenou jej hrúbky.

### Prudké zmeny teplôt

Problémy, ktoré prinášajú prudké zmeny teplôt súvisia s tepelnou rozťažnosťou materiálu. Čím je vyššia tepelná rozťažnosť, tým logicky dochádza k väčšej zmene rozmerov prepoja vplyvom zmeny teploty. Čím je väčšia a prudšia zmena týchto rozmerov, tým dochádza k väčšiemu namáhaniu materiálu a môže časom dôjsť k rýchlejšiemu poškodeniu vplyvom zmien teploty. Aby bolo možné posúdiť tento faktor bolo by nutné poznať presné zloženie zliatiny drôtu, prípadne poznať priamo jeho tepelnú rozťažnosť a daný parameter porovnať.

### Mechanické vlastnosti

Zmeny mechanických vlastností materiálov sa za bežných podmienok pravdepodobne nijako výrazne neprejavajú. V prípade že je daná súčiastka vystavená extrémnym podmienkam ako vibrácie vysokých frekvencií, alebo vysoké preťaženie môže vplyvom opakovania týchto javov dôjsť k únave materiálu a zhoršeniu elektrických vlastností. V horšom prípade dôjde k prerušeniu elektrického spoja, prípadne vytvoreniu skratov vnútri puzdra a tým nastane zlyhanie funkčnosti celého zariadenia.

### Vlhkosť a vznik korózie

V prípade, že sú kontakty dostatočne chránené pred vonkajšími vplyvmi hermetickým puzdrom je jedinou možnosťou vzniku korózie samotné kontaktovanie. Kontaktovanie menej chemicky odolných materiálov ako je napríklad aj striebro (v porovnaní so zlatom) vyžaduje realizáciu spojov v dusíkovej atmosfére. V prípade že kontakty nie sú chránené hermetickým puzdrom treba rátať s prenikaním vlhkosti do puzdra a so vznikom korózie pri materiáloch, ktoré nie sú dostatočne odolné. V tomto



ohľade je striebro menej odolné ako zlato, alebo povrchovo upravená meď pomocou paládia.

### **Elektrické vlastnosti**

Keďže technológia wire bonding slúži v prvom rade pre vytváranie elektrických spojov, tak sú elektrické vlastnosti tie najpodstatnejšie z hľadiska samotnej funkčnosti. Pri zmene materiálu zo zlata na striebro je nutné rátať s tým, že dôjde ku zvýšeniu hodnoty mernej vodivosti spoja. Pridaním vhodných prímiesí do striebra je možné tento odpor znížiť až ku hodnotám odporu podobných zlata, nie však až natoľko, aby bol tento odpor nižší ako u zlata.

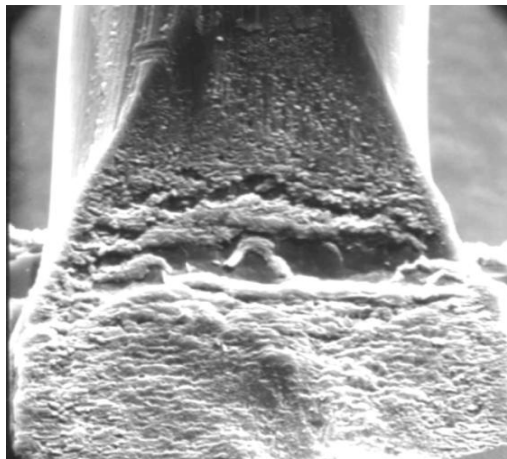
## **4.2 Typické poruchy bondov**

### **Vznik kráterov**

Vznik kráterov sa radí medzi poruchy, ktoré sú spôsobené mechanickou silou avšak sa prejavuje zhoršenými elektrickými vlastnosťami pod miestom spoja. Vznik kráteru závisí na použitej technológii kontaktovania (viz obr. 6). Najčastejšie k nemu môže dôjsť pri ultrazvukovom kontaktovaní kedy nastáva poškodenie vrstiev pod kontaktnou ploškou (polovodičové sklo). Veľkosť resp. vznik kráteru je možné ovplyvniť použitými materiálmi. Platí, že čím je tvrdší materiál drôtu alebo mäkkší materiál kontaktovacej plošky, tým je spoj náchylnejší na vznik kráterov.[3]

### **Praskliny spojov**

Praskliny vznikajú najčastejšie u spojov realizovaných pomocou ultrazvukového kontaktovania (viz obr. 7). Objavujú sa v mieste pätky spoja vplyvom vibrácií kontaktovacieho klinu (vpred a vzad v ose drôtu). Počas pohybu klinu pri vytváraní slučky môže dôjsť k ďalšiemu vytvoreniu prasklín alebo trhlín kedy nástroj vzostupuje a presúva sa ku druhému bondu nevhodným spôsobom. Ich vznik je možné obmedziť správnym smerom ťažnej sily.[3]



**Obr. 7 Trhlina spoja [1]**

### **4.3 Typické poruchy spoľahlivosti**

#### **Korózia**

Korózia kontaktných plôch alebo drôtu môže v konečnom dôsledku spôsobiť prerušenie na oboch koncoch prepoja, čím môže vo vnútri puzdra nastať vytvorenie nežiaducich skratov a tým strata správnej funkčnosti celého obvodu. Ak by aj neprišlo k prerušeniu prepojenia rastúca korózia zvyšuje elektrický odpor kontaktu a môže viesť ku znefunkčneniu zariadenia alebo ku zhoršeniu jeho vlastností. Korózia sa môže vyskytnúť vplyvom vlhkosti alebo kontaminujúcich látok. Príkladom môže byť prítomnosť chlóru alebo brómu.[3]

#### **Intermetalické zliatiny**

Intermetalická zliatina je zliatina viacerých metalických elementov. Vzniká difúziou, kedy atómy jednej látky prenikajú do štruktúry inej látky. Reakcia je závislá na teplote a čase, pričom má vplyv na mechanické a elektrické vlastnosti spoja. Táto zliatina je dôvodom, prečo spoj vlastne drží. Jej dôsledkom je to, že spoj je mechanicky pevný no zvyšuje sa jeho elektrický odpor. Tieto zliatiny môžu vzniknúť už pri izbovej teplote, napriek tomu, že v vytvorení pevného spojenia potrebujú vyššie teploty alebo dlhý čas. Pri vysokých teplotách môže nastať tepelné namáhanie v dôsledku rozdielnej tepelnej rozťažnosti kovov, čo vedie k vytváraniu mikroprasklín. V praxi však nastane len veľmi zriedka situácia zlyhania spoja v dôsledku formovania intermetalickej zliatiny. [3]

#### **Migrácia kovu**

Ide o elektrolytický proces, kedy ióny kovov prechádzajú z anódy na katódu v závislosti na možnostiach kovu, prítomnosti kondenzovanej vody, iontových zložiek a na existencii napät'ových potenciálov. Na tento proces je najviac náchylné striebro. V závislosti na podmienkach môže tento proces vyskytnúť aj u iných kovov (Pb, Sn, Ni, Au, Cu). Tento úkaz sa môže prejaviť a spôsobiť zlyhanie zariadenia až po veľmi dlhom čase.[3]

#### **Opotrebovanie vibráciami**

Vibračné sily pri bežnej prevádzke nie sú obyčajne dostatočne silné, aby spôsobili poškodenie spoja. Frekvencia ktorá môže vyvolať rezonanciu a tým aj poškodenie spojov je približne 3-5 kHz pre zlaté drôty a okolo 10 kHz pre drôty z hliníku. Zlyhanie spoja v dôsledku vibrácií môže nastať v priebehu procesu ultrazvukového čistenie. Mali by sa preto používať zariadenia, ktoré pracujú pri frekvenciách v rozmedzí 20 až 100 kHz.[3]

## 4.4 Hodnotenie kvality spoja

Hodnotenie kvality spojov a spoľahlivosť zariadení sa realizuje pomocou definovaných testov. Presný popis a priebeh týchto testov je možné získať zo stanovených noriem a štandardov pre elektronické prípadne mikroelektronické zariadenia a obvody. Podľa náročnosti týchto testov a záťaže kladené na obvody, môžeme tieto štandardy rozčleniť na štandardy používané v bežnom, prípadne vojenskom odvetví. Z voľne dostupných štandardov boli v tejto práci použité nasledovné:

- 1) MIL-STD 883 (americký vojenský štandard, stanovuje jednotné postupy pre testovanie mikroelektronických zariadení)
- 2) JESD22 (bežne používaný priemyselný štandard organizácie JEDEC)

## 4.5 Vizuálna kontrola

Overenie kvality pomocou vizuálnej inšpekcie je absolútne základný možný test. Na túto inšpekciu je potrebné použiť zariadenie, ktoré dokáže zobrazit' a zaznamenať objekty veľkosti rádovo v mikrometroch. Je možné použiť optický mikroskop, kde sa však vplyvom odrazivosti materiálu môže znížiť kvalita rozlíšiteľnosť snímok. Vhodnejšie zariadenie je elektrónový rastrovací mikroskop, ktorého obstaranie je finančne ďaleko náročnejšie. Problematikou vizuálnej kontroly sa zaoberá mimo iných aj americký vojenský štandard MIL-STD 883: M2010, M2017.[11]

Metódy 2010 a 2017 sa zaoberajú kontrolou geometrie, deformácie a rozmerov. Pri tejto kontrole sa konkrétne preskúmajú nasledovné detaily:

- 1) geometria bondov
- 2) geometria sľučiek
- 3) deformácia drôtu
- 4) poloha a rozloha bondov
- 5) príľnavosť pokovenia
- 6) skraty
- 7) chýbajúce bondy alebo spoje

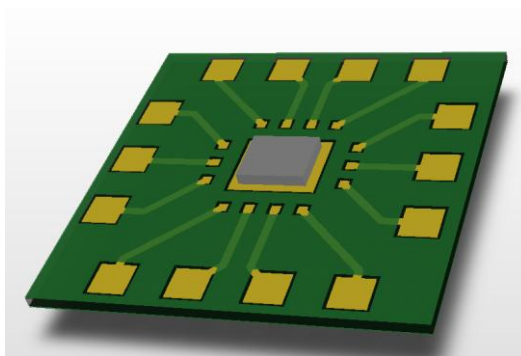
# 5 Popis testovacích metód a návrh parametrov testovania

Základným a jediným spôsobom ako overiť správnu činnosť zariadenia je jeho testovanie. Ak chceme posúdiť spoľahlivú činnosť zariadenia je nutné ho testovať po všetkých stránkach, či už sa jedná o posúdenie správneho technologického postupu pri výrobe alebo overenie elektrických resp. funkčných vlastností. Pri zmene samotnej výrobnéj technológie vzniká otázka akým spôsobom by sa zmena mohla prejaviť na fungovaní a spoľahlivosti výslednej aplikácie. Vďaka testovaniu je nie len možné stanoviť kvalitu a spoľahlivosť strieborných kontaktov, ale ich aj porovnať s kontaktmi realizovanými inými materiálmi.

Rozsah takejto kontroly je možné realizovať od úrovne samotnej technológie cez zapuzdrené komponenty až po hotovú dosku plošných spojov. V tejto práci sa bude ďalej pojednávať o prvej spomenutej.

## 5.1 Testovanie kontaktovania

Pre účely tohto testu je potrebné navrhnuť vyrobiť testovací prípravok, na ktorom je možné realizovať kontaktovanie. Kontaktovanie bude slúžiť pre vytvorenie spoja medzi polovodičovým čipom definovaných rozmerov a substrátom na ktorom bude čip umiestnený. Čip musí byť so substrátom pevne spojený buď pomocou eutektickej zliatiny (Au-Si, Au-Sn), alebo pomocou adhezíva (epoxidové lepidlo). V tomto prípade bude postačujúce nevodivé spojenie. Ako substrát je možné použiť bežnú dosku plošných spojov (viz obr. 8) alebo keramický substrát ( $Al_2O_3$ ). Pri DPS je potrebné klásť dôraz na to, aby boli kontaktné plochy vhodne povrchovo upravené. Pri keramických substrátoch je možné adhezívny materiál a materiál pre kontaktovacie plošky naniesť pomocou vákuového naprášenia pre výrobu tenkých vrstiev, ale aj vytvorením vodivého motívu pomocou technológie hrubých vrstiev s využitím vhodnej pasty (Ag-Pd). Pre kontaktovanie bude použité zlato a striebro o vysokej čistote 99,99 priemeru 25,4  $\mu m$ . Kontaktovanie bude realizované ultrazvukom.



Obr. 8 Návrh testovacej DPS v 3D

**Tab. 5** Návrh testov pre technológiu kontaktovania

	Názov testu	Štandard	Podmienky	Množstvo vzoriek	Výsledok
Odporúčané	HTSL (High temperature storage life)	JESD22-A103C	podm. B 150 °C, 1000 h		
	TC (Temperature cycling)	JESD22-A104, MIL- STD883_1010.7	podm. N -40 – +85 °C, 500 cyklov		
	BPS (Bond pull strength)	MIL- STD_883_M2011	podm. D wire pull		
	BS (Bond shear)	JESD22-B116	pre priemer 25 µm záťaž približne 2g		
Zvažované	VVF (Vibration variable frequency)	JESD22- B103_2007	podm. B 10- 1000Hz, 10 G		
	UHAST (Unbiased HAST)	JESD22-A118	podm. A 130 °C, 85% vlh., 96 h		
	MS (Mechanical shock)	JESD22-B104, MIL-STD M2002	podm. C 100 G, dĺžka pulzu 0,3 ms		

### **HTSL(High temperature storage life)**

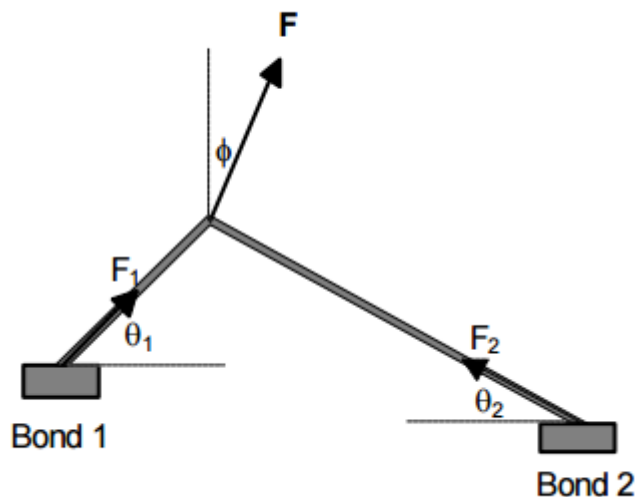
Tento test sa používa pre monitorovanie, hodnotenie a kvalifikáciu testovaného objektu. Je určený pre zistenie efektu účinku času a teploty pri skladovaní. Ide o zrýchlený typ testu a prebieha bez pripojenia testovaného zariadenia na elektrické napätie. Pre skúšku je potrebné zvoliť vhodné podmienky, pretože môže dôjsť k presiahnutiu schopností použitých materiálov a k následnej poruche. Meranie vlastností zariadenia by mali byť dokončené do 96 hodín po vyňatí zariadenia z testovacích podmienok.[10]

### **TC(Temperature cycling)**

Pre realizáciu tohto testu sa využívajú komory pre cyklovanie teploty. Vykonáva sa kvôli zisteniu odolnosti zariadení proti mechanickému namáhaniu, ktoré vzniká pri striedaní vysokých a nízkych teplôt, prípadne pre odhalenie trvalých fyzikálnych zmien v materiáloch.[9]

### **BPS (Bond pull strength)**

Ide o test, v ktorom je prioritou určenie pevnosti spoja pomocou zaháknutia drôtu a ťaženia spoja kým nedôjde k dosiahnutiu definovanej sily alebo prerušeniu drôtu. Pri teste pôsobí nástroj v tvare háku smerom nahor (viz obr. 9). Účelom je preskúmanie sily spoja a posúdenie správneho nastavenia parametrov kontaktovacieho prístroja. Zároveň slúži pre odhalenie skrytých porúch, ktoré je možné detegovať len deštruktívnym testom. Pri teste môže dôjsť k poruche na strane oboch kontaktov či ide o prerušenie drôtu alebo oddelenie celého bondu.[11]



Obr. 9 Zobrazenie pôsobiacich síl pri teste Bond pull[11]

### **BS (Bond shear)**

Tento test určuje pevnosť medzi kontaktnou plochou a samotným kontaktom. Test sa vykonáva pre zapuzdrením komponenty kvôli zisteniu celistvosti metalurgických väzieb. Test zahŕňa kontrolu ako guľôčkových, tak aj klinových spojov. Test je deštruktívny, užíva sa pri vývoji a optimalizácii výrobných procesov.[12]

### **VVF(Vibration variable frequency)**

Test je určený pre posúdenie schopnosti súčiastok odolávať vibráciám v dôsledku pohybu napr. v doprave. Vibrácie môžu spôsobiť zmenu prevádzkových vlastností, v horšom prípade únavu materiálu a prerušenie spojov. Testovaný objekt je pevne spojený s podstavcom zariadenia, ktoré generuje vibrácie v stanovenom rozsahu po stanovený čas.[13]

### **UHAST(Unbiased HAST)**

Slúži pre hodnotenie spoľahlivosti zariadení vo vlhkom prostredí. Jedná sa o vysokozrýchlený test, ktorý využíva nielen vlhkosť ale aj zvýšenú teplotu. Test sa

zväčša používa na zistenie porúch v obale a ich vplyv na obsah puzdra. Najčastejšou poruchou, ktorá sa môže prejaviť pri tomto deštruktívnom teste je vznik korózie. Pri teste sa využíva klimatická komora nastavená na stabilnú teplotu (zvyčajne aspoň 100°C) s vlhkosťou 85 % a vyššou.[14]

### MS(Mechanical shock)

Skúšobná metóda mechanického šoku je určená pre zariadenia u ktorých sa očakáva vysoká spoľahlivosť v podmienkach, kde dochádza k pôsobeniu nárazov prípadne vysokému preťaženiu a ich opakovaní. Šok sa realizuje špecializovanou aparátúrou na robustnom podstavci uspôsobenom tak aby pri testovaní nedochádzalo k spätným nárazom. Preťaženie testovaného objektu je možné realizovať až do hodnoty takmer 3000 G.[11]

## 5.2 Testovanie zapuzdrených komponentov

Podobne ako pri predchádzajúcej sérii testov bude využitý testovací prípravok. Rozdiel je v tom, že ho nie je potrebné použiť pri nasledujúcich testovacích procedúrach, ale až pri následnom overovaní funkčnosti. Možnosť osadenia komponenty na prípravok pred klimatickými testami však vylúčená nie je. Navrhnutý prípravok bude realizovaný na doske plošných spojov s použitím základného materiálu FR4. Materiál vytvorených vodivých ciest je med' s vhodnou povrchovou úpravou pre povrchovú montáž danej komponenty. Nakoľko môže byť testovanie hotových súčiastok náročné časovo, je potrebné vybrať určitý komponent a zamerať sa na konkrétnu vlastnosť. Testovanie zložitých obvodov nie je z hľadiska rozsahu tejto práce možné, preto v prípade realizácie takéhoto testovania bude zameranie na jednoduché, výkonové resp. zosilňovacie komponenty, prípadne komponenty slúžiace ako stabilizátory a časovače.

**Tab. 6** Návrh testov pre zapuzdrené komponenty

	Názov testu	Štandard	Podmienky	Množstvo vzoriek	Výsledok
Odporúčané	HTSL (High temperature storage life)	JESD22-A103C	podm. B 150 °C, 1000 h		
	TC (Temperature cycling)	JESD22-A104, MIL-STD883_1010.7	podm. N -40 - +85 °C, 700 cyklov		
	UHASt (Unbiased HAST)	JESD22-A118	podm. A 130 °C, 85% vlh., 96 h		





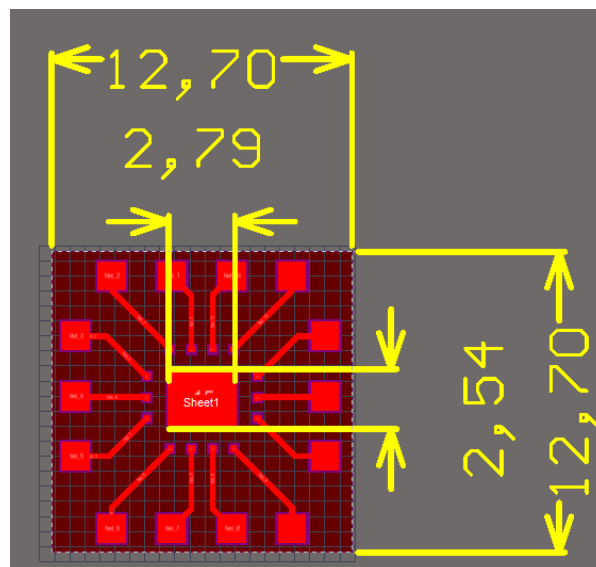
# 6 Praktická realizácia

## 6.1 Kontaktovanie polovodičových čipov a testovanie

### Prípravná fáza

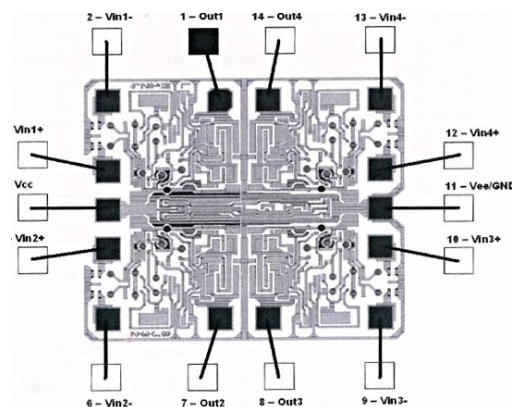
Ako prvé v tejto fáze bolo nutné navrhnuť vhodný prípravok v závislosti na tom čo a ako chceme kontaktovať.

Na nižšie zobrazenom obrázku (obr.10) je možné vidieť návrh testovacieho prípravku, ktorý bol navrhnutý pre podkladový materiál FR4 bežne používaný pre dosky plošných spojov. Jeho celkové rozmery sú 12,7x12,7 mm. Plôšky pre kontaktovanie budú povrchovo upravené zlatom a majú veľkosť 2x2 mm. Testovacie plôšky na okraji dosky sú spojené s kontaktnými plôškami a majú rozmer 0,3x0,3 mm.



Obr. 10 Rozmery prípravku pre kontaktovanie

Prípravok bol navrhnutý pre polovodičový čip LM124 (viz obr. 11) o rozmeroch 1,85x1,4 mm, ktorý má funkciu dvojitého zosilňovača.



Obr. 11 Layout čipu LM124

Obe tieto súčasti je nutné navzájom pevne prepojiť buď pomocou eutektickej zliatiny, pájky alebo špeciálneho lepidla. V tomto prípade bolo použité vodivé lepidlo EPOTEK H31D so strieborným plnivom. Jeho zatuhnutie bolo dosiahnuté pri sušení v peci pri teplote 150 °C po dobu jednej hodiny. Užitie vodivého lepidla však nie je nutné, nakoľko stredová plocha na ktorej je čip umiestnený, nie je nikam ďalej prepojená ani nemá žiadnu ďalšiu funkciu. Po dokončení lepenia je doska pripravená na kontaktovanie. Keďže kontaktovať sa nemusí z kapacitných dôvodov okamžite, bol prípravok umiestnený do „Dry boxu“, ktorý udržiava minimálnu možnú vlhkosť aby nedochádzalo k nežiaducemu starnutiu materiálu.

## Kontaktovanie

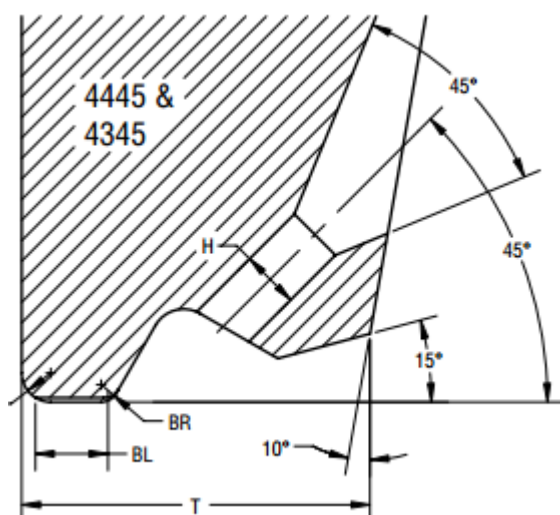
Pred začatím samotného kontaktovania je potrebné zvoliť vhodné zariadenie a metódy a postup kontaktovania. V tomto prípade bolo kontaktovanie realizované prístrojom HB16 (viz obr. 12), ktorý je možné použiť pre všetky metódy kontaktovania. Použitý bol klinový hrotom 4445-2020-3/4-CGF-TIC vhodný pre kontaktovanie striebrom aj zlatom pomocou ultrazvuku (viz obr. 13).



Obr. 12 Kontaktovacie zariadenie HB16

Ďalším úkonom je zabudovanie požadovaného drôtu do zariadenia a nastavenie parametrov kontaktovania. Týmito parametrami sa rozumejú konkrétne hodnoty vzdialeností pre tvar slučky, poloha nástroja nad čipom a substrátom, ďalej hodnoty pre prítláčnú silu, ultrazvukovú energiu a čas jej pôsobenia pre oba bondy. Hodnoty boli navolené takým spôsobom aby boli vhodné pre kontaktovanie striebrom aj zlatom.

Vzhľadom na tvar a rozloženie kontaktovacích plôch na čipe a substráte dochádza k situácii, že spoje situované v rohoch sú dlhšie ako ostatné. Táto rozdielna dĺžka môže mať za následok zmenu tvaru celej slučky. Nakoľko táto zmena nie je vôbec kritická je možné pre všetky spoje ponechať jedno totožné nastavenie tvaru slučky.



Obr. 13 Použitý hrot [15]

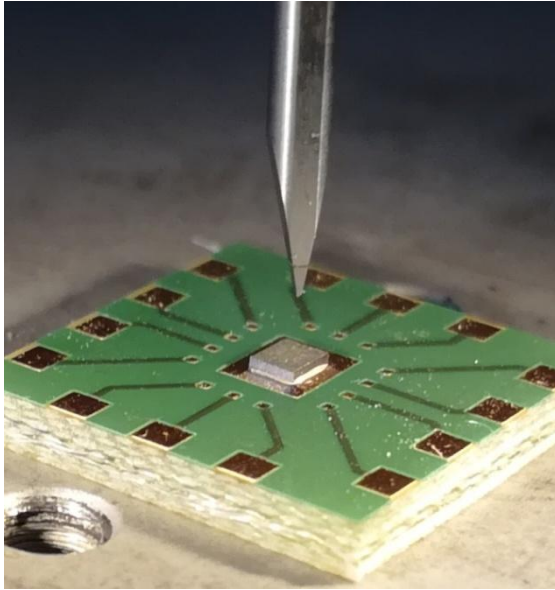
Po pripravení zariadenia nasleduje kontaktovanie. Prípravok s čipom je umiestnený na pohyblivú a v prípade potreby aj vyhrievanú podložku. Jej pohyb je ovládaný joystickom vľavo od podložky. Po umiestnení prípravku na podložku je zapnuté uchytie pomocou vakuu, ktoré zabezpečuje stabilitu počas celého kontaktovania. Kontaktovanie v tomto prípade prebehlo v poloautomatickom režime t.z. že napohovanie hrotu nad miesto prvého bondu prebehlo ručne, ale po aktivovaní bondovacej sekvencie prístroj sám vykoná úkony pre vytvorenie prvého bondu a natvarovanie slučky. Miesto pre druhý bond sa znovu dopohuje ručne. Po vytvorení druhého bondu sa svorky drôtu uzavru a po odtrhnutí je kontaktovací nástroj premiestnený späť nad čip. Kontaktovací postup sa takto opakuje.



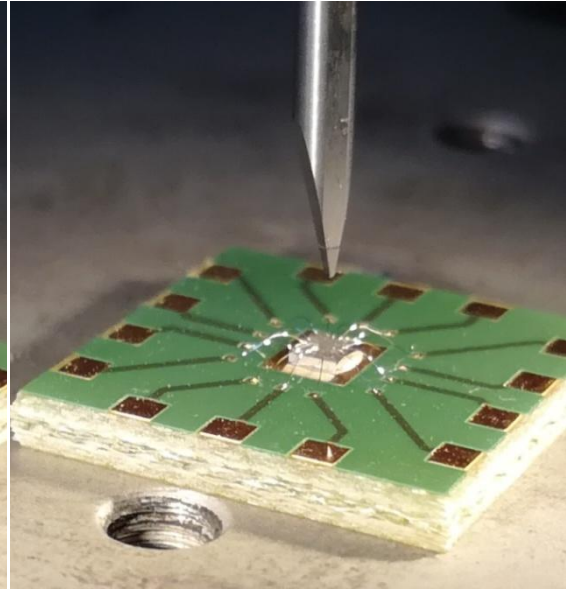
Obr. 14 Nastavenie síl pri kontaktovaní



Obr. 15 Nastavenie tvaru slučky



Obr. 16 Prípravok pred nakontaktovaním



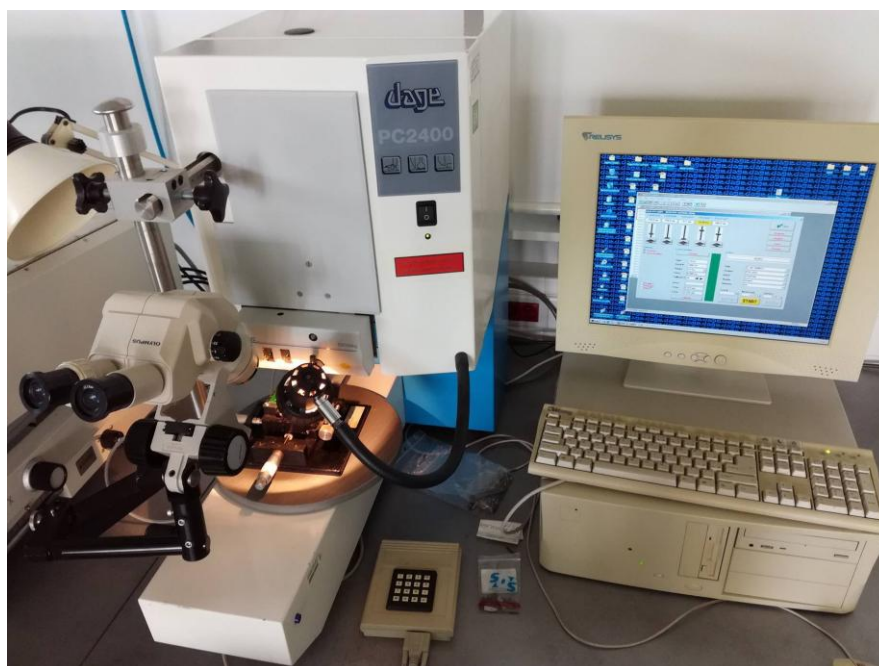
Obr. 17 Prípravok po nakontaktovaní

Po nakontaktovaní dostatočného množstva vzoriek striebrom aj zlatom je ďalšou fázou overovanie a porovnávanie ich vlastností.

### **PULL test**

Pull test je jeden z najpoužívanějších testov pre overenie kvality kontaktovania a optimalizáciu kontaktovacieho procesu. Tester pôsobí pomocou nástroja v tvare háčiku smerom nahor. Existuje deštruktívna a nedeštruktívna varianta. Pri nedeštruktívnej tester pôsobí do definovanej hodnoty sily, ktorú overujeme. Po vykonaní skúšky je spoj ohodnotený vyhovel alebo nevyhovel. Pri deštruktívnej variante je opäť nastavený určitý rozsah pôsobenia sily, avšak test prepojenia pokračuje až pokým nedôjde k jeho prerušeniu, pričom sa maximálna sila ťaženia zaznamená.

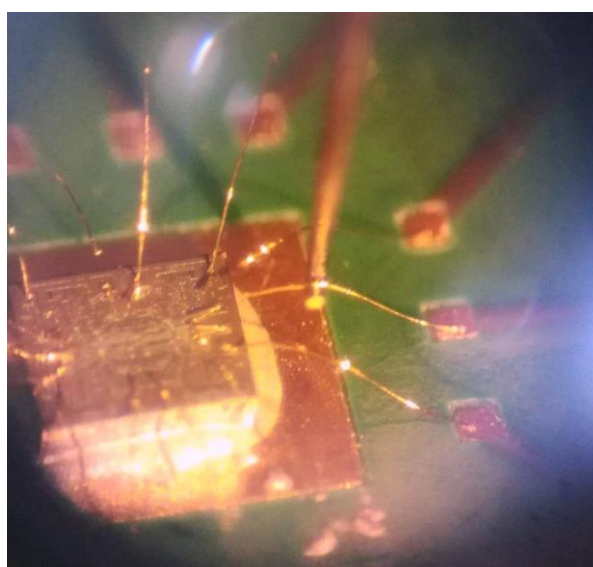
Nami realizovaný test bol deštruktívny. Pre jeho vykonanie bolo využité zariadenie DAGE PC2400 (viz obr. 18), ktoré slúži aj pre testy shear. Keďže predmetom tohto testu boli drôty relatívne malého priemeru bol použitý pracovný rozsah ťažnej sily 0 – 20 gramov. Prípravky pre test sa umiestňujú na pohyblivú podložku. Napolohovanie trhacieho nástroja je úplne manuálne ale po aktivovaní spúšťacieho tlačidla zariadenie samé vykoná a vyhodnotí test (viz obr. 19).



**Obr. 18 Tester DAGE PC2400**

Test bol vykonaný pre strieborné aj zlaté drôty, pri očakávanom minimálnom zaťažení 2,5 gramu na každý prepoj v deštruktívnej variante. Hodnota je definovaná pre zlaté drôty priemeru 25,4  $\mu\text{m}$  v americkej vojenskej norme STD-883, ktorá je bežne využívaná pre tento test. Keďže oba použité drôty majú tento priemer je možné hodnotu použiť pre vyhodnocovanie testu.

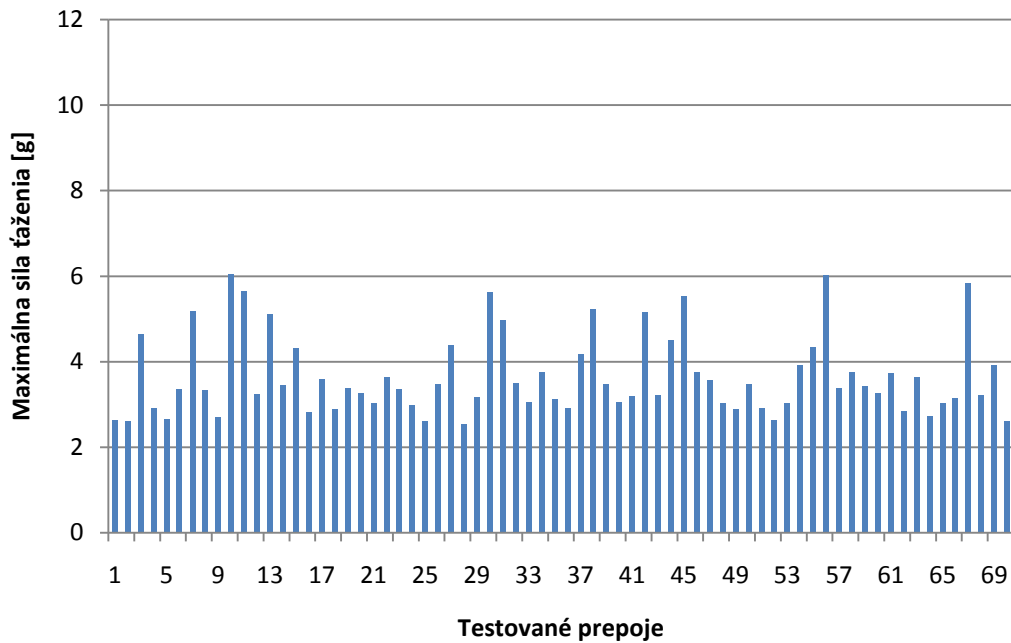
Odkúšaných bolo 5 prípravkov a teda 70 prepojov pre každý použitý materiál.



**Obr. 19 Ukážka PULL testu**



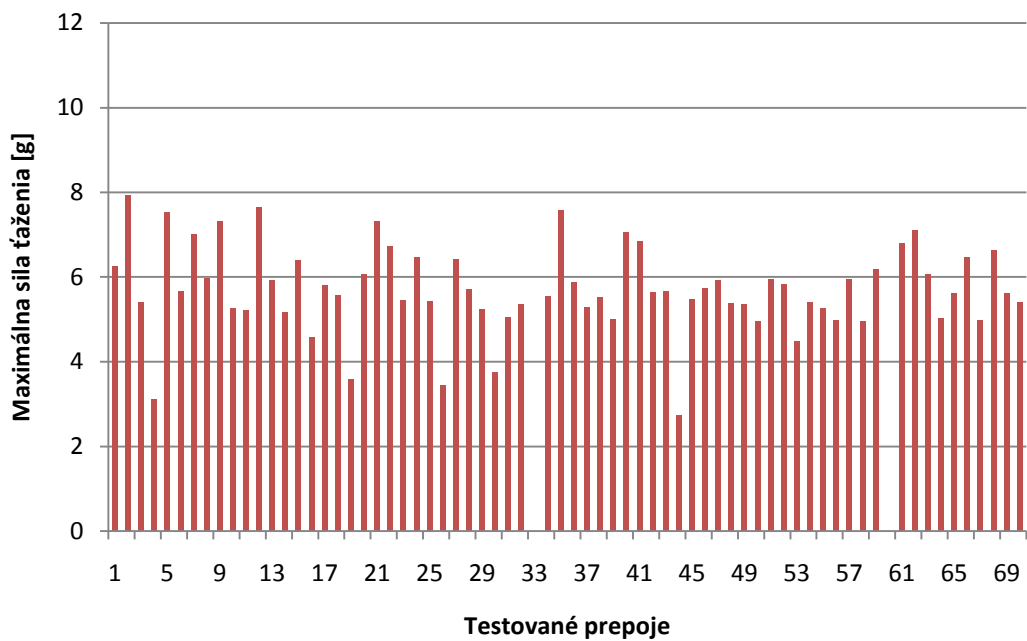
## Výsledky PULL testu pre strieborné drôty



Graf 1 Výsledky PULL testu pre strieborné drôty

Minimálne hodnoty ťažnej sily sa pohybovali zhruba v rozmedzí 2,54-3,00 g. Maximálne hodnoty potom na úrovni 5,50-6,06 g. V priemere boli hodnoty zaznamenávané na úrovni 3,65 g.

## Výsledky PULL testu pre zlaté drôty



Graf 2 Výsledky PULL testu pre zlaté drôty

Minimálne hodnoty ťažnej sily sa pohybovali zhruba v rozmedzí 3,00-4,50 g. Maximálne hodnoty potom na úrovni 6,00-8,00 g. V priemere boli hodnoty zaznamenávané na úrovni 5,62 g. Z grafu 2 boli zámerne odobraté hodnoty 33 (10,939 g) a 60 (2,585 g). Maximálna hodnota je oproti ostatným výrazne vyššia a nie je vylúčená chyba prístroja, preto bola odobratá spolu s najmenšou nameranou kvôli korektnosti.

## **Porovnanie**

Zo zaznamenaných hodnôt vyplýva že strieborné drôty vykazovali v teste nižšiu pevnosť ako zlaté. V priemernej hodnote ťažnej sily sa materiály líšili o hodnotu 1,974 g. Naproti tomu u zlatých drôtov asi v 20 % testovaných spojov došlo prerušeniu spoja na čipe. Tento jav nie je bežný a svedčí o nevhodne nastavenej sile ultrazvuku na prvom bonde. Vyššia sila ultrazvuku vytvorí pevnejší spoj ale spôsobí že bude krehkejší. Použité sily pri kontaktovaní je však možné ďalej optimalizovať tak aby oba požitá materiály dosiahli lepšie priemerné výsledky, dokonca na úrovni maximálnych nameraných. Je nutné však konštatovať, že normu STD-883, ktorú sme použili pre vyhodnotenie zlaté drôty splnili. Definované hodnoty splnili aj strieborné drôty.

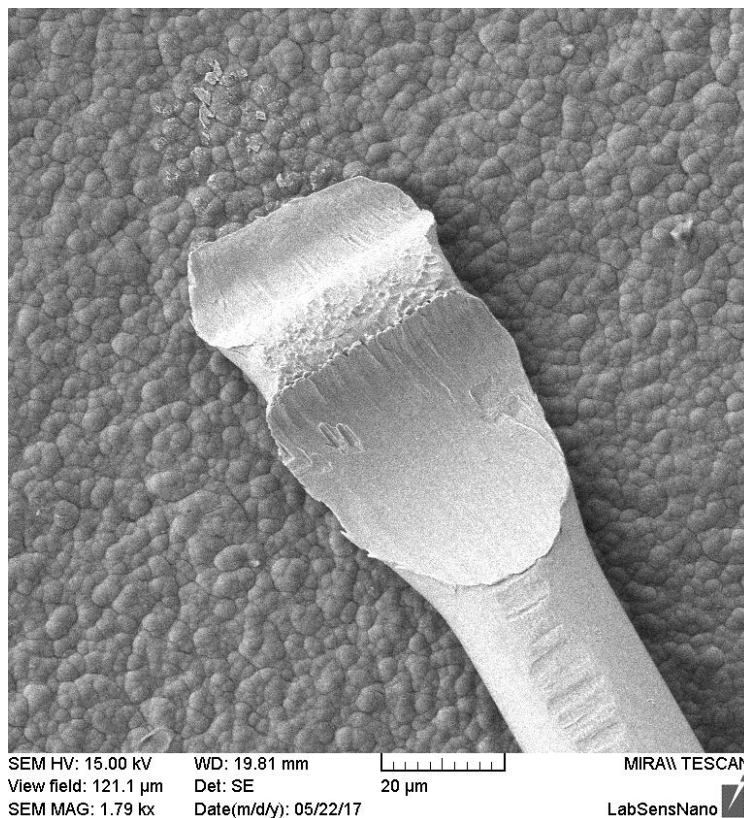
## **Skúšky vplyvu prostredia**

Táto skúška je obdobou testu UHAST spomenutého v kapitole 4.1. Testom sa má preskúmať a preukázať vplyv prostredia na testovaný objekt. V rámci našich možností bolo možné túto skúšku vykonať podľa normy ČSN EN 60068-2-67, konkrétne pomocou testu konštantným vlhkým teplom (nenasýtená para pod zvýšeným tlakom).

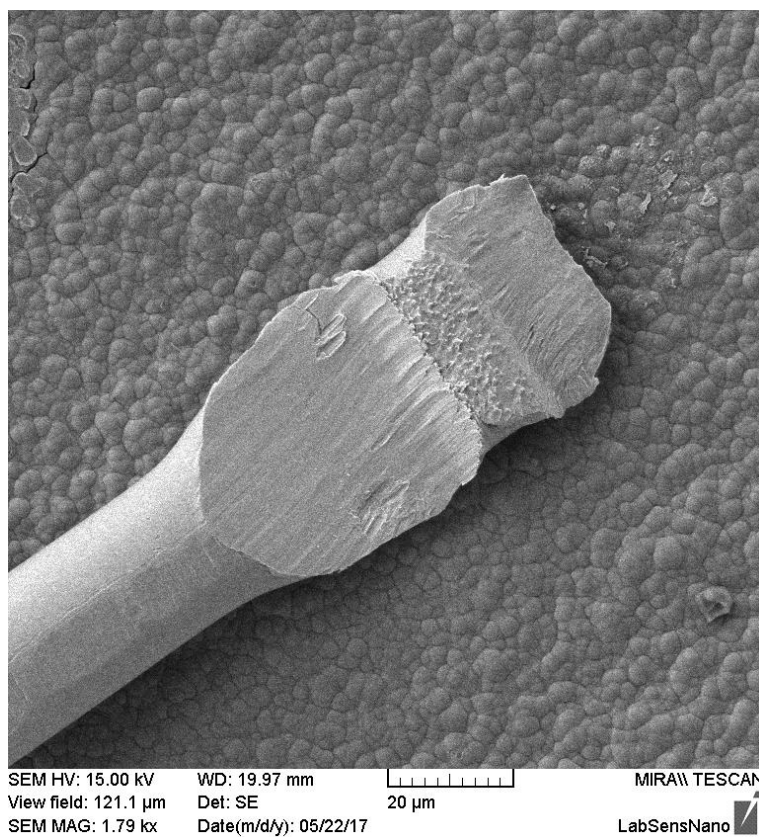
Pre túto skúšku boli vyčlenené vzorky čipov kontaktovaných zlatom aj striebrom spolu s už zapuzdrenými komponentmi kontaktovaných striebrom. Všetky testované objekty boli umiestnené do špeciálnej komory SDH01 v ktorej boli nastavené parametre teplota a relatívna vlhkosť (85°C, 85%) s predpokladaným tlakom 49,1 kPa. Uvedená norma definuje test pri dobe trvania 168 a 504 hodín. Nami realizovaný test trval 360 hodín.

Po skončení testu boli nakontaktované vzorky z komory vyňaté a preskúmané rastrovacím elektrónovým mikroskopom TESCAN MIRA2 po vizuálnej stránke.

Na preskúmaných bondoch (obr. 20-23) realizovaných striebrom aj zlatom, nie sú rozoznateľné žiadne vážne povrchové poruchy zapríčinené koróziou alebo nepriaznivými atmosferickými podmienkami. Je však samozrejme teoretický predpoklad, že pri horších podmienkach (vyššia teplota vlhkosť a dlhší čas) sa oxidácia začne prejavovať práve na strieborných bondoch. Najlepším spôsobom preskúmania oxidácie by bolo využitie detekčnej metódy, ktorá je k tomu určená. Tá však pre potreby tejto práce nie je dostupná.

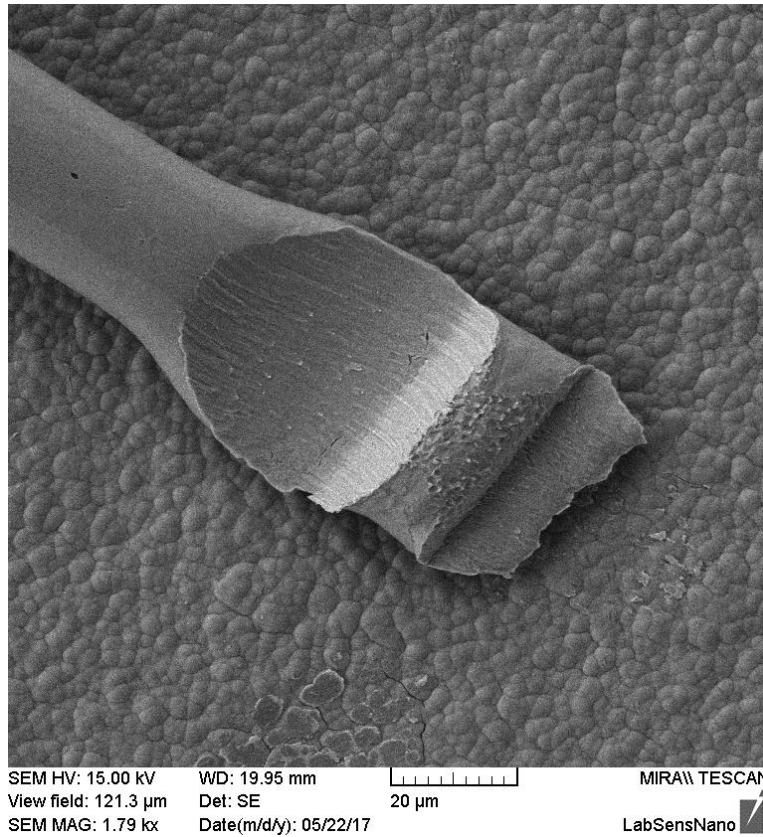


**Obr. 20 Detail druhého bondu zlata bez SVP**

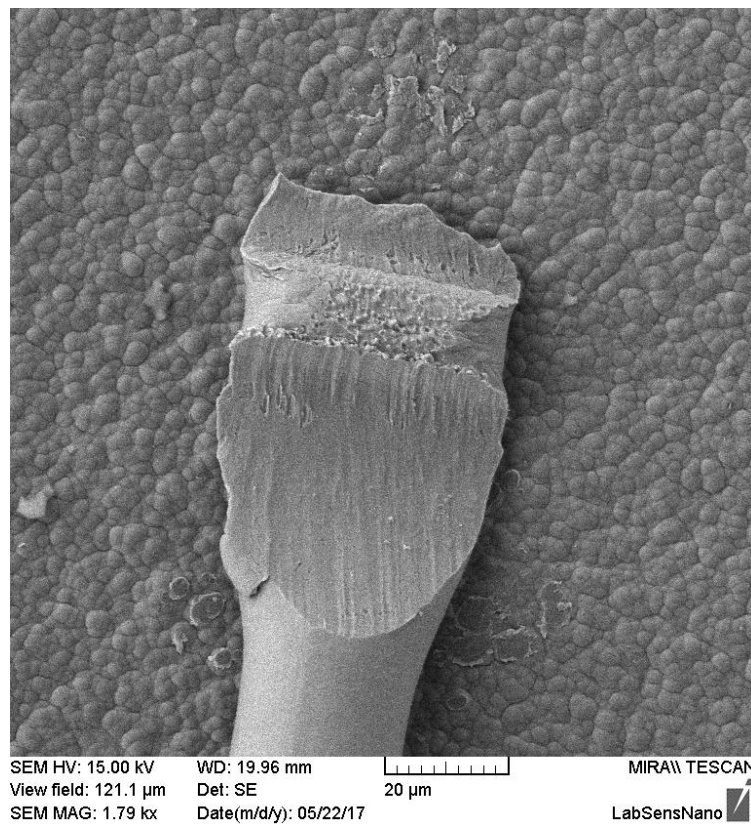


**Obr. 21 Detail druhého bondu zlata po SVP**





**Obr. 22 Detail druhého bondu striebra bez SVP**



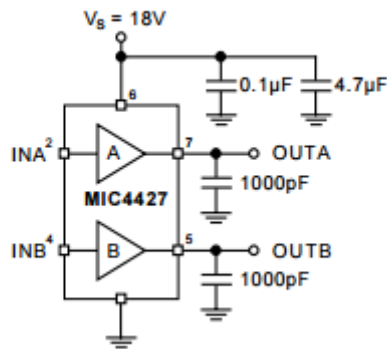
**Obr. 23 Detail druhého bondu striebra po SVP**

## 6.2 Testovanie zapuzdrených komponentov

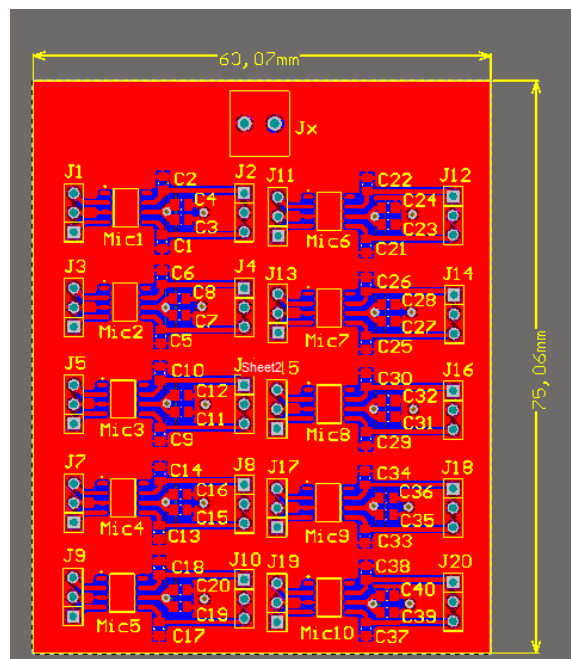
### Prípravná fáza

Pre overovanie vlastností hotových súčiastok je opäť vhodné navrhnuť a realizovať testovací prípravok na základe odporúčaní výrobcu. Vybraná súčiastka pre takéto testovanie zo spomenutých v kapitole 5.3 je MIC4427YM, ktorý vo všeobecnosti slúži ako driver pre výkonové súčiastky. Na návrh testovacej dosky bolo použité doporučené testovacie zapojenie z datasheetu (viz obr. 24).

Najvhodnejším spôsobom overenia a porovnania vlastností by bolo meranie spolu s pôvodnými súčiastkami kontaktovanými zlatom. Pôvodné súčiastky však už nie je možné získať, preto bolo vykonané meranie len na nových, kontaktovaných striebrom.



Obr. 24 Odporúčané zapojenie

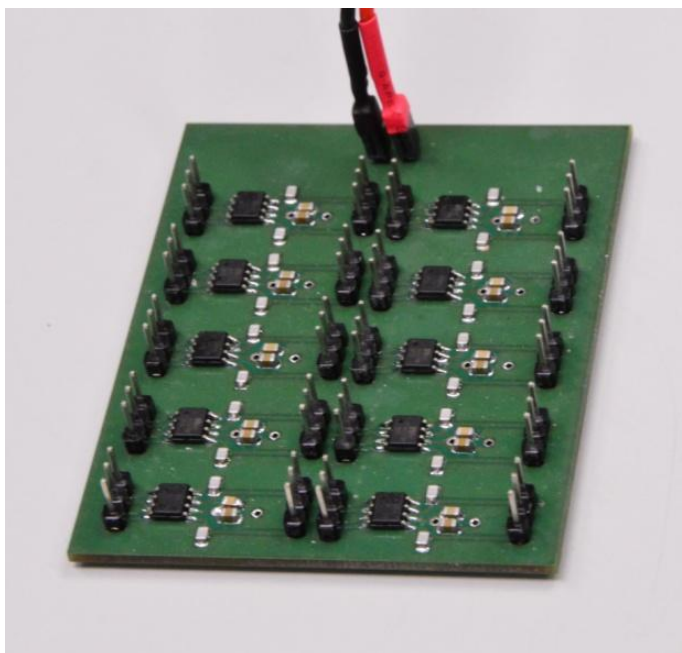


Obr. 25 Finálny návrh DPS pre súčiastky

Na obrázku vyššie (obr.25) je finálny návrh DPS pre 10 súčiastok MIC4427YM. Každá súčiastka má vlastné konektory pre vstup a výstup, pričom napájanie je spoločné.

Každý jeden obvod bude testovaný samostatne a po jednom, nie naraz. Nebude teda dochádzať k vzájomnému ovplyvňovaniu iným obvodom bez zapojenia ďalších blokovacích súčiastok.

Po vyrobení navrhnutých DPS nasleduje osadenie prvej z nich, na ktorej prebehne vzťažné meranie. Voči tomuto meraniu a jeho výsledkom budú vyhodnocované výsledky merania po záťažových testoch. Na dosku je najprv disperzerom aplikovaná pájkovacia pasta SAC305 určená pre bezolovnaté pájkovanie. Po jej aplikácii je DPS osadená všetkými SMD súčiastkami. Samotné pájkovanie prebieha pomocou pretavenia na tzv. Hot plate pri teplote 250°C. Hotová doska sa nechá vychladnúť tak aby s ňou bolo možné bez ujmy manipulovať a je dokončená osadením konektorov pre meranie a napájanie.



**Obr. 26** Hotová DPS s testovnými súčiastkami

## Meranie

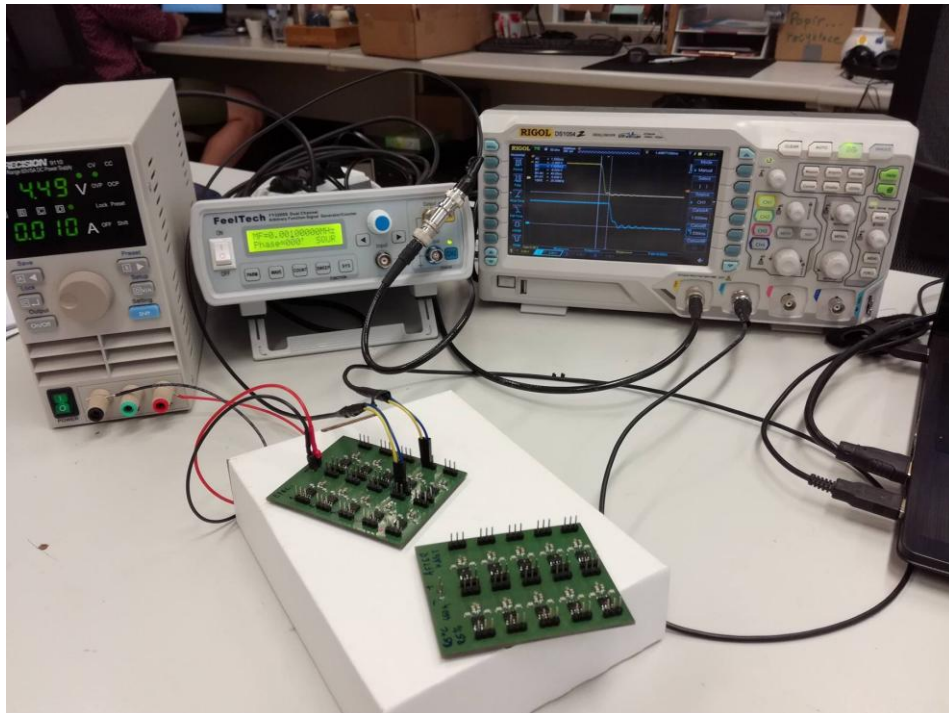
Každé meranie prebehlo na vyhradenom pracovisku (viz obr. 27) s rovnakými prístrojmi v rovnakom nastavení. Konkrétne ide o:

- Zdroj napätia BK precision 9110
- Osciloskop Rigol DS1054
- Generátor FeelTech FY3200S

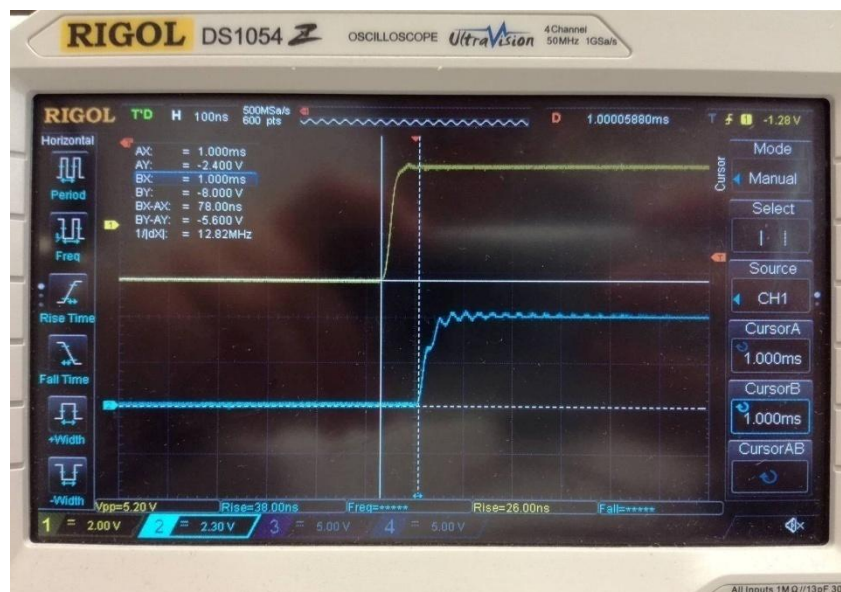
Tieto zariadenia boli pripojené k prípravku. Signál z generátoru na jednotlivé vstupy a zároveň osciloskop. Výstupy z prípravku boli takisto pripojené k osciloskopu (viz obr. 28). Zdroj napätia slúžil výhradne na napájanie. Napájacie napätie bolo regulované v rozmedzí 4,5 až 18 V pri vstupnom obdĺžnikom signále s amplitúdou 5

V a frekvenciou 1 KHz. Zmerany bol každý z dvoch výstupov na každej z desiatich súčiastok. Toto meranie prebehlo na DPS s novými súčiastkami a na DPS so súčiastkami po skúškach vplyvu prostredia (ďalej len SVP) definovaného v kapitole 6.1. Testu boli podrobené len samotné testované súčiastky. Dosky DPS a zvyšné komponenty do klimatickej komory umiestnené neboli. Testované komponenty boli zaspájkované po vykonaní SVP.

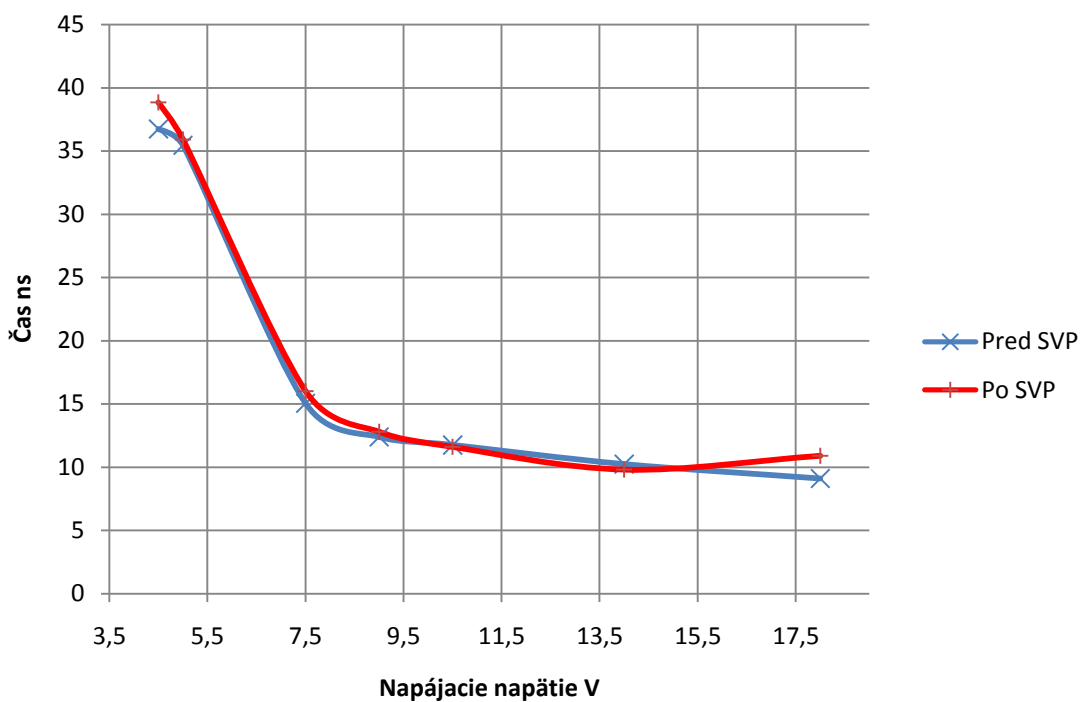
Meranie bolo realizované za účelom overenia vlastností deklarovaných výrobcom po technologickej zmene (zmena materiálu kontaktovania), konkrétne išlo o overenie časov nábežnej a dobežnej hrany výstupného signálu.



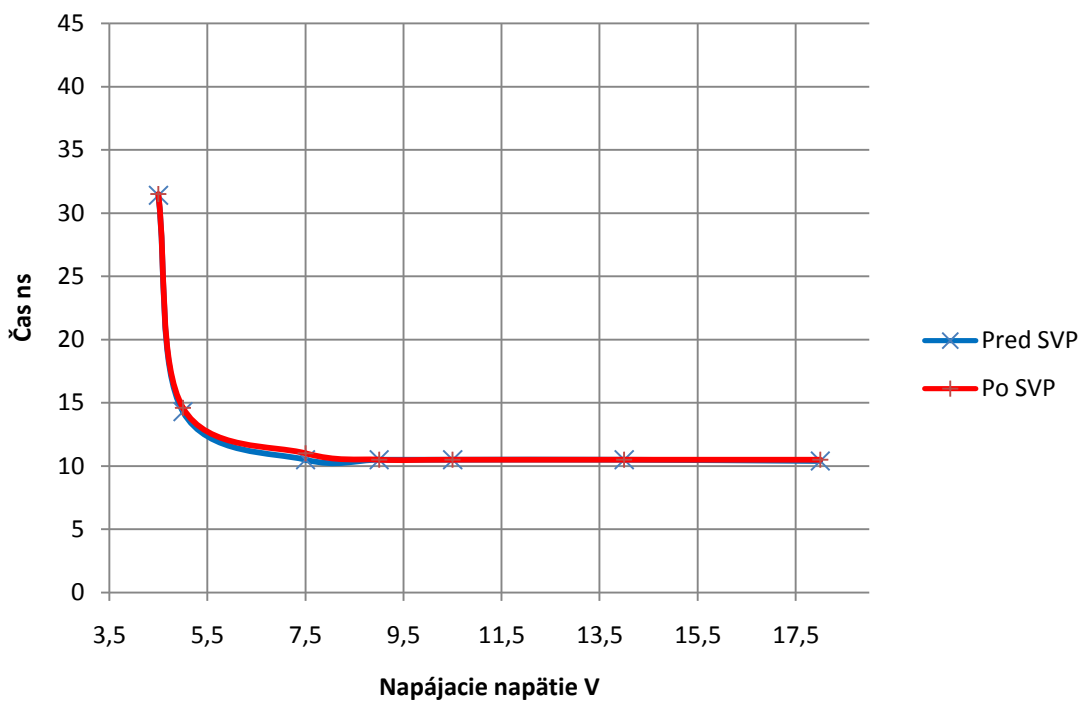
Obr. 27 Testovacie pracovisko



Obr. 28 Ukážka merania na osciloskope



Graf 3 Závislosť časov vzostupnej hrany na napätí



Graf 4 Závislosť časov zostupnej hrany na napätí

Na základe výsledkov realizovaných meraní je však možné konštatovať, že deklarované vlastnosti boli splnené aj po teste zaťažujúcom súčiastky po tepelnej a vlhkostnej stránke. Všetky spínacie časy testovaných súčiastok nepresiahli hodnotu 40 ns, čo je hranica uvádzaná v datasheete. Najväčšia odchýlka oproti pôvodným vzorkám bola zaznamenaná pri minimálnych a maximálnych hodnotách napájacieho napätia u nástupnej hrany (5 ns proti vzťažnému meraniu). Tieto hodnoty však nemôžu spôsobiť zlyhanie elektrického obvodu. V prípade vyšších nárokov na komponenty sa odporúča pri záťažových testoch zvoliť náročnejšie podmienky, v tomto prípade hlavne vyššiu iniciačnú teplotu, prípadne vlhkosť.

### 6.3 Overenie originality

#### Použitá súčiastka

Pri nasledujúcom pokuse bola využitá súčiastka KSZ8895MQXIA vyrábaná spoločnosťou MICROCHIP, ktorá sa používa ako ethernetový radič. Nakoľko výrobca uvádza rozsah pracovných teplôt od -40 do +85 °C, dá sa predpokladať že súčiastka bude vykazovať nielen zvýšenú odolnosť voči atmosferickým podmienkam ale aj procesom ktoré by mohli narušiť jej puzdro.

#### Leptací proces

Spomedzi procesov možného odstránenia puzdra bolo zvolené práve leptanie. Nakoľko nie je známe presné zloženie puzdra bolo toto leptanie vedené spôsobom pokus - omyl. Pri leptaní boli spočiatku použité nasledovné roztoky:

- Kyselina dusičná – kyselina sírová – kyselina chlorovodíková (všetky koncentrované, objemový pomer 94:3:3, pri teplote 40, 60 a 80°C)
- Kyselina dusičná – koncentrovaná, pri teplote 60 a 75°C
- Kyselina sírová – koncentrovaná, pri teplote 70, 80 a 90°C
- Kyselina peroxosírová – (pripravená reakciou kyseliny sírovej s peroxidom vodíku, pri silno exotermickej reakcii. Teplota roztoku bola udržiavaná na 50°C.)

Ani jedna zo spomenutých možností nebola dostatočne efektívna v krátkodobom rozsahu (niekoľko minút).

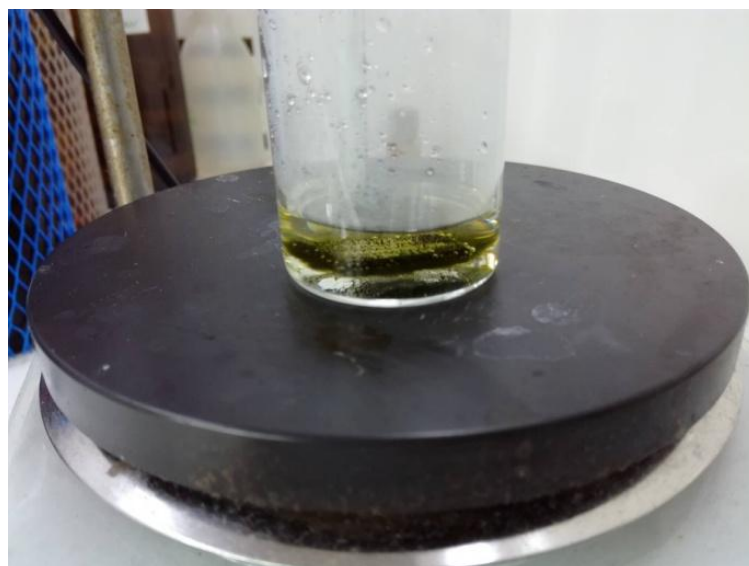
Puzdro dokázal dostatočným spôsobom narušiť až roztok koncentrovaných kyselín dusičnej a sírovej v objemovom pomere 4:1, pričom bol zahriaty na teplotu 65°C pomocou platne s tepelnou reguláciou. Roztok o objeme 15 ml bol pripravený do kadičky s objemom 50 ml. Samotné leptanie trvalo ±10 minút. Nakoľko sú výpary použitých kyselín a roztoku jedovaté, celý pokus prebiehal na odvetrávanom pracovisku za použitia ochranných odevov (viz obr. 29 a 30).



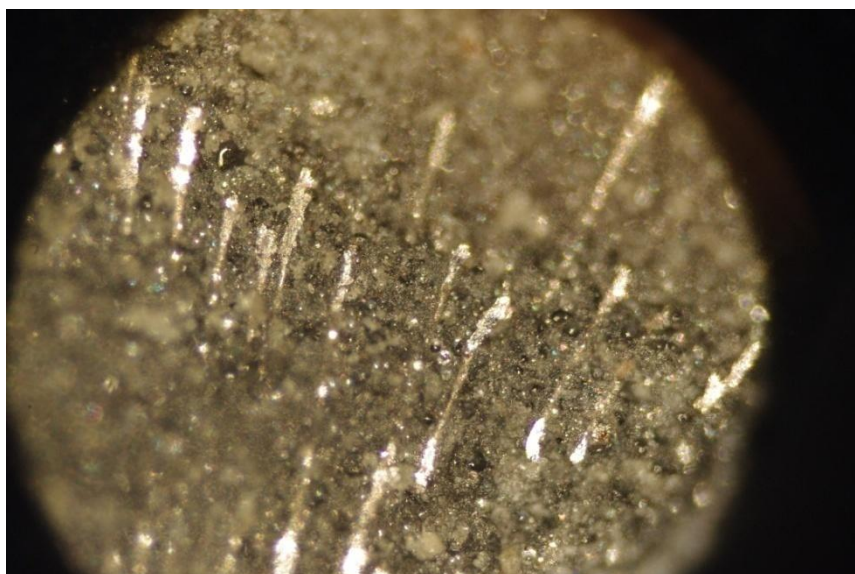
Okamžite po leptaní, bol leptaný objekt očistený v destilovanej vode. Puzdro súčiastky sa ukázalo ako relatívne odolné pričom ho leptanie odstránilo dostatočným spôsobom na preskúmanie materiálu kontaktovania.



**Obr. 29** Pracovisko pre leptanie



**Obr. 30** Priebeh leptania

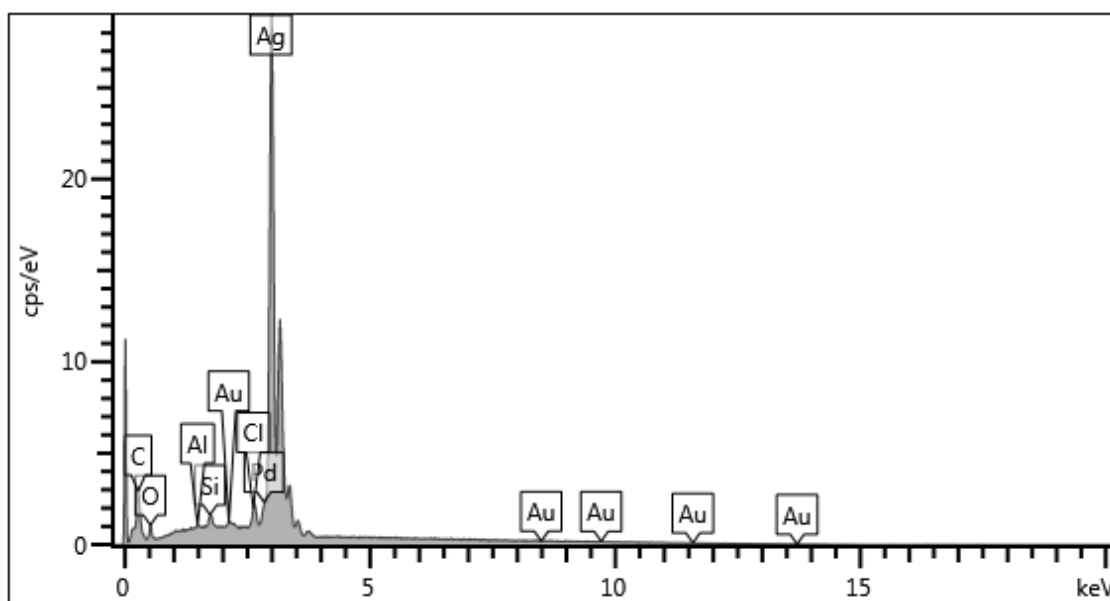


Obr. 31 Viditeľné drôty pod odleptaným puzdrom

### Použitá zliatina

Po odleptaní a očistení (viz obr. 31) bola skúmaná súčiastka vložená do komory elektrónového mikroskopu TESCAN Mira2. Následne pomocou detektoru EDS bol vykonaný rozbor materiálov zliatiny použitej na kontaktovanie.

Na uvedenom obrázku (obr. 32) je možné vidieť záznam spektrálnych čiar jednotlivých prvkov odhalených detektorom.



Obr. 32 Materiálová analýza



**Tab. 7** Percentuálne zastúpenie prvkov v skúmanom drôte

Prvok	Zastúpenie v %
Ag	90,072
Pd	5,838
Au	1,946
Si	1,112
Cl	0,556
Al	0,278

V oblasti drôtu bolo podľa očakávania najviac percentuálne zastúpené striebro (90,07%). Okrem neho však boli v zliatine preukázateľne detegované aj paládium (5,84%) a zlato (1,95%). Výskyt ďalších nájdených prvkov, kremíku, chlóru a hliníku je špekulatívny. Ich percentuálne zastúpenie je zhruba 1% a nižšie. Táto percentuálna hranica je zároveň prirodzenou chybovosťou detektora a z toho dôvodu sa môže jednať o skreslenie, prípadne o nežiaducu kontamináciu skúmaného objektu.

# Záver

Cieľom tejto práce bolo rozobrať problematiku kontaktovania striebornými drôťmi, predovšetkým overenia ich kvality a prípadného porovnania.

V prvej časti bola rozoberaná problematika použitia a vhodnosti materiálov pre rôzne druhy kontaktovania. Vzhľadom na preukázané chemické a elektrické vlastnosti je zlato najvhodnejším ale zároveň aj najdrahším materiálom používaným pre kontaktovanie.

Na základe dostupných informáciách o testoch, kvalifikácii a možných rizikových faktoroch bola navrhnutá séria testov ako pre samotnú technológiu kontaktovania tak aj pre zapuzdrené komponenty. Pre účely prípadného testovania boli navrhnuté a vyrobené prípravky vo forme DPS na overenie kvality kontaktovania. Testovacie prípravky boli nakontaktované strieborným a zlatým drôtom.

Pri následnom deštruktívnom teste PULL sa striebro ukázalo ako menej mechanicky pevné proti zlatu. Nutné je však podotknúť že kontaktovanie obomi použitými materiálmi vyhovelo požiadavkám americkej vojenskej normy MIL STD-883. Nameraná sila pri teste vždy prekročila hodnotu 2,5 gramu, definovaného pre zlatý drôt priemeru 25  $\mu\text{m}$ .

Pri skúškach vplyvu prostredia sa neprejavili ani neboli objavené žiadne povrchové štrukturálne zmeny súvisiace s koróziou v prípade zlatých ani strieborných drôtov. Pri zvolení vhodnej detekčnej metódy, alebo výrazným zhoršením skúšobných podmienok je však teoretický predpoklad, že strieborné drôty budú mať rozoznateľne horšie výsledky oproti drôtom zlatým.

Pri overovaní vlastností zapuzdrených komponentov (konkrétne MIC4427YM), neboli prekročené maximálne hodnoty časov nástupnej a zostupnej hrany, ktoré sú deklarované výrobcom. Maximálne funkčné hodnoty boli dodržané aj po skúške vplyvu prostredia (teplota 85°C, RH 85%, čas 360 h). Pri testovaní boli zistené minimálne zmeny, ktoré nemôžu spôsobiť zlyhanie súčiastky. Navyše nie je dokázateľné že by ich spôsobila práve zmena materiálu kontaktovania.

V poslednej časti bolo vykonané chemické odstránenie puzdra súčiastky KSZ8895MQXIA pomocou roztoku kyselín dusičnej a sírovej. Predmetný objekt bol preskúmaný elektrónovým mikroskopom s materiálovým detektorom EDS, pričom bol potvrdený teoretický predpoklad o zložení striebornej zliatiny. V zliatine bol odhalený výskyt paládia (5,8%) a zlata (1,9%), ktoré sa pridávajú do striebra kvôli zvýšeniu odolnosti voči korózii a na zlepšenie jeho elektrických vlastností.

Návrhom pre ďalšie, nadväzujúce pokračovanie práce by mohla byť určite optimalizácia nastavovaných hodnôt pri kontaktovaní striebra, aby sa dalo dosiahnuť vyššej pevnosti drôtových prepojov. Ďalšou zaujímavou témou je problematika overovania originality dodávaných súčiastok. Priestor pre optimalizáciu je tiež v použítom leptacom procese, ktorý sa ukázal dostatočný len pre zistenie materiálu kontaktovania.

# Zoznam literatúry

- [1.] HARMAN, G. *Wire Bonding in Microelectronics*. Third edition. New York: McGraw-Hill, 2010. ISBN 978-0-07-147623-2.
- [2.] NOVOTNÝ, M. *Optimalizace technologického procesu kontaktování polovodičových čipů*. [on-line], 2016, november. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=19688](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=19688)
- [3.] *The Nordic Electronics Packaging Guideline*. [on-line], 2016, november. Dostupné z: <http://extra.ivf.se/ngl/documents/chaptera/chaptera.pdf>
- [4.] *Electrical relay and connection technology* [on-line], 2016, november. Dostupné z: [http://pro.tanaka.co.jp/en/products/group\\_b/b\\_8.html](http://pro.tanaka.co.jp/en/products/group_b/b_8.html)
- [5.] *Pouzdření aktivních součástek a ochrana proti EST*, [on-line], 2016, december. Dostupné z: [https://moodle.vutbr.cz/pluginfile.php/275000/mod\\_resource/content/1/N%C3%A1vod%20na%20laboratorn%C3%AD%20C3%BAlohu%20C4%8D.%205.pdf](https://moodle.vutbr.cz/pluginfile.php/275000/mod_resource/content/1/N%C3%A1vod%20na%20laboratorn%C3%AD%20C3%BAlohu%20C4%8D.%205.pdf)
- [6.] *Wire bonding, Chapter A.*, [on-line], 2016, december. Dostupné z: <http://extra.ivf.se/ngl/documents/ChapterA/ChapterA2.pdf>
- [7.] *The quality test of wire bonding*, [on-line], 2016, december. Dostupné z: <http://www.ccsenet.org/journal/index.php/mas/article/viewFile/4589/3928>
- [8.] *Heraeus bondwire brochure*, [on-line], 2016, december. Dostupné z: [http://www.scanditron.com/sites/default/files/material/heraeus\\_bondingwire\\_brochure.pdf](http://www.scanditron.com/sites/default/files/material/heraeus_bondingwire_brochure.pdf)
- [9.] *Temperature cycling*, [on-line], 2016, december. Dostupné z: <http://ihome.ust.hk/~epack/member%20download%20area/22a104c.pdf>
- [10.] *High temperature storage life*, [on-line], 2016, december. Dostupné z: <http://ihome.ust.hk/~epack/member%20download%20area/22a103c.pdf>
- [11.] *Test method standard*, [on-line], 2016, december. Dostupné z: <http://scipp.ucsc.edu/groups/fermi/electronics/mil-std-883.pdf>
- [12.] *Wire bond shear test method*, [on-line], 2016, december. Dostupné z: <http://ihome.ust.hk/~epack/member%20download%20area/22b116.pdf>
- [13.] *Vibration, variable frequency*, [on-line], 2016, december. Dostupné z: <http://ihome.ust.hk/~epack/member%20download%20area/22b103b.pdf>
- [14.] *Accelerated moisture resistance*, [on-line], 2016, december. Dostupné z: <http://ihome.ust.hk/~epack/member%20download%20area/22a118.pdf>
- [15.] *Bonding tools product catalog*, [on-line], 2017, jún.. Dostupné z: [http://www.tpt-wirebonder.com/uploads/media/2016\\_Gaiser\\_Coorstek\\_-\\_Catalog\\_01.pdf](http://www.tpt-wirebonder.com/uploads/media/2016_Gaiser_Coorstek_-_Catalog_01.pdf)

## Zoznam obrázkov

Obr. 1 Prvý tranzistor prepojený s vývodmi pomocou kontaktovania[1]	8
Obr. 2 Ukážka termokompresného kontaktovania [1]	9
Obr. 3 Ukážka ultrazvukového kontaktovania [1]	10
Obr. 4 Ukážka termosonického kontaktovania [1]	11
Obr. 5 Vytvorenie klinového spoja [1]	12
Obr. 6 Vytvorenie kapilárneho spoja [1]	13
Obr. 7 Trhlina spoja [1]	17
Obr. 8 Návrh testovacej DPS v 3D	20
Obr. 9 Zobrazenie pôsobiacich síl pri teste Bond pull[11]	22
Obr. 10 Rozmery prípravku pre kontaktovanie	25
Obr. 11 Layout čipu LM124	25
Obr. 12 Kontaktovacie zariadenie HB16	26
Obr. 13 Použitý hrot[15]	27
Obr. 14 Nastavenie síl pri kontaktovaní	27
Obr. 15 Nastavenie tvaru slučky	27
Obr. 16 Prípravok pred nakontaktovaním	28
Obr. 17 Prípravok po nakontaktovaní	28
Obr. 18 Tester DAGE PC2400	29
Obr. 19 Ukážka PULL testu	29
Obr. 20 Detail druhého bondu zlata bez SVP	32
Obr. 21 Detail druhého bondu zlata po SVP	32
Obr. 22 Detail druhého bondu striebra bez SVP	33
Obr. 23 Detail druhého bondu zlata po SVP	33
Obr. 24 Odporúčané zapojenie	34
Obr. 25 Finálny návrh DPS pre súčiastky	34
Obr. 26 Hotová DPS s testovnými súčiastkami	35
Obr. 27 Testovacie pracovisko	36
Obr. 28 Ukážka merania na osciloskope	36
Obr. 29 Pracovisko pre leptanie	39
Obr. 30 Priebeh leptania	39
Obr. 31 Viditeľné drôty pod odleptaným puzdrom	40
Obr. 32 Materiálová analýza	40

## Zoznam tabuliek

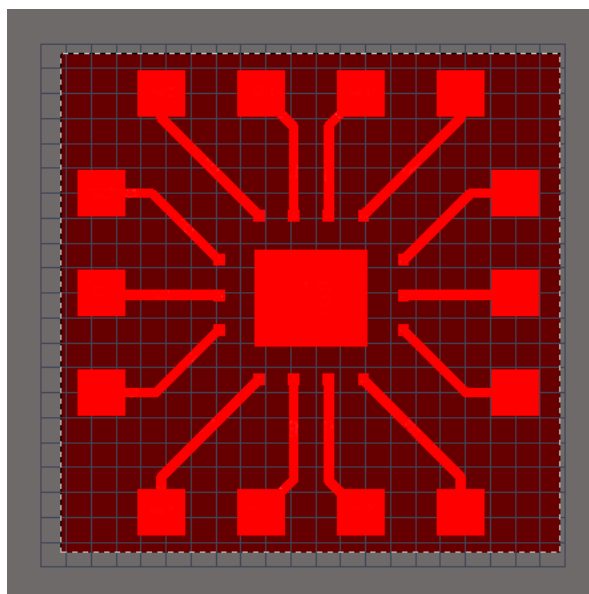
Tab. 1 Porovnanie vlastností procesov kontaktovania [3]	11
Tab. 2 Porovnanie typov spojov [3]	13
Tab. 3 Fyzikálne vlastnosti čistých materiálov	15
Tab. 4 Porovnanie parametrov drôtov rôznych materiálov [4][8]	15
Tab. 5 Návrh testov pre technológiu kontaktovania	21
Tab. 6 Návrh testov pre zapuzdrené komponenty	23
Tab. 7 Percentuálne zastúpenie prvkov v skúmanom drôte	41

# Zoznam symbolov, veličín a skratiek

°	stupeň
°C	stupeň celzia
%	percento
μs	mikrosekunda
ms	milisekunda
h	hodina
μm	mikrometer
mm	milimeter
g	gram
G	gravitačná sila
kHz	kilohertz
MPa	megapaskal
V	volt
Ω	ohm
EFO	electronic flame-off, bezplameňový elektronický systém
FAB	free air ball, guľôčka vytvorená pomocou EFO
DPS	doska plošných spojov
3D	trojrozmerný priestor
SVP	skúšky vplyvu prostredia
IC	integrated circuit, integrovaný obvod
EUR	mena euro
FR4	epoxidový laminát používaný pre dosky plošných spojov
EDS	energy-dispersive spectroscopy, disperzívna spektroskopia
ČSN	české technické normy
STD	standard, štandard
Al	chemická značka hliníku
Ag	chemická značka striebra
Au	chemická značka zlata
Cu	chemická značka medi
Ni	chemická značka niklu
Pb	chemická značka olova
Pd	chemická značka paládia
Sn	chemická značka cínu
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	vzorec oxidu hlinitého

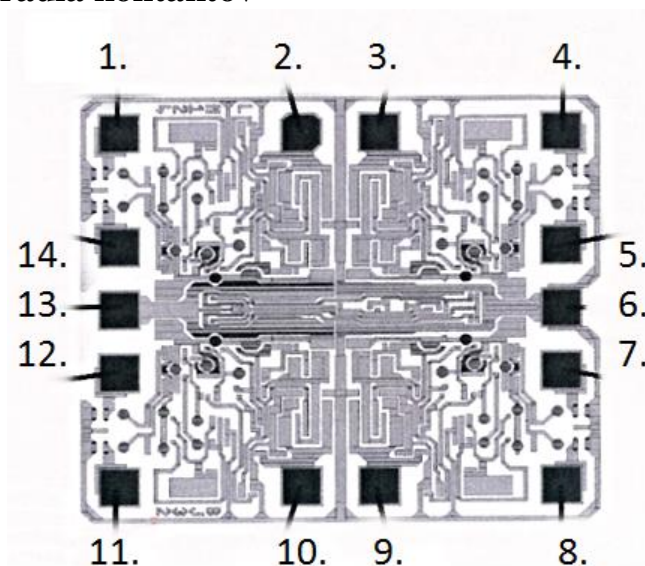
# Príloha A BOND PULL test

## A.1 Návrh DPS



Rozmer DPS 12,7 x 12,7 mm, mierka M 5:1

## A.2 Detail poradia kontaktov



Postup trhania strieborných a zlatých drôtov.  
Aby nedošlo k zámene strán a DPS, bol substrát jasne ozačený.

### A.3 Záznam nameraných síl

Výpis nameraných ťažných síl pre strieborné drôty:

DPS 1

P.č.	Ťažná sila
1.	2,628 g
2.	2,599 g
3.	4,636 g
4.	2,908 g
5.	2,669 g
6.	3,362 g
7.	5,185 g
8.	3,325 g
9.	2,695 g
10.	6,058 g
11.	5,647 g
12.	3,233 g
13.	5,103 g
14.	3,444 g

DPS 2

P.č.	Ťažná sila
1.	4,321 g
2.	2,815 g
3.	3,581 g
4.	2,891 g
5.	3,377 g
6.	3,274 g
7.	3,030 g
8.	3,638 g
9.	3,353 g
10.	2,990 g
11.	2,610 g
12.	3,468 g
13.	4,392 g
14.	2,539 g

DPS 3

P.č.	Ťažná sila
1.	3,165 g
2.	5,626 g
3.	4,961 g
4.	3,503 g
5.	3,048 g
6.	3,749 g
7.	3,116 g
8.	2,912 g
9.	4,185 g
10.	5,229 g
11.	3,470 g
12.	3,060 g
13.	3,192 g
14.	5,147 g

DPS 4

P.č.	Ťažná sila
1.	3,214 g
2.	4,491 g
3.	5,521 g
4.	3,741 g
5.	3,574 g
6.	3,018 g
7.	2,881 g
8.	3,480 g
9.	2,904 g
10.	2,632 g
11.	3,033 g
12.	3,909 g
13.	4,344 g
14.	6,008 g

DPS 5

P.č.	Ťažná sila
1.	3,371 g
2.	3,758 g
3.	3,432 g
4.	3,274 g
5.	3,740 g
6.	2,853 g
7.	3,632 g
8.	2,715 g
9.	3,021 g
10.	3,149 g
11.	5,835 g
12.	3,206 g
13.	3,909 g
14.	2,600 g

Výpis nameraných ťažných síl pre zlaté drôty:

DPS 1

P.č.	Ťažná sila
1.	6,245 g
2.	7,938 g
3.	5,408 g
4.	3,097 g
5.	7,532 g
6.	5,670 g
7.	7,016 g
8.	5,966 g
9.	7,304 g
10.	5,271 g
11.	5,215 g
12.	7,642 g
13.	5,911 g
14.	5,156 g

DPS 2

P.č.	Ťažná sila
1.	6,389 g
2.	4,571 g
3.	5,799 g
4.	5,558 g
5.	3,579 g
6.	6,064 g
7.	7,304 g
8.	6,721 g
9.	5,451 g
10.	6,458 g
11.	5,420 g
12.	3,432 g
13.	6,407 g
14.	5,701 g

DPS 3

P.č.	Ťažná sila
1.	5,223 g
2.	3,743 g
3.	5,036 g
4.	5,356 g
5.	10,939 g
6.	5,540 g
7.	7,570 g
8.	5,866 g
9.	5,274 g
10.	5,514 g
11.	4,994 g
12.	7,061 g
13.	6,846 g
14.	5,629 g

DPS 4

P.č.	Ťažná sila
1.	5,652 g
2.	2,739 g
3.	5,477 g
4.	5,734 g
5.	5,911 g
6.	5,378 g
7.	5,352 g
8.	4,954 g
9.	5,938 g
10.	5,827 g
11.	4,468 g
12.	5,386 g
13.	5,271 g
14.	4,982 g

DPS 5

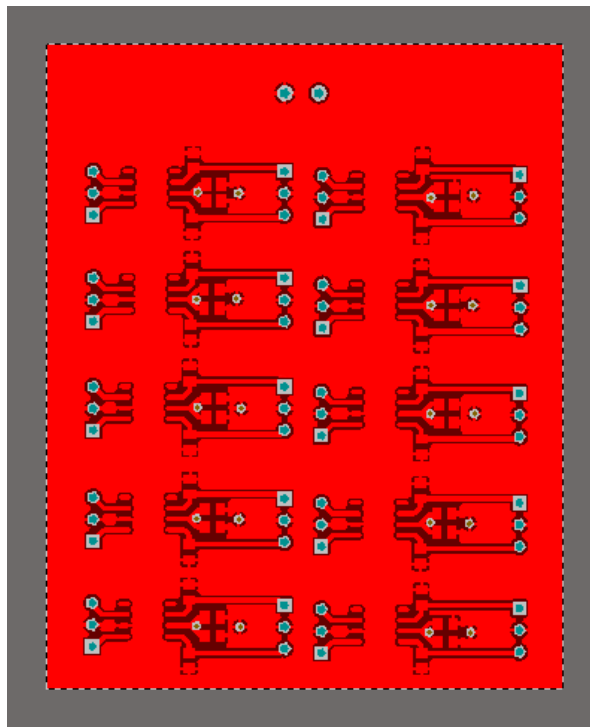
P.č.	Ťažná sila
1.	5,931 g
2.	4,947 g
3.	6,182 g
4.	2,585 g
5.	6,790 g
6.	7,099 g
7.	6,071 g
8.	5,029 g
9.	5,606 g
10.	6,454 g
11.	4,974 g
12.	6,631 g
13.	5,610 g
14.	5,402 g



# Príloha B Testovanie komponentu MIC4427YM

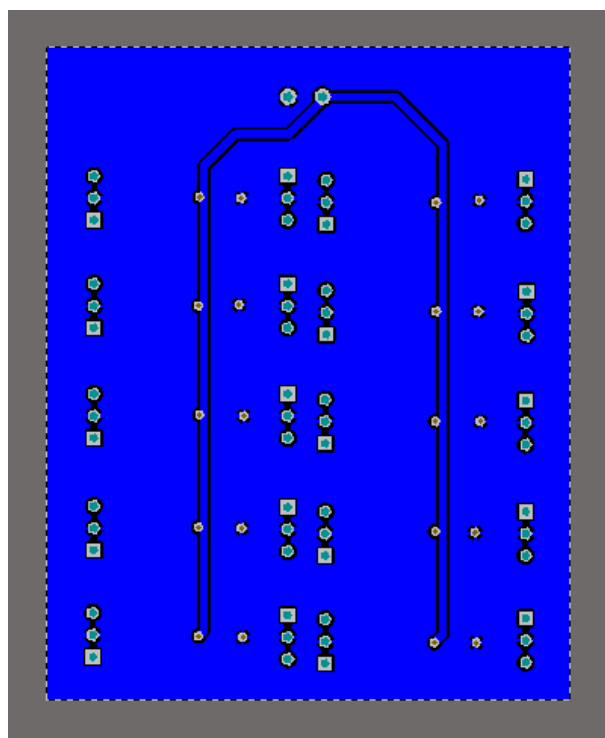
## B.1 Návrh DPS

Vrstva TOP



Rozmer DPS 65 x 75 mm, mierka M 1:1

Vrstva BOTTOM



Rozmer DPS 65 x 75 mm, mierka M 1:1

Qty	Parts	Shop	Package	Value
10	C3,C7,C11,C15,C19,C23,C27,C31,C35,C39	Farnell	805	0,1uF
10	C4,C8,C12,C16,C20,C24,C28,C32,C36,C40	Farnell	805	4,7uF
10	C1,C5,C9,C13,C17,C21,C25,C29,C33,C37,	Farnell	805	1000pF
10	C2,C6,C10,C14,C18,C22,C26,C30,C34,C38	Farnell	805	1000pF
10	MIC1-MIC10	Farnell	SOIC8	MIC4427YM

Zoznam použitých súčiastok na jednu DPS

## B.2 Záznam nameraných časov nábežnej a zostupnej hrany

### Vzťažné meranie

		t rise							t fall						
		Vsup	4,5 V	5 V	7,5 V	9 V	10,5 V	14 V	18 V	4,5 V	5 V	7,5 V	9 V	10,5 V	14 V
	I <sub>sup</sub>	9 mA	10 mA	11 mA	11 mA	12 mA	13 mA	15 mA	9 mA	10 mA	11 mA	11 mA	12 mA	13 mA	15 mA
IC1	OUT A	37	35	13	12	12	10	8	29	13	11	11	11	10	10
	OUT B	37	35	13	12	12	10	8	29	13	11	11	11	10	10
IC2	OUT A	37	36	14	12	13	10	9	31	14	11	10	10	11	11
	OUT B	37	36	14	12	13	10	9	31	14	11	10	10	11	11
IC3	OUT A	38	35	15	12	12	10	9	32	14	10	10	11	11	11
	OUT B	38	35	15	12	12	10	9	32	14	10	10	11	11	11
IC4	OUT A	37	35	14	13	11	10	9	33	15	10	11	10	10	11
	OUT B	37	35	14	13	11	11	9	33	15	10	11	10	10	11
IC5	OUT A	37	35	15	13	11	11	10	31	14	11	10	10	10	10
	OUT B	36	36	15	12	11	10	10	31	14	11	10	10	10	10
IC6	OUT A	36	36	16	13	11	10	10	31	15	11	11	11	11	10
	OUT B	37	36	16	12	11	10	10	31	15	11	11	11	11	10
IC7	OUT A	37	36	14	13	11	10	9	32	14	10	11	11	10	10
	OUT B	37	36	14	13	13	10	9	32	14	10	11	11	10	10
IC8	OUT A	37	36	17	13	13	10	9	31	15	11	10	10	11	11
	OUT B	38	36	17	13	11	11	9	31	15	11	10	10	11	11
IC9	OUT A	36	35	17	12	11	11	9	32	15	10	10	10	11	11
	OUT B	36	35	16	12	12	11	9	32	15	10	10	10	11	11
IC10	OUT A	35	35	16	12	12	10	9	32	14	10	11	11	10	9
	OUT B	35	35	16	12	12	10	9	32	14	10	11	11	10	9
	Priemer	36,75	35,45	15,05	12,40	11,75	10,25	9,10	31,40	14,30	10,50	10,50	10,50	10,50	10,40

### Meranie po skúškach vplyvu prostredia

		t rise							t fall						
		Vsup	4,5 V	5 V	7,5 V	9 V	10,5 V	14 V	18 V	4,5 V	5 V	7,5 V	9 V	10,5 V	14 V
	I <sub>sup</sub>	9 mA	10 mA	11 mA	11 mA	12 mA	13 mA	15 mA	9 mA	10 mA	11 mA	11 mA	12 mA	13 mA	15 mA
IC1	OUT A	38	35	17	12	12	9	11	31	15	10	11	10	11	11
	OUT B	39	35	17	12	12	9	11	31	15	10	11	10	11	11
IC2	OUT A	39	36	17	12	11	10	10	32	15	9	10	11	11	10
	OUT B	39	36	17	12	11	10	10	32	15	9	10	11	11	10
IC3	OUT A	40	36	15	14	11	10	11	32	15	11	11	11	10	11
	OUT B	40	36	15	14	11	10	11	32	15	11	11	11	10	11
IC4	OUT A	38	35	17	13	12	11	12	32	15	12	10	10	10	11
	OUT B	38	35	17	13	12	11	12	32	14	12	10	10	10	11
IC5	OUT A	39	35	14	13	13	10	12	32	14	12	10	10	11	10
	OUT B	39	35	14	13	13	10	12	32	15	12	10	10	11	10
IC6	OUT A	38	36	15	13	12	9	11	31	15	12	11	11	11	10
	OUT B	38	36	15	13	12	9	11	31	15	12	11	11	11	10
IC7	OUT A	39	36	17	13	11	9	10	31	14	10	11	10	10	11
	OUT B	39	36	17	13	11	9	10	31	14	10	11	10	10	11
IC8	OUT A	39	36	16	14	12	10	10	31	14	11	10	11	11	11
	OUT B	39	36	16	14	12	10	10	31	14	11	10	11	11	11
IC9	OUT A	40	37	17	12	11	9	11	31	14	11	10	11	10	10
	OUT B	40	37	17	12	11	9	11	31	14	11	10	11	10	10
IC10	OUT A	38	37	15	12	11	11	11	32	15	12	11	10	10	10
	OUT B	38	37	15	12	11	11	11	32	15	12	11	10	10	10
	Priemer	38,85	35,90	16,00	12,80	11,60	9,80	10,90	31,50	14,60	11,00	10,50	10,50	10,50	10,50