



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

NÁVRH A OPTIMALIZACE PROCESU PÁJENÍ SKELNÝCH PÁJEK

DESIGN AND OPTIMIZATION OF SOLDERING PROCESS OF SOLDER GLASSES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Viktorie Vinklerová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Alexandr Otáhal, Ph.D.

BRNO 2022

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Mikroelektronika a technologie**

Ústav mikroelektroniky

Studentka: Viktorie Vinklerová

ID: 220859

Ročník: 3

Akademický rok: 2021/22

NÁZEV TÉMATU:

Návrh a optimalizace procesu pájení skelných pájek

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Nastudujte obecný postup procesu pájení skelných pájek a používaných zařízení k tomuto účelu použitých. Dále se zaměřte na vady spojů skelnými pájkami se zaměřením na samotný proces pájení a teplotní délkovou roztažnost spojovaných materiálů (kompatibilita). Pro vybranou skelnou pájku určete vhodný poměr míchání s pojivem a optimalizujte proces pájení. Proces pájení optimalizujte a vytvořte pouzdro navržené v semestrální práci. Na závěr ověřte kvalitu vytvořeného spoje pomocí navržených metod v semestrální práci. Zjištěné informace a dosažené výsledky zpracujte v bakalářské práci.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 7.2.2022

Termín odevzdání: 2.6.2022

Vedoucí práce: Ing. Alexandr Otáhal, Ph.D.

doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.

předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá skelnými pájkami, jejich fyzikálními vlastnostmi a druhy. Dále práce obsahuje pojednání o metodách ohřevu, pájecích zařízeních, pájecím procesu a materiálové kompatibilitě různých kovových slitin a kovů, ale i těsnících materiálů. Cílem práce je optimalizace pájecího procesu skelné pájky G018-266, která je kompatibilní s Al_2O_3 a následná realizace keramického pouzdra. V práci je také popsáno měření síly vytvořeného spoje ve stříhu.

Klíčová slova

skelná pájka, pájecí proces, koeficient teplotní roztažnosti, těsnění, keramické pouzdro

Abstract

The bachelor's thesis deals with solder glasses, its physical properties and types. The work also includes a discussion about heating methods, soldering equipment, soldering process and material compatibility of various metal alloys, metals and sealing materials. The aim of the work is to optimize the soldering process of the glass solder G018-266, which is compatible with Al_2O_3 and the subsequent realization of the ceramic casing. The work also describes the measurement of the strength of the formed joint in the shear.

Keywords

solder glass, soldering process, coefficient of thermal expansion, sealing, ceramic casing

Bibliografická citace

VINKLEROVÁ, Viktorie. *Návrh a optimalizace procesu pájení skelných pájek* [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-06-01]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/142793>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky. Vedoucí práce Alexandr Otáhal.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta:	Viktorie Vinklerová
VUT ID studenta:	220 859
Typ práce:	Bakalářská práce
Akademický rok:	2021/22
Téma závěrečné práce:	Návrh a optimalizace procesu pájení skelných pájek

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 2. června 2022

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Alexandru Otáhalovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne: 2. června 2022

podpis autora

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ	9
SEZNAM TABULEK.....	10
ÚVOD	11
1 TEORETICKÁ ČÁST	12
1.1 ZÁKLADNÍ FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI.....	12
1.1.1 Viskozita.....	12
1.1.2 Teplotní roztažnost.....	14
1.1.3 Adheze.....	16
1.2 DRUHY POJÍCÍCH SKEL.....	16
1.2.1 Těsnící skla	16
1.2.2 Pájecí skla.....	16
1.2.3 Pasivační skla	17
1.2.4 Skla pro vysokoteplotní aplikace.....	17
1.3 METODY ZPŮSOBU OHŘEVU	17
1.3.1 Radiační ohřev.....	18
1.3.2 Horkovzdušný ohřev (konvekční).....	18
1.3.3 Laserový ohřev.....	19
1.4 ZAŘÍZENÍ PRO PÁJENÍ SKELNÝMI PÁJKAMI.....	19
1.4.1 Elektrická odporová pec	19
1.4.2 Pec s horkovzdušnou konvekci.....	19
1.5 PŘÍKLADY PROCESU PÁJENÍ.....	20
1.5.1 Pájení kovarové slitiny.....	20
1.5.2 Utěsnění optického vlákna	20
1.5.3 Pájení průchodky	21
1.6 VADY PÁJENÝCH SPOJŮ	21
1.7 MATERIÁLOVÁ KOMPATIBILITA	21
1.7.1 Kompatibilita slitiny kovaru.....	22
1.7.2 Kompatibilita kryoflexu.....	22
1.7.3 Kompatibilita pájek G018-266 a G018-205.....	23
2 PRAKTICKÁ ČÁST.....	24
2.1 NÁVRH POUZDRA	24
2.2 OPTIMALIZACE PROCESU PÁJENÍ	26
2.3 KONTROLA SÍLY PÁJENÉHO SPOJE VE STŘIHU	29
2.4 SÍTOTISK	31
2.4.1 Výroba předlohy síta.....	31
2.4.2 Zhotovení motivu pomocí sítotisku.....	32
2.5 ZHOTOVENÍ NAVRŽENÉHO POUZDRA.....	33
2.5.1 První prototyp.....	33
2.5.2 Druhý prototyp.....	35
2.6 SHRNUTÍ.....	36
ZÁVĚR	37
LITERATURA.....	39

SEZNAM ZKRATEK	42
-----------------------------	-----------

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Typická křivka teplotní závislosti viskozity skelných pájek [4].....	14
1.2	Průběh poměru teplotní roztažnosti v závislosti na teplotě [4].....	14
2.1	Keramický substrát, na kterém bude realizováno pouzdro.....	24
2.2	Návrh rámečku pouzdra	25
2.3	Návrh víka pouzdra	25
2.4	3D model pouzdra	25
2.5	Teplotní profil skelné pájky G018-266	26
2.6	Připájené rámečky a víka na keramický substrát.....	27
2.7	Kontrola připájených rámečků pomocí mikroskopu	27
2.8	Kontrola rámečků připájených pájkou s nízkou hustotou pomocí rentgenu.....	28
2.9	Kontrola rámečků připájených pájkou se střední hustotou pomocí rentgenu.....	28
2.10	Kontrola rámečků připájených pájkou s vysokou hustotou pomocí rentgenu.....	28
2.11	Průběh řezání keramického substrátu pomocí laseru na jednotlivé vzorky	29
2.12	Vzorky pro měření síly ve střihu připájené třemi danými hustotami skelné pájky	30
2.13	Hotové síto určené pro tisk tlusté vrstvy na rámeček a víko	32
2.14	Natisknuté rámečky.....	33
2.15	Natisknutá víčka.....	33
2.16	Čip expandér s připájenými rámečky.....	34
2.17	Nanesení pájecí pasty	34
2.18	Hotové pouzdro.....	34
2.19	Kontrola pouzdra pomocí rentgenu.....	34
2.20	Detail trhliny ve spoji.....	34
2.21	Upravený pájecí profil skelné pájky G018-266.....	35
2.22	Kontrola rámečku druhého pouzdra pomocí rentgenu	35
2.23	Detail vzduchové dutiny ve spoji	35
2.24	Upravený pájecí profil skelné pájky G018-266.....	36

SEZNAM TABULEK

1.1	Porovnání kvality těsnícího spoje podle rozdílu CTE pájených materiálů [1]	15
1.2	Dělení pájek podle hodnoty CTE [1].....	15
1.3	Kompatibilní kovové materiály podle hodnoty CTE skelné pájky [1]	22
2.1	Poměry míchání pojiva a pájky pro dosažení požadovaných hustot	26
2.2	Naměřené hodnoty síly spoje ve stříhu jednotlivých hustot pájek	30
2.3	Průměrná síla spoje ve stříhu a směrodatná odchylka pro jednotlivé hustoty skelné pájky	31

ÚVOD

Spojování materiálů v podobě pájení je nedílnou součástí všech elektrotechnických zařízení. Asi nejčastější je pájení dvou kovových materiálů pomocí kovové slitiny. Pokud bychom ale chtěli spojovat jiné materiály než kovové, je potřeba nová technologie. Právě skelné pájky umožňují spolehlivě vytvářet spojení skla s kovem, skla s keramikou, keramiky s keramikou a podobně. Jejich přínosem je celá řada nových možností v pájecím odvětví, chemická odolnost, mechanická pevnost spojů a hermetičnost.

Pojící skla můžeme rozdělit na skelné pájky, těsnící skla, skla pro vysokoteplotní aplikace a pasivační skla. Jejich využití je široké. Mohou být použita na ochranné obaly polovodičů, vysokoteplotní senzory, hermetické průchodky a kryty čoček.

Narozdíl od kovových pájek je u skelných pájek kontrolovatelná hodnota viskozity v závislosti na teplotě, čímž jsme schopni dosáhnout větší přesnosti a spolehlivosti celého procesu. Skelné pájky se dají využít i při těsnění optických vláken, kdy je požadována vysoká přesnost. Jsou také výbornými izolanty a odolávají vlhkosti.

Mezi cíle této práce patří optimalizace procesu pájení skelné pájky G018-266, která je kompatibilní s korundovou keramikou, a měření síly ve stříhu spoje pájeného pomocí zmíněné skelné pájky. Hlavním cílem je pak realizace keramického pouzdra, které bylo navrženo v rámci semestrální práce.

Bakalářská práce je členěna na dvě hlavní kapitoly, a to teoretickou a praktickou část. Teoretická část se zabývá základními fyzikálními vlastnostmi skelných pájek (viskozitou, teplotní délkovou roztažností a adhezí). Dále pojednává o rozdílu mezi skelnou pájkou a kovovou pájkou a jednotlivými druhy pojících skel. Jsou zde rozebrány také metody ohřevu, pájecí zařízení, proces pájení a vzájemná materiálová kompatibilita těsnících i kovových materiálů. V praktické části je popsán návrh pouzdra čipu, optimalizace procesu pájení skelné pájky G018-266, měření síly pájeného spoje ve stříhu a realizace dvou prototypů keramického pouzdra, které bylo navrženo v semestrální práci.

1 TEORETICKÁ ČÁST

V této kapitole budou popsány důležité vlastnosti pájecích skel, jejich rozdělení, využití, způsoby ohřevu, pájecí zařízení, materiálová kompatibilita a některé vady pájených spojů skelnými pájkami.

1.1 Základní fyzikální vlastnosti

Aby mohlo být sklo nazýváno skelnou pájkou, musí tento materiál splňovat určité fyzikální vlastnosti. Dobrá skelná pájka by měla mít nízkou viskozitu, teplotní roztažnost co nejvíce podobnou pájenému materiálu, vysokou chemickou odolnost, velkou dielektrickou pevnost a kontrolovatelnou krystalizaci nebo žádnou krystalizaci. [1]

Skelná pájka není příliš častý pojem na rozdíl od pájky, kterou je myšlena slitina kovů a je také velmi často používána. Pro ujasnění těchto dvou pojmů a jejich rozdílů je níže vypsáno pár bodů ohledně této problematiky.

1. Pájecí sklo je roztok oxidů kovů, zatímco pájka je roztok nebo slitina kovů. (Skelná pájka neobsahuje žádné kovy a pájka neobsahuje žádné oxidy.)
2. Pájecí sklo smáčí povrchy oxidů kovů a některé kovové povrchy v závislosti na povrchové energii. Pájka smáčí kovové povrchy, ale ne povrchy oxidů.
3. Pájka má při teplotě tání náhlou změnu viskozity. Viskozita skelné pájky je lépe kontrolovatelná v závislosti na teplotě.
4. Pájecí skla jsou obecně tvrdší, mají vysoký modul pružnosti a větší odolnost proti tečení. Pájky AuSn však mají srovnatelný modul pružnosti jako nízkoteplotní skelná pájka.
5. Skelnou pájku lze zpracovávat ve normálním vzdušném prostředí, zatímco pájka vyžaduje tavidlo, nebo sníženou atmosféru, aby se zajistil povrch bez oxidů pro dobré smáčení. [2]

1.1.1 Viskozita

Teplota měknutí pájecího skla je důležitou vlastností, proto musíme definovat viskozitu a požadavky na ni. Viskozita charakterizuje vnitřní tření závislé na teplotě, složení a koncentraci tekuté látky. Značí se písmenem η a její jednotkou je dPa·s, ale v některých starších zdrojích je viskozita uváděna v Poisech (P). Nicméně obě jednotky si navzájem odpovídají. Převodní vztah je tedy: $1 \text{ dPa}\cdot\text{s} = 1 \text{ P}$. Tekutost skelné pájky je důležitá pro dobré utěsnění daných součástí. [3]

Mezi teplotou tavení a pokojovou teplotou se mění hodnota viskozity o 15-20 řádů. Rozsah viskozity je předmětem zájmu u skelných pájek. Široký rozsah většinou znamená silný a pevný spoj. [3, 4]

V rámci rozsahu viskozity jsou jednotlivé stavy skla rozděleny do tří skupin:

1. oblast tavení (nad teplotou tavení)
2. oblast podchlazené taveniny (mezi teplotou tavení a teplotou transformace)
3. oblast zmražení či oblast zdánlivě pevné taveniny (pod teplotou transformace)

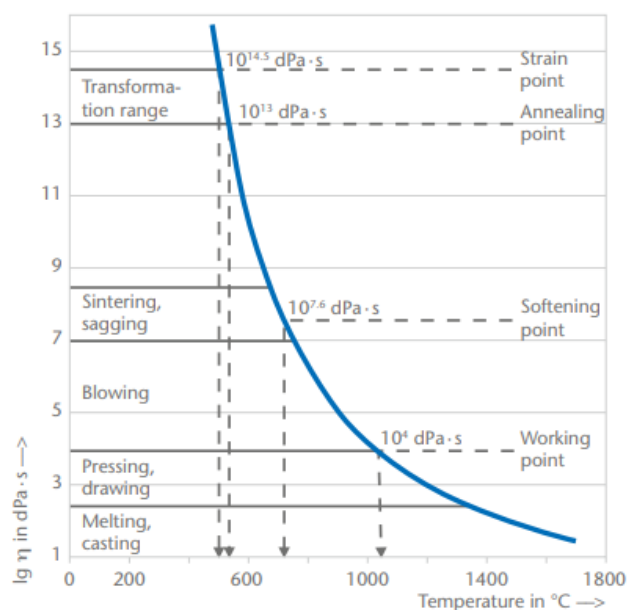
Velmi podstatné pro tvarování skla je absence krystalizace v oblasti podchlazené taveniny. Důležitá charakteristika skelných pájek je v podstatě stabilní a plynulá změna viskozity ve všech teplotních oblastech. [4]

Na obrázku 1.1 je vyobrazena křivka závislosti viskozity na teplotě a jsou v ní vyznačeny body a teploty, které jsou důležité během procesu pájení.

Při nejnižších hodnotách viskozity dochází k homogenizaci. Pracovní oblast je při viskozitách v rozsahu 10^3 - 10^7 dPa·s. Při těchto hodnotách mohou být prováděny různé technické postupy jako například vyfukování a lisování skla. Významným bodem této části je tzv. pracovní bod, nejčastěji se jedná o teplotu odpovídající viskozitě o velikosti 10^7 dPa·s. [4]

Bod měknutí je teplota, při které má sklo viskozitu $10^{7.6}$ dPa·s. Okolo této teploty dochází k deformaci skla jeho vlastní vahou. Okolo hodnoty 10^{10} dPa·s se viskozita stává nezávislou na čase. Při dalším zvyšování viskozity je navazování strukturální rovnováhy opožděno v takové míře, že můžeme tuto skleněnou strukturu nazývat ztuženou, či zmraženou. Sklo se nachází v oblasti transformace, kde má velmi nízkou schopnost toku, což vede k tomu, že stačí kompenzovat pouze vnitřní pnutí ve skle. Spodní hranice oblasti transformace je dána bodem žíhání při hodnotě viskozity 10^{13} dPa·s, kdy po tvarování skla za vysokých teplot v předchozích oblastech dochází k uvolnění vnitřního pnutí během pár minut. Posledním význačným bodem je bod zátěže, který je dosažen při viskozitě $10^{14.5}$ dPa·s, zde již trvá uvolnění vnitřního pnutí několik hodin. Rychlejší chlazení je potom možné při nižších teplotách, než je teplota bodu zátěže. [4]

Při mírném zvyšování pájecí teploty dochází k výraznému snižování času pájení. Jedná se o čas, který má skelná pájka k rozšíření a vytvoření dobrého hermetického těsnění. Ve spojích sklo-sklo může být jednoduše ztracena výhoda získaná snížením pájecí teploty, a to prodlouženým časem, který je nutný k pájení, nebo deformaci pájeného materiálu. Velikost deformace závisí na geometrii, na vnější síle, době trvání ohřevu a viskozitě. Od strmosti křivky viskozity se odvíjí také rychlost tuhnutí skelné pájky. [1, 3]

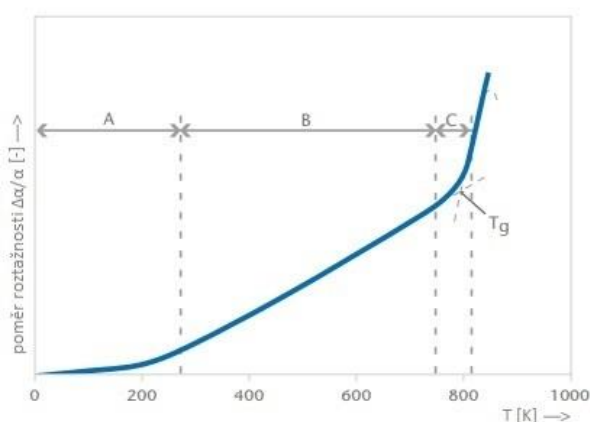


Obrázek 1.1 Typická křivka teplotní závislosti viskozity skelných pájek [4]

1.1.2 Teplotní roztažnost

Jedná se o jev, který popisuje změnu rozměrů materiálu při současné změně teploty. Většinou je u skelných pájek značena α a její jednotka je K^{-1} . Teplotní roztažnost skel není lineární. Pro většinu praktických účelů může být považována za lineární, avšak pouze do bodu transformace viz obrázek 1.2. [1, 4]

Na obrázku 1.2 je zobrazena typická křivka teplotní roztažnosti. Křivka začíná v nule a pomalu roste. Okolo pokojové teploty (oblast A) ale dojde ke zřetelnému ohybu. Následně charakteristika postupně roste ve zdánlivě lineární oblasti (sekce B) až do bodu, při jehož teplotě lze detekovat plastické vlastnosti skla. V transformační oblasti označené písmenem C přechází sklo z plastického stavu do více viskózního stavu. Bod transformace, který určuje oblast transformace je většinou u skelných pájek uveden. [4]



Obrázek 1.2 Průběh poměru teplotní roztažnosti v závislosti na teplotě [4]

V oblasti transformace (T_g) je tedy sklo viskózní. Pokud ho chladíme do bodu transformační teploty, stává se křehkým a tuhým. Během dalšího chlazení na pokojovou teplotu může nastat praskání pájeného spoje, pokud se významně liší teplotní roztažnost pájeného materiálu a skelné pájky. Z čehož vyplývá, že k dosažení spolehlivého a pevného pájeného spoje je nutné, aby skelná pájka a pájený materiál měly podobnou hodnotu koeficientu teplotní roztažnosti v teplotním rozsahu pájecího procesu. Jelikož úplné shody je zřídka možno dosáhnout, pro průměrné podmínky je tolerován rozdíl hodnot koeficientu teplotní roztažnosti $\pm 2 \cdot 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$. [1, 4]

Protože pájení většinou zahrnuje spojování rozdílných materiálů, je koeficient teplotní roztažnosti (CTE) skelné pájky zásadní parametr. Pro dosažení silného spoje s minimálním pnutím, kdy stejný CTE nelze vyhledat, je dobré, aby CTE skelné pájky byl nižší než CTE pájeného materiálu. Jestliže spojujeme dva skleněné materiály, z nichž má každý jinou křivku teplotní roztažnosti, je vhodné vybrat skelnou pájku, která má křivku teplotní roztažnosti mezi charakteristikami dvou daných materiálů, avšak blíže ke křivce s nižšími hodnotami. [1]

V tabulce 1.1 je zobrazeno nejen to, že čím menší rozdíl CTE mezi sebou jednotlivé materiály mají, tím bude utěsnění kvalitnější, což je zřejmé. Ale je zde také uvedena hraniční hodnota tohoto rozdílu, která by při pájení neměla být přesažena v případě, že je požadován spoj bez mechanického pnutí.

Tabulka 1.1 Porovnání kvality těsnícího spoje podle rozdílu CTE pájených materiálů [1]

rozdíl CTE [$^{\circ}\text{C}^{-1}$]	kvalita těsnění
$1 \cdot 10^{-7}$	vynikající
$(1-5) \cdot 10^{-7}$	uspokojivý pro průměrné těsnění
$(5-10) \cdot 10^{-7}$	kritické pnutí
$10 \cdot 10^{-7}$	selhání

V tabulce 1.2 jsou rozděleny pájky podle hodnoty CTE na tvrdé a měkké. Podle CTE je možné pájky dělit na více skupin s ohledem na materiálovou kompatibilitu s běžně používanými kovy. Toto rozdělení bude uvedeno právě v rámci kompatibility jednotlivých materiálů.

Tabulka 1.2 Dělení pájek podle hodnoty CTE [1]

CTE [$^{\circ}\text{C}^{-1}$]	typ skelné pájky
$<25 \cdot 10^{-7}$	tvrdá sklená pájky
$(25-50) \cdot 10^{-7}$	polotvrdá skelná pájka
$>50 \cdot 10^{-7}$	měkká skelná pájka

1.1.3 Adheze

Adheze je schopnost materiálu (především dvou rozdílných materiálů) k sobě navzájem přilnout. Silný spoj mezi skelnou pájkou a pájeným materiálem zahrnuje dobrou adhezi mezi těmito dvěma materiály. Adheze může být jak mechanická, tak chemická, či dokonce mechanicko-chemická. Zvýšit ji lze například drsným povrchem materiálu. Povrch pájeného materiálu musí být čistý. Zánik oxidu na kovu, nebo leptání povrchu skla pomáhá v rozprostírání skelné pájky po povrchu. U kovů je kritická tloušťka vrstvy oxidu. Mechanicky slabý spoj, který je slabý v důsledku příliš široké vrstvy oxidu, selže. Ale když je kov pokryt nedostatečnou vrstvou oxidu, skelná pájka nevytvoří adekvátní spoj. Proto je daná tloušťka oxidu velmi často pevně stanovená [1]

1.2 Druhy pojících skel

Skelné pájky dělíme na několik skupin: těsnící skla, pájecí skla, pasivační skla a skla pro vysokoteplotní aplikace. Liší se jak vlastnostmi, tak použitím. Níže jsou jednotlivé druhy blíže popsány.

1.2.1 Těsnící skla

Těsnící skla (Sealing glasses) jsou využívána pro hermetická, mechanicky spolehlivá těsnění mezi kovy, keramikou, či sklem. Často bývají dostupné ve formě prášku, nebo menších kousků spékaných polotovarů. Typická pracovní teplota dosahuje u těchto skel hodnot 800 až 1000 °C. [5]

Preferované vlastnosti jsou chování viskozity skla a smáčivost skla po povrchu spousta krystalických materiálů. Pro stabilní a mechanicky pevné skelné těsnění je důležité, aby si změna rozměrů obou materiálů z důvodu měnící se teploty odpovídala v rozsahu od transformační teploty po pokojovou teplotu. Pokud máme skla, jejichž teplotní roztažnost je značně rozdílná a není možné kvůli velkému pnutí tato skla přímo pájet, je využíváno tzv. prostřední pájky. Tato pájka je navržena tak, aby na přechodech mezi danými materiály nevznikalo pnutí vyšší než 20 N/mm². Možné aplikace těsnících skel jsou palivové články na bázi tuhých oxidů (SOFC), záblesková světla, vysokoteplotní senzory nebo baterie s roztaveným sodíkem. [4, 5]

1.2.2 Pájecí skla

Díky nízkému bodu měknutí pod 550°C umožňují pájecí skla (solder glasses) spojování skel, keramiky, či kovů bez teplotního namáhání materiálů. Skla jsou opět dostupná jako prášek nebo spékané polotovary. Dělíme je na skelné, krystalické a kompozitní. [5]

Skelné pájecí sklo se chová jako klasické sklo. Jeho vlastnosti se během pájení nemění. Při opětovném zahřívání pájeného spoje je teplotní závislost měknutí stejná jako u předešlého pájecího procesu. Naopak krystalické pájecí sklo během procesu pájení krystalizuje. Jejich struktura se mění na polykrystalickou. Z důvodu krystalizace

se zvyšuje hodnota viskozity o několik řádů, což potlačuje další tok. Na druhou stranu krystalizace umožňuje větší teplotní odolnost pájeného spoje. [4]

Vývoj skelných pájek s velmi nízkou teplotou pájení je omezen, jelikož snižováním teploty zvyšujeme koeficient teplotní roztažnosti. Tento jev je méně zřetelný u krystalických pájecích skel. Pokud ale bude do skelné pájky přidáno plnivo, které má velmi nízký nebo záporný koeficient teplotní roztažnosti, předejdeme tomuto jevu efektivněji. Takové pájecí sklo se nazývá kompozitní a je využíváno pro stabilní skelné pájky. Jelikož plniva snižují schopnost toku, můžeme jich přidat do konkrétního pájecího procesu pouze určité omezené množství. Vhodné skelné pájky se dělí podle požadavků na nejvyšší přípustnou teplotu pájení, teplotní roztažnost spojovaných materiálů, maximální teplotu aplikace v zóně pájení a chemické vlastnosti. [4]

Pájecí skla mohou být využita při těsnění zobrazovacích zařízení, optoelektronických obalech (pájecí krytky, krytky čoček) nebo obaly MEMS (= Micro Electrical Mechanical System). [5]

1.2.3 Pasivační skla

Pasivační skla (Passivation glasses) jsou Zn-BSi a Pb-Al křemičitá skla, která se používají pro chemickou a mechanickou ochranu polovodičových povrchů. Vzhledem k rozdílné hodnotě koeficientu teplotní roztažnosti pasivačního skla a polovodičových struktur je nutné předejít poruchám povrchu a narušení hermetičnosti ochranné vrstvy. Toho může být dosaženo, když budeme nanášet opravdu tenké vrstvy těchto skel. U většiny z nich výrobce uvádí maximální šířku nanášené vrstvy. Pro snížení napětí mezi křemíkem a sklem je zpomalováno chlazení v oblasti transformace. [4]

1.2.4 Skla pro vysokoteplotní aplikace

Jedná se o skla a sklo-keramické těsnící materiály. Vzhledem k tomu, že vykazují dobrou kompatibilitu s žáruvzdornými materiály, umožňují stabilní spoje odolné vysokým teplotám. Teploty přechodu těchto skel přesahují hodnotu 500 °C. Tyto materiály mají vysokou elektrickou odolnost a ty, které krystalizují mohou být použity při vyšších teplotách než je jejich původní teplota přechodu. Těsnící spoj tvořený těmito materiály může být vytvořen v peci s horkovzdušnou konvekcí, nebo laserem. [4]

1.3 Metody způsobu ohřevu

Existuje šest metod způsobu ohřevu, kdy jsme schopni rozpustit sklo a vytvořit vzduchotěsný spoj za současného použití průchodky. Tímto způsobem můžeme pájet například optická vlákna. Průchodku volíme většinou z kovu, což je slitina železa, niklu a kobaltu, která má podobné vlastnosti tepelné roztažnosti jako borosilikátové sklo.

1. Mezi nejčastější metody ohřevu patří radiofrekvenční indukční ohřev. Jeho výhoda spočívá v tom, že je schopen během velmi krátkého časového úseku lokálního ohřevu. Průchodka ale musí být vyrobena z materiálu, který absorbuje

radiofrekvenční záření. Potom tímto způsobem rozežhřátá průchodka roztaví sklo, které je na ní umístěno.

2. Odporový ohřev pomocí elektrod, jejichž kontakty jsou vyvedeny na průchodku je velmi rychlý a také lokální. Zde je ovšem zapotřebí elektricky vodivá průchodka.
3. Radiační ohřev vytváří vysoce účinný spoj nezávislý na materiálu průchodky.
4. Horkovzdušný ohřev je efektivní v případě, kdy nepožadujeme kovovou průchodku.
5. Ohřev pomocí laseru je také velmi efektivní v lokálním ohřevu a je nezávislý na typu průchodky. Skelné pájky absorbují CO2 laser.
6. U kondukčního ohřevu umístíme tepelný zdroj přímo na pájený materiál. Nevýhoda této metody spočívá v poměru ohřevu, který je závislý na množství a vedení tepla průchodky. [2]

Co se týče pájení pomocí sklených pájek, nejvíce vhodné budou metody radiačního, horkovzdušného a laserového ohřevu, které jsou popsány níže.

1.3.1 Radiační ohřev

K přenosu tepla dochází zářením, pomocí soustředěného infračerveného záření, které osvětluje kolmo pájené místo. IR pece jsou rozděleny do několika nastavitelných pájecích zón. K přetavení pájky dochází zahřátím v důsledku částečné absorpce záření, které dopadá na povrch pájené oblasti. Výhodou je získání úzkého účinného paprsku, který působí lokálně, tudíž neohřívá okolní součástky ani spoje. Nevýhodou je vysoká pořizovací cena. V případě rozmanitosti pájených materiálů může dojít k nerovnoměrnému ohřevu. Z důvodu optimalizace procesu se často kombinuje radiační ohřev a konvekčním ohřevem. [6, 7]

1.3.2 Horkovzdušný ohřev (konvekční)

V systémech pro pájení s nucenou konvekcí se procesní plyn (okolní vzduch nebo dusík) ohřívá v oddělených topných zónách a cirkuluje pomocí ventilátorů. Horké plyny proudí do pájecího prostoru, kde dochází k ohřevu (shora i spodní strany, či pouze z horní strany). Následně je ochlazený plyn odváděn zpátky k topnému tělesu, kde je znovu ohříván na nastavenou teplotu a vháněn zpět do sestavy. Trysky by měly rovnoměrně rozvádět velký objem cirkulujícího vzduchu. Jednotlivé zóny umožňují předejít teplotnímu šoku, správnou aktivaci tavidla a prohrátí pájeného spoje nastavením daných teplot. Čím více teplotních zón pec má, tím přesnější nastavení bude. Výhodou je možnost pájení různorodých součástí a nízký teplotní gradient napříč pecí. Nevýhodou je potom malá účinnost přenosu tepla v zařízení a ní vyplývající velká energetická náročnost. [6, 7, 8]

Spolehlivou alternativou je ohřev v kondenzovaných parách. Vespodu zařízení je umístěna kapalina s přesně definovanou teplotou varu a topné těleso.

Když je tato kapalina zahřátá na danou teplotu varu, začnou páry stoupat směrem k pájenému materiálu, kde kondenzují na chladnějších místech. Pro zamezení úniku par je nutné mít zařízení dobře uzavřené. Výhoda spočívá ve stabilní teplotě varu kapaliny, jelikož nedochází k přehřátí. Vzhledem k vytlačování kyslíku směrem nahoru je u této metody nižší pravděpodobnost oxidace. Nevýhodou potom je vysoká cena kapaliny a špatné ovládání teplotního profilu. [7]

1.3.3 Laserový ohřev

Přesně zaměřený laserový paprsek zajišťuje ohřev pájky, což vede k rychlému nedestruktivnímu vytvoření spoje. Pájka je zahřívána absorbovanou energií zaměřeným pájecím místem. Laserové pájení používá pájku, která v kapalném stavu smáčí spojované materiály a po ztuhnutí poskytuje mechanicky a elektricky stabilní spoje. Tato metoda je vhodná pro pájení spojů používající pájky s širokým rozsahem teplot tání. Dále bývá využívána jako dodatečná operace po pájení přetavením nebo pájení vlnou. U pájení vlnou z důvodu tvoření zkratů mezi vývody a v případě pájení přetavením se jedná převážně o rozdílnou pohltivost tepla menšími a většími součástkami. [6, 9]

1.4 Zařízení pro pájení skelnými pájkami

V této části bude popsána elektrická odporová pec a pec s horkovzdušnou konvekcí neboli přetavovací pec. Všechny pájecí pece a pájecí zařízení nejsou pro pájení skelných pájek vhodné. Proto byly vybrány dvě pece, které jsou často využívány.

1.4.1 Elektrická odporová pec

Teplo v elektrických odporových pecích vzniká průtokem proudu vodivým předmětem či v topných tělesech. Samotná pec se potom skládá z žáruvzdorné vyzdívky, která ohraničuje vnitřní prostor pece. Musí být teplotně odolná, nesmí reagovat s vsázkou, během změn teplot nesmí praskat, měla by mít dlouhou životnost a chemickou odolnost. Další částí je tepelná izolace, která musí být pórovitá. Skříň pece bývá nejčastěji zhotovena z ocelových plechů. Topná tělesa potom musí mít velkou rezistivitu, stále rozměry, malý teplotní součinitel odporu, stále elektrické vlastnosti a musí být také opracovatelné. Většinou se vyrábí z vodivých drátů, či pásů. [10]

Výhodou odporové pece je rovnoměrný odporový ohřev, rozsah teplot až do 1000 °C, možnost stlačení plynu pro zamezení tvorby dutin ve spoji. Nebo také umožňuje žíhání během procesu těsnění skla na kov (jen určité modely). [11][10]

1.4.2 Pec s horkovzdušnou konvekcí

Ohřev může být zajištěn křemennými články, které vyzařují tepelnou energii podle nastaveného teplotního profilu. Přesnost pájení se odvíjí od počtu teplotních zón, které jsou možné na panelu pece nastavit. Pec disponuje rychlým ohřevem a je vhodná pro bezolovnaté pájky. Pájený předmět se během procesu pájení pohybuje po pásovém

dopravníku, který má nastavenou rychlost. Často bývá součástí i systém odsávání a chladicí systém včetně ventilátorů. Je snadno ovladatelná. [12]

1.5 Příklady procesu pájení

Proces pájení je nedílnou součástí této práce. Zároveň ale každá aplikace vyžaduje lehce odlišný postup. Blíže bude popsáno pájení průchodky, kovarové slitiny a utěsnění optického vlákna.

1.5.1 Pájení kovarové slitiny

Povrchy jednotlivých vzorků jsou nejprve očištěny brusnými papíry a následně jsou ultrazvukově čištěny acetonu po dobu 10 minut a potom v alkoholu po dobu 15 minut. Po vysušení jsou vzorky umístěny do odporové pece, kde jsou nejdříve zahřáty na teplotu 900 °C rychlostí 15 °C/ min a ponechány po dobu jedné minuty pro předoxidaci na vzduchu. Kovar byl pájen na sklo DM305 a složení skelné pájky je Bi₂O₃ – ZnO – B₂O₃.

Aby se předešlo defektům v podobě vzduchových pórů způsobených vzduchovými mezerami v pájce během utěšňování, byla pájka nejprve vložena do speciálně navržené formy, ve které byla rozežhřátá na 200 °C rychlostí 10 °C/ min, tato hodnota byla udržována deset minut a potom byla teplota navýšena na 460 °C rychlostí 15 °C/ min a byla ponechána 30 minut v odporové komoře, která byla obklopena atmosférickým prostředím. Po následném ochlazení vzniknou sloupky skelné pájky.

Potom je skelná pájka umístěna na kovarovou slitinu. Teplota skelného přechodu je 350 °C a teplota měknutí 429 °C. Pro dosažení vhodné smáčecí charakteristiky bylo nutné pájet po dobu 20 minut při minimální teplotě 500 °C. Tato teplota zajistí vysokou pevnost spoje a požadovanou míru hermetičnosti. Během procesu docházelo ke krystalizaci pájky, která zvyšuje pevnost spoje, ale musí být kontrolovatelná. [13]

1.5.2 Utěsnění optického vlákna

Utěsnění optického vlákna, je čím dál častější pomocí skelných pájek. Tento proces je totiž méně finančně náročný z důvodu, že není potřeba následně spoj pokovovat, a navíc je spolehlivý. Světlo vyzařované polovodičovým laserem vyžaduje přesné zarovnání vlákna, jelikož i pohyb o zlomek mikronu výrazně snižuje výkon. V porovnání s metodou pájení nízkoteplotní těsnění eliminuje potřebu nákladné metalizace a všechny související problémy s teplotou a atmosférou, jelikož narozdíl od pájek sklo nevyžaduje neoxidovou atmosféru. Sklo navíc nabízí výhodu v podobě odolnosti vůči korozi.

Během samotného procesu se vlákno nejdříve odizoluje. Přes odizolované vlákno se následně umístí předlisek z pájecího skla, který spočívá na povrchu průchodky. Následuje lokalizovaný ohřev průchodky a zatavení.

Pro vytvoření kvalitního spoje je důležité zvolit správný objem předlisku, rozměry průchodky by měli co nejvíce zamezit vzniku nesymetrického napětí ve spoji. Dále

je zapotřebí minimalizovat smáčecí plochu průchodky a také dosáhnout u předeřevu teploty průchodky alespoň 320 °C, avšak zároveň nepřesáhnout teplotu 400 °C. [2]

1.5.3 Pájení průchodky

Elektrický vodič, který přenáší signály a elektrickou energii skrz kryt se nazývá průchodka. Pro některé aplikace musí být chráněna proti extrémním podmínkám a dále musí vykazovat vysokou spolehlivost. Právě v tomto případě se velice často uplatňuje těsnění sklo-kov. Sklo se taví jak na pouzdře, tak na vývodech, takže může fungovat jako vzduchotěsná bariéra a zároveň zajišťuje izolaci mezi pouzdem a vývody. [14]

Vytvoření silného těsnění vyžaduje silnou chemickou vazbu mezi sklem a kovem a také odpovídající koeficient tepelné roztažnosti. Výrobní proces vyžaduje odborné znalosti v oblasti skla, návrh obalů a průchodek, proces těsnění a pokovování.

Znalosti v oblasti skel jsou důležité pro správnou volbu všech materiálů, které jsou použity během procesu. Během samotného těsnícího procesu se potom tři samostatné

komponenty (pouzdro, těsnící sklo, průchodka) přemění v jedinou. Pájecí proces je přesně nastavený a specializovaný podle konkrétních požadavků. [15]

1.6 Vady pájených spojů

Mezi nejčastější vady spojů, které jsou pájeny pomocí skelné pájky jsou póry a trhliny. Póry zpravidla vznikají při příliš vysoké teplotě pájení zároveň s trhlínami. Pokud póry proniknou do celého spoje dochází k přehřátí pájky. Dále je prudce snížena výkonová zatížitelnost, pevnost a hermetičnost spoje. Póry mohou vznikat i za nízkých teplot, potom snižují schopnost difúze pájky. Při volbě správné teploty během procesu pájení, by měla být tvorba případných pórů v únosné míře a ke vzniku trhlín by nemělo docházet vůbec. [13]

1.7 Materiálová kompatibilita

Pro vytvoření spolehlivého hermetického těsnění jsou vybírány materiály pouzdra a skla s podobným koeficientem tepelné roztažnosti. Pevnost shodného těsnění je dána hlavně chemickou vazbou mezi sklem a oxidem vytvořeným na kovových částech. Spolehlivá těsnění se velmi často vyrábí s pouzdry a vývody z kovaru a borosilikátového skla. [16]

Dielektricky odolná keramika jako tvrdý porcelán, mastek, keramika Al_2O_3 a forsterit zabírá téměř celý rozsah teplotních roztažností, které nabízí technická skla. Tvrdý porcelán může být spojen s borosilikátovými skly, která jsou kompatibilní také s wolframem. Skleněné těsnění s korundovou keramikou a mastkem je možné pájet se speciálními skly jako je sklo 8436 od firmy Schott, které je kompatibilní také s niklem, kobaltem a železem. Zmíněné sklo je navíc odolné vůči sodným parám. Měkká skla s teplotní roztažností kolem $9 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ jsou vhodné pro těsnění s fosferitem. [17]

Při výrobě hermetických pouzder se používají také kovy jako titan a hliník. Hliník má vysokou tepelnou vodivost a je velmi lehký. Titan se volí namísto hliníku v případech, kdy potřebujeme materiál s nižším CTE. Oba typy materiálů jsou hermetické i při náročných tepelných cyklech. Pomocí laserového svařování lze integrovat stejnosměrné rádiové konektory, které eliminují selhání spoje z důvodu únavy pájky a umožňují opravy pouzder. [18]

Tabulka 1.3 Kompatibilní kovové materiály podle hodnoty CTE skelné pájky [1]

CTE skelné pájky [$^{\circ}\text{C}^{-1}$]	kompatibilní materiály
$<(39-42) \cdot 10^{-7}$	wolfram
$<(45-51) \cdot 10^{-7}$	molybden
$<(48-62) \cdot 10^{-7}$	kovar
$<(85-105) \cdot 10^{-7}$	slitiny obsahující Fe-Ni-Cr
$<(91-100) \cdot 10^{-7}$	měď a platina
$<(110-130) \cdot 10^{-7}$	železo
$>130 \cdot 10^{-7}$	železo

1.7.1 Kompatibilita slitiny kovu

Jak už jednou bylo uvedeno, jedná se o slitinu železa, niklu a kobaltu. Mezi jeho největší přednosti patří to, že koeficient teplotní roztažnosti je stejný jako u skla a keramiky. Jelikož u většiny kovů je rychlost tepelné roztažnosti natolik odlišná od rychlosti tepelné roztažnosti skla, že tyto kovy nemohou být utěsněny sklem. Během chlazení by s největší pravděpodobností došlo ke zničení spoje. Slitina kovu se spojuje se sklem přes prostřední oxidovou vrstvu, která je tvořena niklem a kobaltem. Pevnost spoje je závislá na její tloušťce. Redukcí kobaltu můžeme docílit toho, že spoj bude odolný na širokém rozsahu teplot. Kovar je vhodný pro těsnění sklo – keramický kov, který se dá využít ve vakuových trubicích, mikrovlnných trubicích, rentgenových trubicích, tranzistorech nebo obvodech s integrovanými diodami. [19]

Kovar je kompatibilní s borosilikátovým sklem, se kterým je také často spojován. Obecně je vhodné kovar pájet se skly, které mají teplotu měknutí mezi 450–800 $^{\circ}\text{C}$. Z tabulky 1.3 lze vyčíst, že je kovar vhodný pro pájení se skelnými pájkami, které mají hodnotu CTE v rozmezí $(48-62) \cdot 10^{-7} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$. Kromě borosilikátových skel, můžeme kovar spojovat i se Zn-V (zinek-vanad) skly. [1]

1.7.2 Kompatibilita kryoflexu

Kryoflex je polykrystalická keramika, která byla vyvinuta firmou Hermetic Solutions Group pro spojování kovu s keramikou. Spoj s tímto materiálem je chemicky i mechanicky odolný. Využití je v hermetických konektorech, které odolávají vysokým teplotám, tlakům a různým chemikáliím. Kryoflex lze pomocí různých úprav a nastavení využít pro širokou škálu teplotního rozsahu.

Pomocí kryoflexu se dají těsnit slitiny mědi, hliník, titan a platina. Konektory s mědí mají výbornou proudovou zatížitelnost, hliníkové jsou zase robustní a zároveň lehké a lze je použít s měděnými vodiči. Titanové konektory se zase vyznačují velkou pevností. Výhoda kryoflexu je i to, že je odolný vůči vlhkosti. [20]

1.7.3 Kompatibilita pájek G018-266 a G018-205

Jedná se o dvě skelné pájky od firmy Schott. Obě jsou dostupné v laboratoři. Pro usnadnění následné práce s nimi jsou níže blíže popsány a charakterizovány.

Pájka G018-266 patří mezi skelné pájky, které jsou určeny pro vysokoteplotní aplikace. Teplota pájení se pohybuje okolo 770 °C a maximální pracovní teplota je potom 530 °C. Nejvhodnější materiál pro těsnění s touto pájkou je korundová keramika. Koeficient teplotní roztažnosti této pájky je $6,9 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ u korundové keramiky je tato hodnota $7,2 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Teplota tání Al_2O_3 je 2054 °C, což je o mnoho vyšší než teplota pájení G018-266. [4]

Pájka G018-205 patří mezi pasivační skla. Jedná se o typ Pb-Zn-B tedy zinečnato – borité sklo a její hlavní aplikace jsou spékané skelné diody a obecně těsnění pomocí skla. Koeficient teplotní roztažnosti této skelné pájky je $4,45 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Teplota pájení je potom 650 nebo 690 °C podle aplikace. [4]

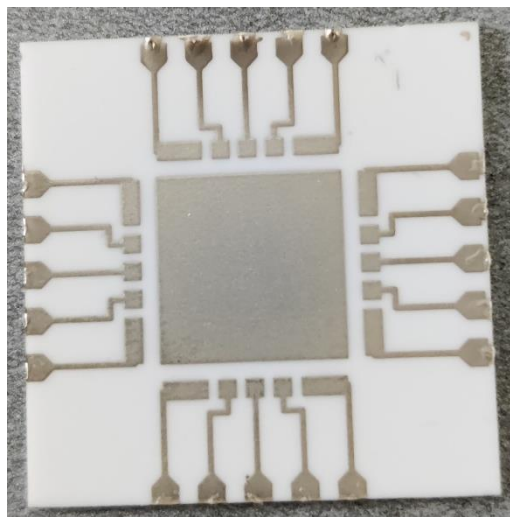
Substrát, se kterým bude v praktické části pracováno je z korundové keramiky. Na základě zmíněných informací se tedy jeví, že bude vhodnější skelná pájka G018-266. Proto bude experiment a optimalizace procesu provedena právě pro tuto skelnou pájku.

2 PRAKTICKÁ ČÁST

V praktické části bude popsán návrh pouzdra a optimalizace procesu pájení skelné pájky typu G018-266 od firmy Schott. Pájka G018-205 byla z experimentu vyřazena z důvodu horší kompatibility s korundovou keramikou. Následně bude také ukázána kontrola síly pájeného spoje ve stříhu, inspekce pomocí rentgenu a postup realizace navrženého pouzdra.

2.1 Návrh pouzdra

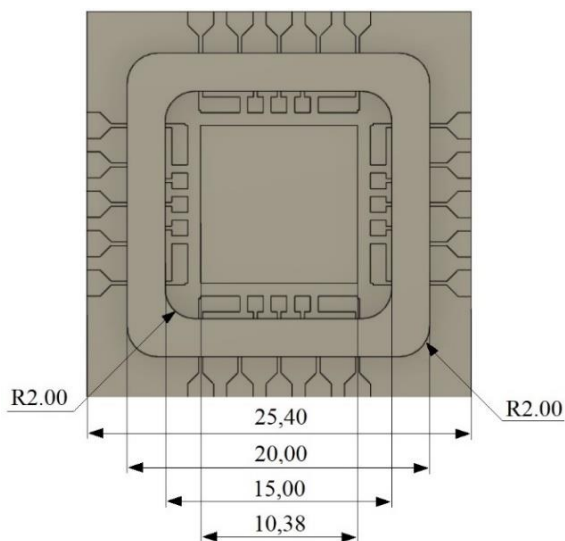
Na obrázku 2.1 je zobrazen keramický substrát s natisknutými tlustovrstvými vodivými cestami a vývody (čip expandér). Uprostřed je prostor pro umístění čipu, který bude následně kontaktován. Pro tuto práci není důležitá funkce čipu, ale spíše jeho ochrana v podobě pouzdra. Substrát, na kterém je expandér má rozměry 25,4 x 25,4 mm, a prostor pro umístění čipu je 10,38 x 10,38 mm.



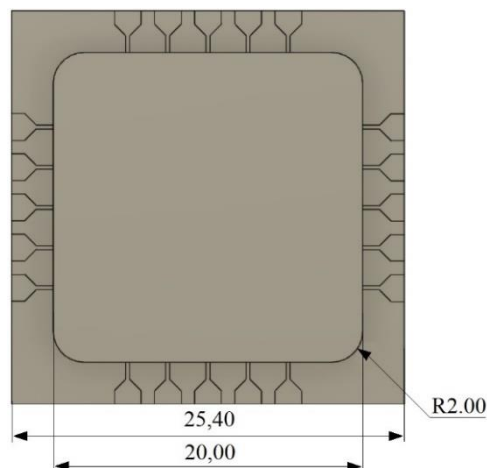
Obrázek 2.1 Keramický substrát, na kterém bude realizováno pouzdro

Na obrázku 2.2 a 2.3 je návrh víka a rámečku budoucího pouzdra, které bude realizováno ze substrátů z korundové keramiky. Výkresy nejsou v poměru. Všechny rozměry uvedené na obrázku jsou v mm a veškeré návrhy byly zhotoveny v programu Fusion. Jelikož je možné pomocí skelných pájek spojovat i keramiku s keramikou, pouzdro bude vytvořeno pájením jednotlivých rámečků na sebe. Na závěr bude na hotový rámeček připájeno ještě víko. Víko ale již nebude připájeno pomocí skelné pájky, kvůli příliš vysoké teplotě pájení, která by byla pro nakontaktovaný čip fatální.

Původně bylo zamýšleno, že rámečky budou vyřezány pomocí vodního paprsku ve firmě Awac. Z toho důvodu jsou v návrhu zaoblené hrany rámečku i víka. Bohužel nakonec nebylo možné řezání vodním paprskem realizovat, a proto bylo řezání rámečků a vík provedeno pomocí laseru.

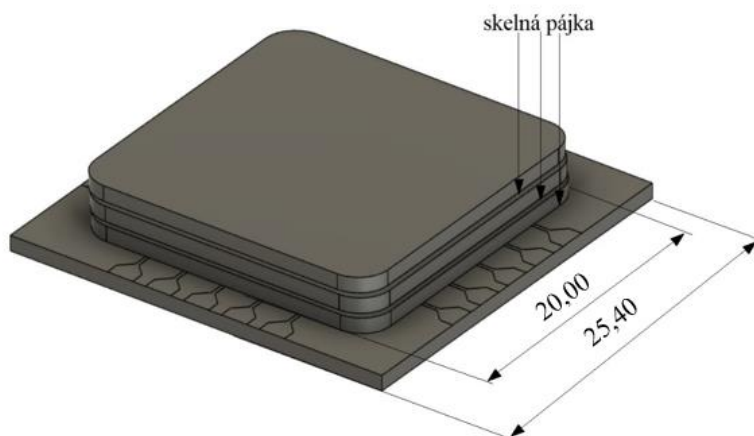


Obrázek 2.2 Návrh rámečku pouzdra
(rozměry jsou v mm)



Obrázek 2.3 Návrh víka pouzdra
(rozměry jsou v mm)

Na obrázku 2.4 je zobrazen 3D model budoucího pouzdra. Nejprve budou pájeny jednotlivé rámečky na sebe. Skelná pájka bude mezi substrátem s expandérem a rámečkem a pak mezi jednotlivými rámečky, stejně jako je vyznačeno na obrázku 2.4. Pouzdro na obrázku je tvořeno dvěma rámečky o tloušťce 1 mm. Po zapájení celého rámečku může být nakontaktován čip. Nesmí být nakontaktován dříve z důvodu vysoké pájecí teploty pájky G018-266. Proto bude na povrchu horního rámečku a spodní straně víka natisknuta tlustovrstvá vodivá stříbrná pasta Paron W38. Samotné pájení víka potom bude provedeno pomocí pájecí slitiny.



Obrázek 2.4 3D model pouzdra

2.2 Optimalizace procesu pájení

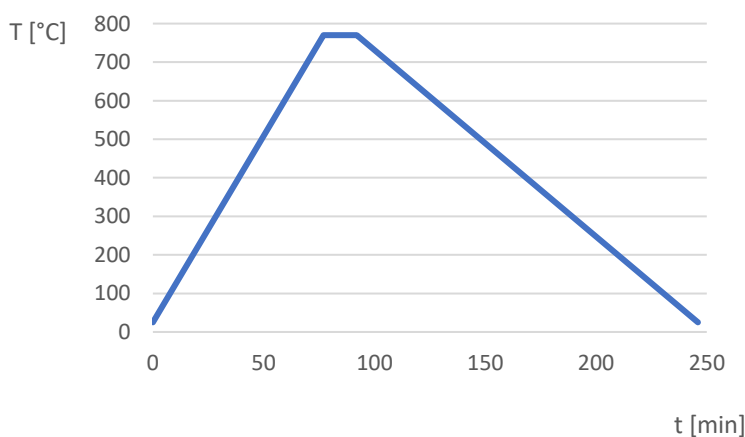
Skelná pájka G018-266 od firmy Schott je dostupná ve formě prášku a pro pájení je míchána s akrylovým binderem neboli pojivem. Vzhledem k tomu, že výrobce neuvádí vhodný poměr míchání pájky s pojivem, byla optimalizace pájecího procesu provedena namícháním tří různých hustot pájky, kterými byly připájeny jednotlivé rámečky na keramický substrát. Rámečky pak ještě byly pájeny odlišným množstvím pájky, aby mohlo být vyhodnoceno jakou hustotu a jaké množství pájky bude nejvhodnější použít. V tabulce 2.1 jsou pak zobrazeny konkrétní hodnoty jednotlivých poměrů pájky s pojivem udávající hustoty pájky.

Tabulka 2.1 Poměry míchání pojiva a pájky pro dosažení požadovaných hustot

Hustota pájky	Poměr pájka:pojivo
nízká	3:2
střední	9:5
vysoká	12:5

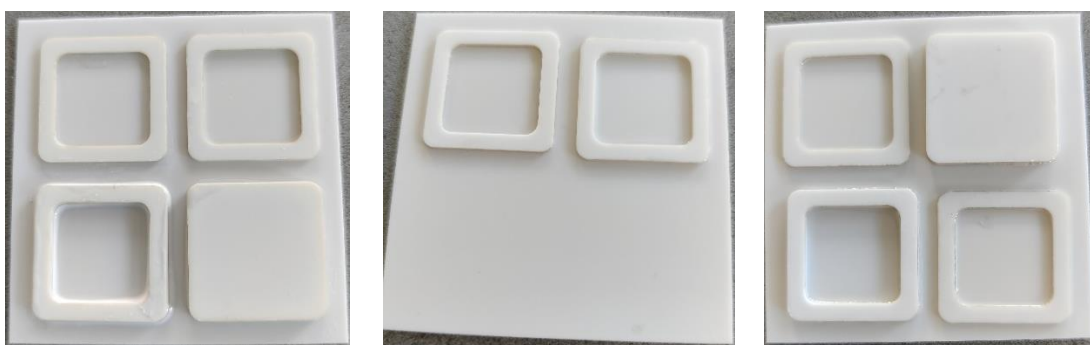
Jednotlivé vzorky byly zhotoveny následujícím způsobem. Nejprve byla namíchána požadovaná hustota pájky, která byla nanesena na daný rámeček a ten byl položen na keramický substrát. Po namíchání všech tří hustot pájky a nanesení pájky na požadované rámečky, byly veškeré zhotovené vzorky zapájeny v muflové peci typu LMH 07/12 od firmy LAC, která má topné spirály umístěné mimo komoru pece a jsou kryty odolnou keramickou muflí. Výhoda této pece je, že je vhodná pro pájení agresivních součástek, a navíc její maximální nastavitelná teplota je 1150 °C, což je pro skelnou pájku G018-266, která má teplotu pájení 770 °C, vyhovující. [21]

Na obrázku 2.5 je zobrazen pájecí profil doporučený výrobcem. Rychlost předehřevu byla nastavena na 10 °C/min. Maximální teplota pájení skelné pájky G018-266 je, jak už bylo zmíněno, 770 °C. Tato teplota byla potom držena po dobu 15 minut. Nakonec byla nastavena rychlost chlazení na 5 °C/min.



Obrázek 2.5 Teplotní profil skelné pájky G018-266

Na obrázku 2.6 lze vidět již zapájené rámečky na keramickém substrátu. Vlevo je substrát, na kterém jsou rámečky připájeny pájkou s nízkou hustotou, uprostřed se nachází substrát s rámečky zapájenými skelnou pájkou se střední hustotou a pro pájení rámečků vpravo byla namíchána pájka dle poměru odpovídajícímu vysoké hustotě pájky. Byly vyzkoušeny různé kombinace malého množství pájky, velkého množství pájky, jednoho nebo dvou rámečků na sebe. Také byly pájeny dva rámečky i s víkem, jelikož tímto způsobem bude zhotoveno výsledné pouzdro. Již během této fáze optimalizace bylo zjištěno, že pájka s nízkou hustotou nebude příliš vhodná, protože když je rámeček s pájkou položen na substrát z korundové keramiky, nízká hustota pájky způsobí, že se rámeček po substrátu při manipulaci pohybuje. Tato skutečnost je pro případ expandéru nevhodná. Mohlo by tak dojít k zapájení plošek, které ale musí zůstat vodivé.



Obrázek 2.6 Připájené rámečky a víka na keramický substrát

Po zapájení proběhla optická kontrola zapájených spojů pomocí mikroskopu. Na obrázku 2.7 vlevo je zobrazen rámeček, který byl připájen velkým množstvím pájky. U všech daných hustot skelné pájky není vhodné její velké množství, jelikož při zapájení dojde k jejímu rozlití po substrátu a mohlo by tak dojít k zapájení pájecích plošek expandéru skelnou pájkou. Uprostřed a vpravo je pak zobrazen profil dvou rámečků a dvou rámečků s víkem po zapájení.



Obrázek 2.7 Kontrola připájených rámečků pomocí mikroskopu

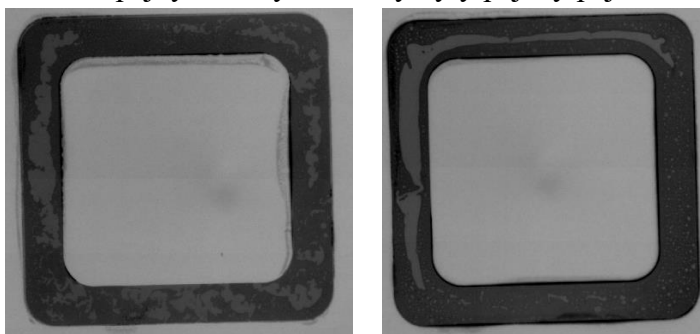
Následně proběhla inspekce pomocí rentgenu daných vzorků. Všechny následující fotografie byly pořízeny na zařízení XD7600 NT Ruby FP od firmy Nordson DAGE. Na obrázku 2.8 jsou zobrazeny vzorky pájené pomocí pájky s nízkou hustotou. Vlevo se nachází jeden rámeček, který je připájen malým množstvím pájky. Uprostřed jsou dva

rámečky připájené na substrát velkým množstvím pájky a vpravo jsou potom dva rámečky s víkem připájené středním množstvím pájky.



Obrázek 2.8 Kontrola rámečků připájených pájkou s nízkou hustotou pomocí rentgenu

Na obrázku 2.9 lze vidět vlevo jeden rámeček zapájený pomocí malého množství pájky a vpravo je jeden rámeček, který byl na substrát připájen pomocí středního množství pájky. Oba tyto vzorky byly pájeny pájkou se střední hustotou.



Obrázek 2.9 Kontrola rámečků připájených pájkou se střední hustotou pomocí rentgenu

Vlevo na obrázku 2.10 je jeden rámeček připájený na substrát malým množstvím pájky s vysokou hustotou, uprostřed jsou dva rámečky pájené velkým množstvím pájky a vpravo jsou dva rámečky i s víkem pájené středním množstvím pájky.



Obrázek 2.10 Kontrola rámečků připájených pájkou s vysokou hustotou pomocí rentgenu

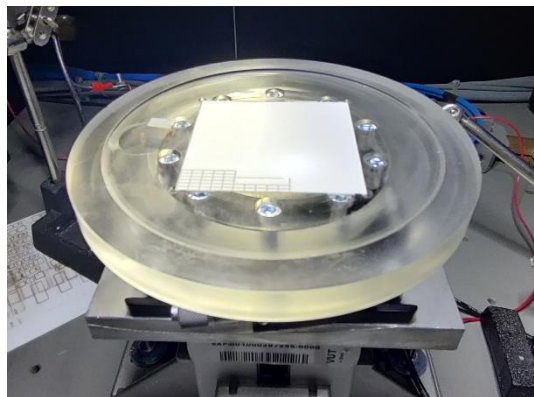
Porovnáním všech obrázků z rentgenu lze zjistit, že nejvíce vhodná bude pájka s nejvyšší hustotou, jelikož spoj vytvořený hustou pájkou neobsahuje trhliny v pájce a je v něm také méně vzduchových dutin. Naopak ve spojích pájky s nejnižší hustotou je poměrně vysoké množství trhlín. Dále bylo zjištěno, že nejvhodnější bude střední množství pájky, protože malé množství je nedostatečné pro vytvoření kvalitního spoje a příliš velké množství pájky může způsobit vytečení skelné pájky na pájecí plošky.

Při míchání skelné pájky s pojivem bude tedy nejvhodnější přidat co nejmenší množství pojiva, jelikož bylo vyzorováno, že vyšší podíl pojiva způsobuje vady v pájeném spoji. Zároveň je ale třeba přidat takové množství pojiva, aby se pájka na rámečky dobře nanášela. Nanášení pájky s příliš vysokou hustotou je obtížné.

2.3 Kontrola síly pájeného spoje ve stříhu

Dalším experimentem byla kontrola síly pájeného spoje ve stříhu. Vzhledem k tomu, že skelná pájka je nanášena po celé ploše rámečku, či jakéhokoliv jiného vzorku, byla pro tento experiment zvolena velikost jednotlivých vzorků odpovídající velikosti rezistoru 1206. Jedná se tedy o obdélníky o rozměrech 3,2 x 1,6 mm. Větší vzorky by mohlo být obtížné odtrhnout, jelikož by byla potřeba mnohem větší síla.

Nejprve byl korundový substrát naryhován pomocí laseru. Vzorky byly řezány YAG laserem Auriel, který se v laboratoři používá na trimování rezistorů. Na obrázku 2.11 je zobrazen průběh řezání daných vzorků. Po naryhování vzorků laserem bylo nutné keramický substrát nalámat dle naznačených linií.



Obrázek 2.11 Průběh řezání keramického substrátu pomocí laseru na jednotlivé vzorky

Zhotovené vzorky korundové keramiky byly připájeny na keramický substrát pomocí pájky G018-266 od firmy Schott. Bylo připájeno celkem 33 vzorků, z toho každých 11 vzorků bylo pájeno jednou ze tří měřených hustot pájky. Výsledný vzorek pro měření síly ve stříhu lze vidět na obrázku 2.12. Vzorky připájené pájkou s nejmenší hustotou jsou vlevo, se střední hustotou uprostřed a s nejvyšší hustotou vpravo.



Obrázek 2.12 Vzorky pro měření síly ve stříhu připájené třemi danými hustotami skelné pájky

Následně byly jednotlivé vzorky trhány pomocí střížné hlavy přístroje DAGE PC2400 pro kontrolu síly spoje ve stříhu. Testovací rychlost byla nastavena na 200 um/s a maximální síla stříhu byla nastavena na 350 N. V tabulce 2.2 jsou uvedeny hodnoty naměřených sil spojů v Newtonech. Odlišné hodnoty síly u jedné hustoty pájky mohou být způsobeny rozdílným množstvím pájky na vzorku nebo například nehomogenitou pájky. Ve třech případech se nepodařilo vzorek odtrhnout, proto byly tyto hodnoty označeny červeně a z dalších výpočtů budou vyřazeny. Ze zbylých hodnot byla vypočítána průměrná síla spoje ve stříhu a směrodatná odchylka pro všechny dané hustoty.

Tabulka 2.2 Naměřené hodnoty síly spoje ve stříhu jednotlivých hustot pájek

	Nízká hustota pájky	Střední hustota pájky	Vysoká hustota pájky
F [N]	54,80	319,98	343,15
	103,39	331,41	186,20
	86,64	74,03	120,30
	62,68	173,56	204,66
	112,31	185,26	97,21
	159,63	199,69	114,70
	290,82	272,66	212,96
	259,76	201,20	130,60
	114,66	99	123,24
	53,45	147,12	195,11
	79,46	75,30	147,71

Pro výpočet průměru byla použita rovnice:

$$\bar{F} = \frac{\sum_{i=1}^n F_i}{n}, \quad (1)$$

kde \bar{F} představuje průměrnou hodnotu síly spoje, F_i je daná naměřená hodnota síly a n je celkový počet naměřených hodnot.

Pro výpočet směrodatné odchylky byla použita rovnice:

$$s = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (F_i - \bar{F})^2}, \quad (2)$$

kde s představuje směrodatnou odchylku, F_i danou naměřenou hodnotu síly, \bar{F} představuje průměrnou hodnotu síly spoje a N je celkový počet naměřených hodnot.

V tabulce 2.3 jsou vypočítané hodnoty průměrné síly spoje ve střihu a směrodatná odchylka pro jednotlivé hustoty sklené pájky. Nejnižší síla spoje byla naměřena u pájky s nejnižší hustotou, naopak nejvyšší síla pájeného spoje byla naměřena u pájky se střední hustotou. Směrodatné odchylky u všech hustot pájky jsou velké, mohlo to být způsobeno nerovnoměrným nanesením pájky na jednotlivé vzorky, nebo nedostatečnou homogenizací pájecí směsi. Nejmenší směrodatná odchylka je u pájky s nejvyšší hustotou.

Tabulka 2.3 Průměrná síla spoje ve střihu a směrodatná odchylka pro jednotlivé hustoty sklené pájky

Hustota pájky	nízká	střední	vysoká
\bar{F} [N]	111,79	189,02	153,87
s [N]	70,83	89,97	44,96

2.4 Sítotisk

Pro zhotovení navrženého pouzdra bude zapotřebí na horní rámeček a spodní stranu víčka natisknout vodivou tlustou vrstvou, jelikož víčko bude zapájeno pomocí pájecí slitiny. Nejprve bude popsána výroba předlohy na síto a následně bude objasněn proces tisku tlusté vrstvy.

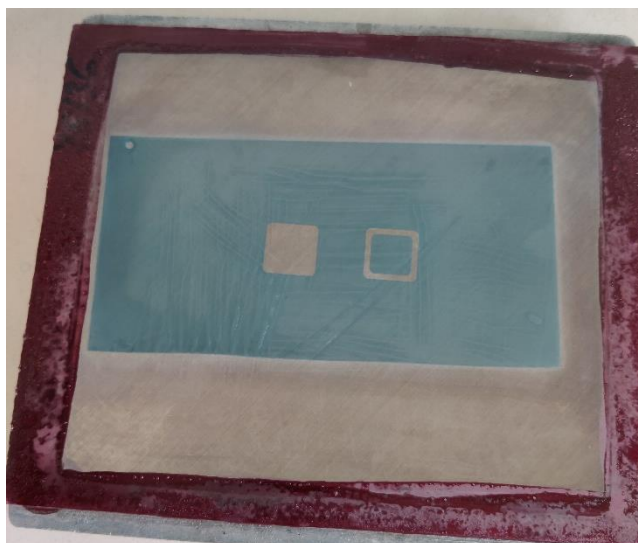
2.4.1 Výroba předlohy síta

Síto z nerezových vláken napnuté v hliníkovém rámu bylo nejprve očištěno lihem, aby bylo zbaveno mastnoty a nečistot. Po očištění bylo síto opláchnuto pod tekoucí vodou. Následně bylo nutné se přesunout do temné komory vzhledem k tomu, že docházelo k práci s fotocitlivým filmem. [22]

Nejdříve bylo síto namočené v destilované vodě, namáčení probíhalo tak dlouho, dokud se na sítu nevytvořil souvislý film vody. Na okapané síto byl tmavou stranou přiložen fotocitlivý film, který následně pomocí válečku na síto lépe přilne. Celé síto pak bylo vysušeno studeným vzduchem. Po vysušení byla sejmuta ochranná folie z fotocitlivého filmu. Poté bylo umístěno síto do vakuového kopírovacího rámu od firmy Cima Zlín se zdrojem UV záření. Na skleněnou desku byla položena filmová předloha a na ni bylo následně položeno síto. Filmová předloha představovala obrys rámečku a víka vyplněné černě a byla vytištěna ve firmě G5 Studio. Vakuový kopírovací rám

je opatřen vývěvou, která odčerpává vzduch mezi skleněnou deskou a antistatickou pryžovou membránou. Tím je zajištěno rovnoměrné, rychlé a velmi pevné přitlačení předlohy na síto. Do rámečku síta byla přiložena tkanice od ústí vývěvy. Následně byla zapnuta vývěva a aktivována UV lampa. Během osvitů došlo k vytvrzení osvětlených částí filmu. [22, 23]

Po vyjmutí síta z vakuového kopírovacího rámu bylo síto vloženo do destilované vody a neosvícená část fotocitlivého materiálu byla odplavena. Vytvořenou šablonu pro sítotisk lze vidět na obrázku 2.13. Po vysušení lze vložit hotové síto do sítotiskového stroje.



Obrázek 2.13 Hotové síto určené pro tisk tlusté vrstvy na rámeček a víko

2.4.2 Zhotovení motivu pomocí sítotisku

Sítotisk byl proveden na poloautomatickém přístroji od firmy Aurel model C880. Po připevnění síta a nastavení jednotlivých parametrů (odtrh, poloha síta vůči keramickému rámečku či víku, přítlak a úhel stěrky) mohl být sítotisk proveden. Rámečky a víka byly při tisku drženy pomocí vakua ve stejné poloze na stolku. Na všechny rámečky a víka byla natisknuta vrstva tlustovrstvé vodivé stříbrné pasty Paron W38.

Po natisknutí jednotlivých tlustých vrstev probíhal nejprve leveling, kdy se pasta na substrátu sjednotí. Síto bylo nutné co nejdříve očistit Xylenem od zbylé pasty. Potom byly jednotlivé vzorky vysušeny v sušicí peci Memmert Verkon na 125 °C po dobu 10 minut. A pak byl proveden výpal v průběžné peci BTU TFF51. Teplota výpalu byla nastavena na 850 °C po dobu 10 minut, celý profil potom trval hodinu. Na obrázku 2.14 a 2.15 jsou zobrazeny již vypálené rámečky a víka s natisknutou vodivou tlustou vrstvou.



Obrázek 2.14 Natisknuté rámečky



Obrázek 2.15 Natisknutá víčka

2.5 Zhotovení navrženého pouzdra

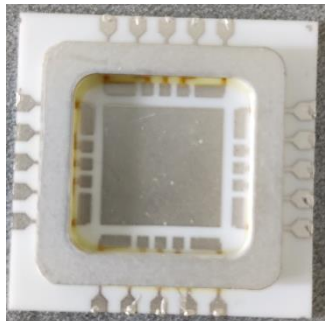
Po provedení optimalizace procesu pájení sklené pájky G018-266 od firmy Schott a natisknutí tlusté vodivé vrstvy na horní rámeček a spodní stranu víka. Je třeba zhotovit pouzdro, které bylo navrženo v kapitole 2.1.

2.5.1 První prototyp

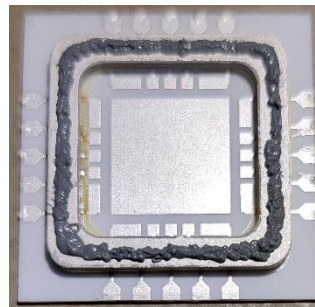
Nejprve bylo potřeba zvolit vhodný poměr míchání prášku skelné pájky s pojivem. Vzhledem ke skutečnostem vyplývajícím z optimalizace procesu pájení byla namíchána skelná pájka o hustotě mezi střední a nejvyšší hustotou, pro dosažení co nejmenšího počtu vad spoje a co největší síly spoje.

Skelnou pájkou s touto hustotou byly na čip expandér připájeny dva rámečky. Teplotní profil výpalu ve vysokoteplotní peci typu LMH 07/12 od firmy LAC byl nastaven stejně jako v kapitole 2.2, která je věnována právě optimalizaci procesu pájení.

Po zapájení rámečku pouzdra proběhla optická kontrola a také bylo prověřeno, zda nedošlo k zapájení některé z plošek. Měření vodivosti jednotlivých vývodů expandéru ověřilo, že všechny vývody zůstaly vodivé. Zmíněný čip expandér s připájenými rámečky je na obrázku 2.16. Vzhledem k tomu, že vše bylo v pořádku, bylo připájeno na rámeček také víčko. Nejprve byla na rámeček nanesena SAC pasta, což je zobrazeno na obrázku 2.17. Následně bylo na rámeček přiloženo víčko. Tímto způsobem připravené pouzdro bylo zapájeno na kontaktní pájecí desce, která byla vyhřátá na 250 °C. Vzhledem k tomu, že bylo pouzdro na vyhřátou desku položeno substrátem s expandérem, na kterém byly dva rámečky z korundové keramiky a až na nich pájené víčko, prohřátí bylo nedostatečné a bylo nutné zvýšit teplotu pro přetavení pájecí pasty. Hotové pouzdro lze vidět na obrázku 2.18. Následně byla provedena inspekce pouzdra pomocí rentgenu.



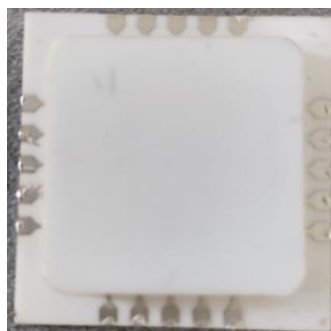
Obrázek 2.16 Čip expandér s připájenými rámečky



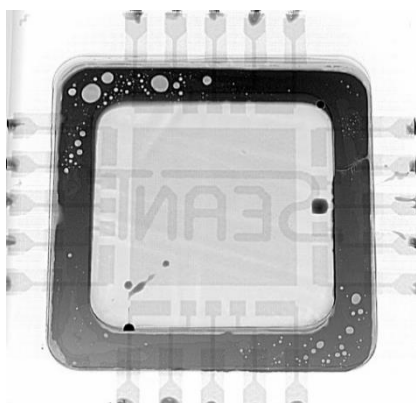
Obrázek 2.17 Nanesení pájecí pasty na horní rámeček



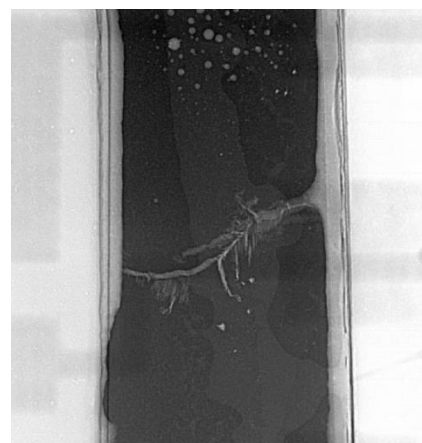
Obrázek 2.18 Hotové pouzdro



Na obrázku 2.19 a 2.20 jsou fotografie, které byly stejně jako v kapitole 2.2 pořízeny na zařízení XD7600 NT Ruby FP od firmy Nordson DAGE. Ve spoji můžeme vidět spoustu vzduchových bublin, které jsou ale uzavřené, tudíž nezpůsobují žádný velký problém spoje. Problémem je pak trhlinka, která je přibližena na obrázku 2.20. K trhlině mohlo dojít během komplikovanějšího procesu pájení na ohřevné desce.



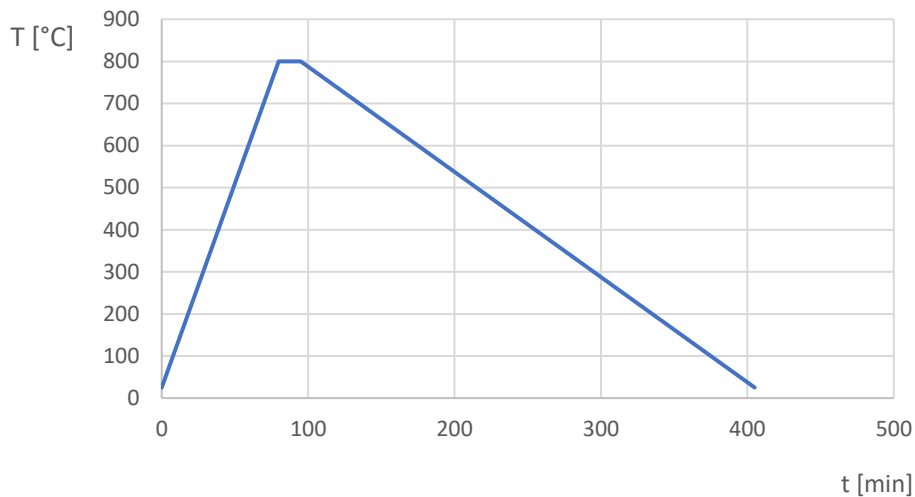
Obrázek 2.19 Kontrola pouzdra pomocí rentgenu



Obrázek 2.20 Detail trhliny ve spoji

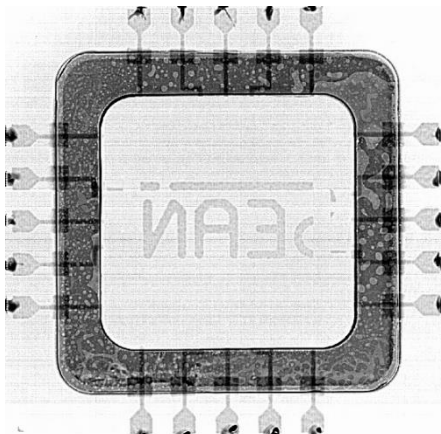
2.5.2 Druhý prototyp

U druhého prototypu pouzdra nebyl změněn poměr míchání skelné pájky, ale byl pozměněn pájecí profil. Byla zvýšena teplota přetavení na 800 °C, aby došlo k lepšímu prohřátí pájky. Tato teplota nesmí být příliš vysoká s ohledem na tlustou vrstvu expandéru, která byla vypálena na 850 °C. Následně pak bylo zpomaleno chlazení na 2,5 °C/min, aby bylo zamezeno vadám ve spoji v důsledku rychlých změn teploty. Všechny ostatní hodnoty pájecího profilu zůstaly stejné jako v předchozím případě. Na obrázku 2.21 je potom zobrazen nastavený pájecí profil.

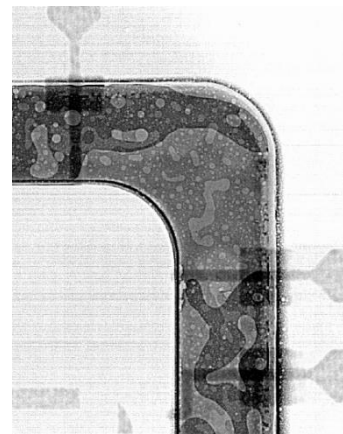


Obrázek 2.21 Upravený pájecí profil skelné pájky G018-266

Na obrázku 2.22 je rentgenový snímek zapájeného rámečku výsledného pouzdra. Největším problémem je velká vzduchová dutina, která způsobuje netěsnosti pouzdra. Zmíněný defekt je zobrazen na obrázku 2.23. Vzniku těchto vzduchových dutin by šlo zabránit homogenizací pájecí pasty. Avšak vzhledem k nízkému množství materiálu potřebného k zapájení jednoho pouzdra, je homogenizace těžko realizovatelná.

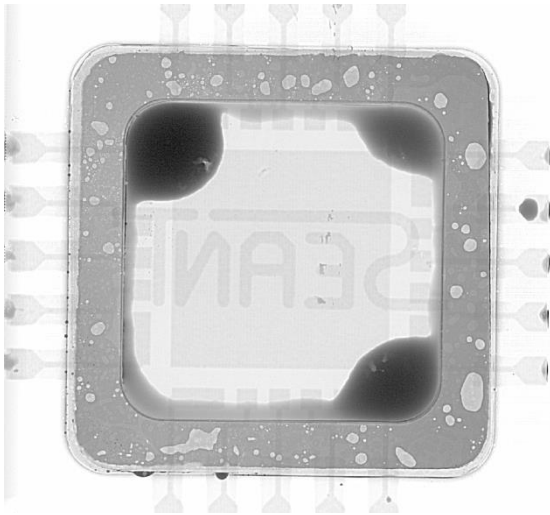


Obrázek 2.22 Kontrola rámečku druhého pouzdra pomocí rentgenu



Obrázek 2.23 Detail vzduchové dutiny ve spoji

Následně bylo k rámečku připájeno i víčko, tentokrát bylo pouzdro na ohřevnou desku položeno víčkem dolů, pro rychlejší prohřátí spoje a lepší zapájení. Na obrázku 2.24 lze vidět výsledek inspekce druhého prototypu pouzdra pomocí rentgenu. Žádná trhlinka již ve spoji není. Při pájení víčka bylo nanášeno příliš mnoho pájecí pasty, a tak došlo k jejímu vytečení, což by ale nemělo způsobovat příliš velký problém, protože vzhledem k pájení víčkem dolů by měla být slitina vytečená pouze na víku pouzdra.



Obrázek 2.24 Upravený pájecí profil skelné pájky G018-266

2.6 Shrnutí

Cíl v podobě realizace navrženého pouzdra byl splněn. Dále bylo zjištěno, že nejvhodnější z hlediska pevnosti spoje byla střední hustota pájky. Co se týče vad pájeného spoje jevila se nejlépe pájka s nejvyšší hustotou. Při realizaci keramického pouzdra bylo zjištěno, že bylo vhodnější pájet pouzdro na ohřevnou desku víčkem dolů, jelikož se tak lépe a rychleji prohřálo a zapájelo. Zpomalení chlazení rámečku během procesu pájení bylo také přínosem. Při provedení homogenizace pájecí směsi, by mohlo dojít k zamezení vzniku vzduchových dutin a pouzdro by pak mělo dobré těsnicí vlastnosti. Avšak vzhledem k malému množství použité pájecí směsi je způsob strojové homogenizace nerealizovatelný.

ZÁVĚR

V bakalářské práci byla provedena optimalizace procesu pájení skelné pájky G018-266 od firmy Schott. Dále byl popsán návrh pouzdra, jeho následná realizace a také měření síly pájeného spoje ve stříhu. Skelná pájka G018-205 byla z experimentu vyřazena kvůli velkému rozdílu CTE pájky a korundové keramiky a také kvůli celkově horší kompatibilitě se substrátem Al_2O_3 o čistotě 96 %. Zatímco skelná pájka G018-266 je pro pájení s korundovou keramikou vhodná. Rozdíl CTE těchto materiálů je $3 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$, což je vyhovující hodnota pro průměrné těsnění. Navíc je vhodné, když je CTE pájky ($6,9 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$) nižší než CTE pájeného materiálu ($7,2 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$), což je také splněno.

Vzhledem k tomu, že výrobce neuvádí poměr míchání pájky ve formě prášku s akrylovým pojivem, bylo nutné proces pájení optimalizovat. Byly namíchány tři rozdílné hustoty pájek. Těmito třemi typy pájek pak byly připájeny rámečky a víka na korundový substrát za použití různého množství pájky. Následně byly všechny vzorky zapájeny. Pájecí profil měl nastavenou rychlost přehřevu na $10 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$, teplotu pájení na $770 \text{ }^\circ\text{C}$, tato teplota byla v peci držena po dobu 15 minut a zvolená rychlost chlazení byla $5 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$. Po optické kontrole bylo vyhodnoceno, že příliš velké množství pájky nebylo vhodné, jelikož by mohlo dojít k zapájení plošek čip expandéru, na kterém bylo zhotoveno výsledné pouzdro. Po provedení inspekce bylo dále zjištěno, že nejméně vhodná se jeví pájka s nejnižší hustotou, jelikož ve spojích tvořených právě tímto typem pájky se objevily trhliny a bylo zde nejvíce vzduchových dutin. Měření síly spojů, vytvořených pomocí skelných pájek daných hustot, ve stříhu ukázalo, že největší pevnost spoje vykazovala pájka se střední hustotou.

Pouzdro čipu bylo navrženo tak, že jsou nejprve pájeny jednotlivé rámečky na sebe pomocí skelné pájky G018-266. Víko rámečku je potom zapájeno pomocí pájecí slitiny, jelikož čip, který by byl umístěn uvnitř pouzdra, není možné vyhrát na $770 \text{ }^\circ\text{C}$. Proto byla natisknuta pomocí síťotisku na horní rámeček a spodní stranu víka vrstva tlustovrstvé vodivé stříbrné pasty Paron W38.

Vzhledem k získaným poznatkům byla při realizaci prvního prototypu navrženého keramického pouzdra zvolena hustota pájky mezi střední a nejvyšší změřenou hustotou. Bylo tak rozhodnuto s ohledem na co nejvyšší pevnost pájeného spoje a co nejmenší možnost vzniku vad ve spoji. Víko bylo připájeno na ohřevné desce, kdy bylo pájené pouzdro na desce položeno expandérem dolů, kvůli obtížnému prohrátí všech vrstev pouzdra bylo nutné zvýšit teplotu nad $250 \text{ }^\circ\text{C}$. Po inspekci pomocí rentgenu byla zpozorována trhlina v pájeném spoji. Tato trhlina zřejmě vznikla během pájení víka.

U druhého prototypu pouzdra byl změněn pájecí profil skelné pájky. Teplota pájení byla nastavena na $800 \text{ }^\circ\text{C}$ a rychlost chlazení byla zpomalena na $2,5 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$. Ostatní parametry zůstaly stejné. Tentokrát byla provedena inspekce pomocí rentgenu již po zapájení rámečku pouzdra, kde byla zpozorována velká vzduchová dutina, která značila netěsnost pouzdra. Víko pak bylo zapájeno tak, že na ohřevnou desku bylo

pouzdro položeno víkem dolů. Díky tomu proces pájení víka proběhl bez komplikací a teplota pájení 250 °C byla dostačující. Po další kontrole pomocí rentgenu již nebyla pozorována žádná trhлина ve spoji keramického pouzdra. Při pájení víka bylo nanášeno příliš velké množství pájecí pasty, což způsobilo její vytečení. Vzhledem k tomu, že při procesu pájení víka bylo pouzdro otočeno víkem dolů, měla by být pájecí slitina pouze na víku pouzdra, což by nemělo způsobovat problémy.

Realizované pouzdro by mělo dosahovat dobré pevnosti vzhledem k výsledkům měření síly pájeného spoje ve stříhu u jednotlivých vzorků s různým poměrem míchání. Výhoda tohoto pouzdra je v tom, že lze dle konkrétního čipu, který bude umístěn na čip expandér, zvolit jeho výšku, která závisí pouze na počtu připájených rámečků. Kdyby se podařilo vyřešit způsob homogenizace pájecí směsi sklené pájky a pojiva, bylo by možné dosáhnout pouzdra bez vzduchových dutin. V tomto případě by se mohlo jednat o hermetické pouzdro, což by bylo nutné ověřit změřením hermetičnosti. Pokud by však byla hermetičnost dostačující, jednalo by se o nepříliš nákladný způsob výroby hermetického pouzdra.

LITERATURA

- [1] FRIESER, R. G. A REVIEW OF SOLDER GLASSES. *Electrocomponent Science and Technology* [online]. Gordon and Breach Science Publishers, 1975, , 38 [cit. 2021-11-14]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/206653962.pdf>
- [2] DIETZ, Raymond L. Sealing optical fibers without metallization: design guidelines [online]. Diemat, Inc., 19 Central St., Byfield, MA 01922, , 10 [cit. 2021-11-24]. Dostupné z: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.614.9360&rep=rep1&type=pdf>
- [3] DALTON, Robert H. Sealing with Solder Glass. *Journal of The American Ceramic Society-Dalton* [online]. New York: American Association of Physics Teachers, 1956, 39(3), 5 [cit. 2021-11-24]. Dostupné z: <https://pdf.zlibcdn.com/dtoken/0671048b91ff15b90c88e2f312c39229/j.1151-2916.1956.tb15633.x.pdf>
doi:10.1119/1.1970739
- [4] SCHOTT Technical Glass Brochure [online]. 2020, 2020(03), 80 [cit. 2021-11-14]. Dostupné z: <https://www.schott.com/en-ca/products/sealing-and-solder-glass/downloads>
- [5] Sealing and Solder Glass. SCHOTT [online]. [cit. 2021-11-17]. Dostupné z: <https://www.schott.com/en-tw/products/sealing-and-solder-glass-p1000291/product-variants>
- [6] JURAČKA, Martin. MOŽNOSTI PÁJENÍ SMD SOUČÁSTEK POMOCÍ ZAŘÍZENÍ FRITSCH [online]. Brno, 2014 [cit. 2021-11-24]. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=85151. Diplomová práce. VUT.
- [7] HINTERMÜLLER, Jan. Studium růstu whiskeru z pájených spojů [online]. Praha, 2020 [cit. 2021-11-24]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/87740/F3-DP-2020-Hintermuller-Jan-Studium%20rustu%20whiskeru%20z%20pajenych%20spoju.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>. Diplomová práce. ČVUT.
- [8] BRODT, Dr Klau. Heat transfer in forced convection reflow soldering systems: lead-free solder paste, a new challenge. *DATAWEEK* [online]. Technews Publishing (Pty), 4 July 2001n. 1., , 5 [cit. 2021-11-24]. Dostupné z: <https://www.dataweek.co.za/article.aspx?pkarticleid=1341>
- [9] Ezeonu Stella Ogochukwu (June 10th 2013). *Laser Soldering, Materials Science - Advanced Topics*, Yitzhak Mastai, IntechOpen, DOI: 10.5772/51527. Available from: <https://www.intechopen.com/chapters/38865>
- [10] POPELÁŘ, Vojtěch. ENERGETICKÉ PROBLÉMY ELEKTROTEPELNÝCH ZAŘÍZENÍ [online]. Brno, 2012 [cit. 2021-12-11]. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=52491. Bakalářská práce. VUT.

- [11] PALOMAR. Glass to Metal Sealing [online]. In: . California: SST International, 2015, s. 15 [cit. 2021-12-11]. Dostupné z: https://www.palomartechnologies.com/hubfs/Documents/eBooks/SST%20eBooks/SST_Glass_to_Metal_Sealing_eBook.pdf
- [12] Vybavení průmyslových firem. ABE.TEC [online]. Ostřešany: ABE.TEC, 2021 [cit. 2021-12-11]. Dostupné z: <https://www.abetec.cz/eshop/product/prubezna-pretavovaci-pec-fc220/>
- [13] ZHENJIANG, Wang, Gao ZENG, Chu JUNLONG, Qiu DECHAO a Niu JITAI. Low Temperature Sealing Process and Properties of Kovar Alloy to DM305 Electronic Glass. MDPI metals [online]. 2020, , 13 [cit. 2021-12-11]. Dostupné z: <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjf6P-a19v0AhXCuKQKHRC6BBYQFnoECAwQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.mdpi.com%2F2075-4701%2F10%2F7%2F941%2Fpdf&usg=AOvVaw1Vf4SQcHHt9gHycEwHTRe>
- [14] BEKBAY, Ildar. What is a Glass To Metal Seal Feedthrough. Ametek Aegis [online]. Massachusetts: Ametek, 2021 [cit. 2021-12-11]. Dostupné z: <https://www.ametekaegis.com/knowledge/blog/2021/february/what-is-a-glass-to-metal-seal-feedthrough>
- [15] Hermetic Glass-to-Metal Sealing. SCHOTT [online]. Německo, 2021 [cit. 2021-12-11]. Dostupné z: <https://www.schott.com/en-hr/expertise/technology-and-processing/glass-to-metal-sealing?ta>
- [16] ZHILEI energytech [online]. Taiwan: ZHILEI ENERGYTECH CO., 2021 [cit. 2021-12-01]. Dostupné z: <http://www.zhilei-tw.com/product-03.html>
- [17] SCHOTT Technical Glasses: Physical and technical properties [online]. Mainz, 2010 [cit. 2021-12-01]. Dostupné z: http://www.jb-electronics.de/downloads/elektronik/nixies/eigenbau/schott_technical_glasses_en.pdf
- [18] Conventional Hermetic Electronic Packages. HERMETIC SOLUTION GROUP Enabling technology [online]. 2019 [cit. 2021-12-08]. Dostupné z: <https://www.hermeticsolutions.com/products/hermetic-electronic-packaging/conventional-hermetic-packages/>
- [19] What is kovar alloy? LKALLOY [online]. 2020 [cit. 2021-12-08]. Dostupné z: <https://lkalloy.com/what-is-kovar-alloy/>
- [20] Ceramic-to-Metal Sealing with Kryoflex®. HERMETIC SOLUTION GROUP Enabling technology [online]. Hermetic Solutions Group, 2019 [cit. 2021-12-12]. Dostupné z: <https://www.hermeticsolutions.com/competencies/hermetic-sealing/ceramic-to-metal-sealing/>
- [21] Muflová laboratorní pec LMH s výhřevem do 1200 °C. LAC art of heating [online]. 2021 [cit. 2021-12-15]. Dostupné z: <https://www.lac.cz/cs/pece-a-susarny/muflova-laboratorni-pec-lmh>
- [22] GAJDOŠ, Jiří. Elektrické vlastnosti tlustovrstvých odporových past [online]. Brno, 2013 [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=67842. Bakalářská práce. VUT.

- [23] Vakuový kopírovací rám. Cima Zlín [online]. Zlín, 2022 [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <http://www.cima-zlin.cz/sitotiskove-vakuove-kopirovaci-ramy-prodej/svr-vakuovy-kopirovaci-ram/>

SEZNAM ZKRATEK

Zkratky:

CTE	Koeficient teplotní roztažnosti
Al_2O_3	Korundová keramika
TLV	Technologie tlustých vrstev