

Metoda hloubkové kvantifikace laserového ablačního procesu

Bc. Tomáš Skřivánek

Diplomová práce
2017



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Tomáš Skřivánek**
Osobní číslo: **A15199**
Studijní program: **N3902 Inženýrská informatika**
Studijní obor: **Bezpečnostní technologie, systémy a management**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Metoda hloubkové kvantifikace laserového ablačního procesu**
Téma anglicky: **The Depth Quantification Method for Laser Ablation**

Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se s problematikou padělků polovodičových součástek.
2. Prostudujte metody pro posuzování původnosti těchto součástek.
3. Zaměřte se na využití laserové ablace pro zpřístupnění systémů na čipu (SoC).
4. Popište aplikovaný vláknový laser, jeho režimy a procesní parametry.
5. Experimentálně prostudujte zahlubování pomocí laserové ablace v závislosti na nastavení hodnot procesních parametrů.
6. Navrhněte a podle možností ověřte metody pro kvantifikaci vertikálního zahloubení.
7. Prakticky a ověřte zvolenou metodu.
8. Zpracujte názorně varianty sestav nastavených hodnot a jejich rozmezí.
9. Analyzujte dosažené výsledky a navrhněte další možnosti směřování v této oblasti.

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

1. **M. Crawford, et al., Defense Industrial Base Assessment. In: Counterfeit Electronics, Report of U.S. Department of Commerce, Bureau of Industry and Security, Office of Technology Evaluation, January 2010.**
2. **Mark Tehranipoor, Ujjwal Guin, Domenic Forte, Counterfeit Integrated Circuits Detection and Avoidance, Springer International Publishing Switzerland, 2015.**
3. **Valerii (Vartan) Ter-Mikirtychev, Fundamentals of Fiber Lasers and Fiber Amplifier, Springer Series in Optical Sciences, Springer International Publishing Switzerland, 2014.**
4. **Crow SE – Fiber Laser System – Decapping Marking Ablation, Specifikace k vláknovému laseru Crow SE, firemní literatura PM Service GmbH, 2013.**
5. **Laserstudio GUI Software, Specifikace k aplikačnímu prostředí vláknového laseru Crow SE, firemní literatura PM Service GmbH, 2013.**
6. **Light RAY Laserstudio, Fiber Laser Application SW, LightRAY Marking Systems GmbH, 2012.**
7. **Yoshio Nishi, Robert Doering, Handbook of Semiconductor Manufacturing Technology, Second Edition, CRC Press, 2012.**
8. **Harper, C.A.: Electronic Materials And Processes Handbook, McGraw-Hill, 2004.**

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Petr Neumann, Ph.D.

Ústav elektroniky a měření

Datum zadání diplomové práce:

3. února 2017

Termín odevzdání diplomové práce:

24. května 2017

Ve Zlíně dne 3. února 2017



doc. Mgr. Milan Adámek, Ph.D.
děkan



doc. RNDr. Vojtěch Křesálek, CSc.
ředitel ústavu

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen v příruční knihovně Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen připouští-li tak licenční smlouva uzavřená mezi mnou a Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně s tím, že vyrovnání případného přiměřeného příspěvku na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše) bude rovněž předmětem této licenční smlouvy;
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na diplomové/bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně, dne 8.5.2017



.....
podpis diplomanta

ABSTRAKT

Tato práce pojednává o problematice padělaných součástek, a způsobech, jak takové součástky odhalit. Podrobně rozpracovává především metodu laserové ablace a její vliv na posuzovanou součástku tak, aby právě touto metodou nemohlo dojít ke znehodnocení jejích parametrů. Na základě této práce bylo rovněž provedeno několik experimentů, jejichž výsledky jsou podrobně zaznamenány v tabulkách. Tyto experimenty měly dát za vznik ucelenému postupu volby vhodných parametrů pro laserový ablační proces. V závěru práce jsou poté formulovány další doporučení pro hloubkovou kvantifikaci laserového ablačního procesu.

Klíčová slova: laser, padělek, integrovaný obvod, ablace, kvantifikace

ABSTRACT

This master thesis is about the problems of counterfeit parts and about the ways, how to reveal these parts. Specifically, there is described the method of laser ablation in detail and its impact on the particular part in order not to debase the parameters. On the basis of this master thesis there were conducted several experiments and the results are provided in the tables in detail. The aim of the experiments was to introduce a comprehensive approach of choosing the suitable parameters for laser ablation process. In the end of the thesis, there are stated further recommendations for the depth quantification of the laser ablation process.

Key words: laser, counterfeit part, integrated circuit, ablation, quantification

Rád bych na tomto místě poděkoval všem lidem v mém okolí, zejména pak vedoucímu této práce, panu. Ing. Petru Neumannovi Ph.D. za odborné rady, poskytnutí materiálů, perfektní komunikaci a neuvěřitelnou vstřícnost. Velký dík si taktéž zaslouží má rodina, přátelé a známí za toleranci a nastolení vhodné atmosféry pro vznik této práce.

You're born, you take shit. You get out in the world, you take more shit. You climb a little higher, you take less shit. Till one day you're up in the rarefied atmosphere and you've forgotten what shit even looks like. Welcome to the layer cake son... (Eddie Temple)

Prohlašuji, že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 PROBLEMATIKA PADĚLKŮ POLOVODIČOVÝCH SOUČÁSTEK ...	12
1.1 HISTORIE PADĚLKŮ	12
1.2 PADĚLANÉ PRODUKTY	12
1.2.1 Padělky elektronických součástek.....	13
1.2.1.1 Recyklace.....	14
1.2.1.2 Přeznačení.....	16
1.2.1.3 Nadprodukce.....	17
1.2.1.4 Závadné součástky.....	18
1.2.1.5 Kopie.....	18
1.2.1.6 Padělaná dokumentace.....	18
1.2.1.7 Upravené součástky	19
1.2.2 Zdroje a typy padělků.....	19
1.3 ODLIŠNOSTI PADĚLANÝCH SOUČÁSTEK.....	20
1.3.1 Procesní nedostatky.....	20
1.3.2 Mechanické nedostatky	21
1.3.3 Nedostatky prostředí	22
1.3.4 Elektronické nedostatky	22
2 METODY PRO OVĚŘOVÁNÍ PŮVODNOSTI SOUČÁSTEK	23
2.1 VNĚJŠÍ VIZUÁLNÍ KONTROLA.....	23
2.1.1 PŘEZNAČOVÁNÍ SOUČÁSTEK	23
2.1.2 Chybné vlasy.....	24
2.1.3 Analýza použitých materiálů.....	25
2.1.4 Fyzické rozměry součástky a stav vývodů.....	25
2.2 VNITŘNÍ VIZUÁLNÍ KONTROLA	25
2.2.1 Rentgenová analýza	25
2.2.2 Akustická mikroskopie.....	26
2.2.3 Infračervená termografie	27
2.3 ANALÝZA POUŽITÝCH MATERIÁLŮ.....	27
2.3.1 Ramanova spektroskopie	28
2.3.2 Rentgenová fluorescenční spektroskopie XRF.....	30
2.4 ELEKTRONICKÉ MĚŘENÍ	31
2.4.1 Dělení podle způsobu měření:.....	32
2.4.1.1 Manuální měření	32
2.4.1.2 Automatické měření.....	32
2.4.2 Dělení podle použitých metod:	32
2.4.2.1 Vyhodnocování V-A charakteristik	32
2.4.2.2 Úplný parametrický test.....	33
2.4.2.3 Životnostní a spolehlivostní testy	34
2.4.3 Omezení při testování	34
3 MATERIÁLY PRO ZAPOUZDŘENÍ SOUČÁSTEK	35
3.1 HERMETICKY UZAVŘENÁ POUZDRA.....	35
3.1.1 Keramická pouzdra	35

3.1.2	Kovová pouzdra	36
3.2	NEHERMETICKÁ POUZDRA.....	36
3.2.1	Plastová pouzdra	37
3.3	TECHNOLOGIE VÝROBY U POUZDER POLOVODIČOVÝCH SOUČÁSTEK.....	38
3.4	TYPY POUŽÍVANÝCH POUZDER	39
3.4.1	Pouzdra vyráběná ve standardizovaných řadách.....	39
3.4.2	Pouzdra navrhovaná zákazníky	40
3.4.3	Pouzdra MCM.....	41
3.4.4	Pouzdra CSP.....	41
4	ZPŘÍSTUPNĚNÍ SOUČÁSTKY ZA POMOCÍ LASEROVÉ ABLACE ..	42
4.1	LASEROVÁ ABLACE	43
4.2	KOMBINACE METOD	44
4.2.1	Nevýhody samostatného chemického ošetření	44
II	PRAKTICKÁ ČÁST	45
5	MĚŘENÍ HLOUBKY ODEBRANÉHO MATERIÁLU	46
5.1	OPTICKÉ MĚŘICÍ PŘÍSTROJE – MIKROSKOPY.....	46
5.2	LASEROVÉ A OPTICKÉ METODY	49
5.2.1	Laserová triangulace	49
5.2.2	Konfokální princip	50
5.3	KONTAKTNÍ ÚCHYLKOMĚRY A VÝŠKOMĚRY	51
5.4	POROVNÁNÍ KONTAKTNÍCH A BEZKONTAKTNÍCH METOD	52
6	APLIKOVANÝ VLÁKNOVÝ LASER.....	53
6.1	PRINCIP VLÁKNOVÉHO LASERU	53
6.2	VÝHODY VLÁKNOVÉHO LASERU	55
6.3	HLAVNÍ PARAMETRY LASERU.....	56
6.4	POUŽITÝ LASER	57
7	ZAHLUBOVÁNÍ POMOCÍ LASEROVÉ ABLACE	58
7.1	POSTUP EXPERIMENTU	58
7.2	KVANTIFIKACE VÝKONU	60
7.3	KVANTIFIKACE PARAMETRU ROZTEČE ŠRAFOVÁNÍ	63
7.4	KVANTIFIKACE PARAMETRU RYCHLOSTI PŘEBĚHU.....	66
7.5	KVANTIFIKACE FREKVENČNÍHO PARAMETRU	70
7.6	VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT.....	73
7.6.1	Výkon.....	73
7.6.2	Hatch	73
7.6.3	Rychlost přeběhu.....	73
7.6.4	Frekvence	74
8	STANOVENÍ A OVĚŘENÍ HODNOT PRO ABLAČNÍ PROCES.....	75
8.1	METODA ODSTRANĚNÍ VEŠKERÉHO MATERIÁLU NAD ČIPEM PRO JEHO OVĚŘENÍ.....	76
8.1.1	Vzorek 1.1	76
8.1.2	Vzorek 1.2	76
8.1.3	Vzorek 1.3	77

8.1.4	Vzorek 1.4	77
8.2	METODA PRO VYHLOUBENÍ OTVORU NAD ČIPEM PRO NÁSLEDNÉ LEPTÁNÍ... ..	78
8.2.1	Definice parametrů	79
8.2.2	Vzorek 2.1	80
8.2.3	Vzorek 2.2	81
8.2.4	Vzorek 2.3	81
8.2.5	Vzorek 2.4	82
8.2.6	Vzorek 2.5	82
8.3	POROVNÁNÍ S JINÝM TYPEM POUZDRA	82
8.4	ANALÝZA A VYHODNOCENÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ	83
8.5	DALŠÍ MOŽNOSTI SMĚŘOVÁNÍ V OBLASTI	85
	ZÁVĚR	86
	CONCLUSION	88
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	90
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	95
	SEZNAM OBRÁZKŮ	96
	SEZNAM TABULEK	98
	SEZNAM GRAFŮ	99

ÚVOD

V době 21. století, kdy informace obletí svět v řádech sekund a technologický pokrok ve výrobě polovodičových a elektro součástek je na takové úrovni, že před 50 lety by si jej stěží někdo dokázal představit jinak, než ve snu, čelíme neustále novým výzvám a hrozbám. Jednou z takových hrozeb je právě i padělání. Každý padělek, ať už se jedná o léky, elektroniku či oděvy aj., ponese vždy určité znaky, které jej odliší od originálů, ať už se jedná o zcela zjevně viditelné prvky, či prvky ukryté hluboko ve vnitřní struktuře produktů.

Problematika padělků polovodičových součástek je velmi široké téma, které postupně nabývá na významu. Motivace padělatelů je zřejmá, je jí nejčastěji vlastní obohacení na úkor zákazníka, který si danou součástku objedná a očekává její stoprocentní funkčnost. V dodavatelském řetězci dochází ke kontaktu několika subjektů s danou zásilkou, a nelze tedy se stoprocentní určitostí zaručit spolehlivost všech subjektů v daném řetězci. Proto i v dnešní době dochází k tomu, že je trh zaplaven nefunkčními, či jinak bez vědomí výrobce upravenými součástkami, které v konečném důsledku, ačkoliv většinou neprávem, uškodí nejvíce právě výrobcům. Ve světě se množí případy, kdy právě padělaná elektronika stojí za nefunkčností kriticky důležitých technologií, které mohou mít vážný vliv na zdraví a život lidských jedinců, kteří s nimi přicházejí do styku.

Právě tyto důvody vedou ke zpětnému zkoumání elektronických součástek a prověřování, zda se skutečně jedná o originální zařízení s deklarovanými parametry od výrobce. Pro toto zkoumání lze využít různých metod, ať už destruktivních, či nedestruktivních. Jednou z destruktivních metod je laserová ablace pouzdra polovodičových součástek. Při tomto procesu dochází k odstranění vrstvy pouzdra součástky tak, aby došlo k odhalení čipu a vnitřního zapojení součástky. Vzhledem k tomu, že tento proces vyžaduje velkou přesnost ve zvolení parametrů laserového procesu, je tato práce věnována právě zvolení a nastavení správných parametrů pro laserový ablační proces. Tyto parametry jsou následně reálně vyzkoušeny na padělaných součástkách. Po tomto experimentálním procesu práce formuluje doporučení a opatření pro dané požadavky na ablaci pouzder polovodičových součástek.

Závěr této práce je věnován doporučení a analýze dalších metod, kterými by se mohl vývoj v této oblasti ubírat. Dotýká se zejména kombinace laserové ablace s chemickými metodami a využití jiných technologií jako je rentgenové záření, jiné typy laserů apod.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 PROBLEMATIKA PADĚLKŮ POLOVODIČOVÝCH SOUČÁSTEK

Obecně je problematika padělků nesmírně obsáhlá disciplína, která se netýká pouze módních značek. V dnešní době se lze setkat s nejrůznějšími variantami padělků od textilních výrobků, přes léky až po polovodičové součástky. V podstatě lze říci, že existují sítě výrobců padělků, kteří tyto padělky dále prodávají přes vlastní distribuční sítě až k jejich koncovým uživatelům. [1]

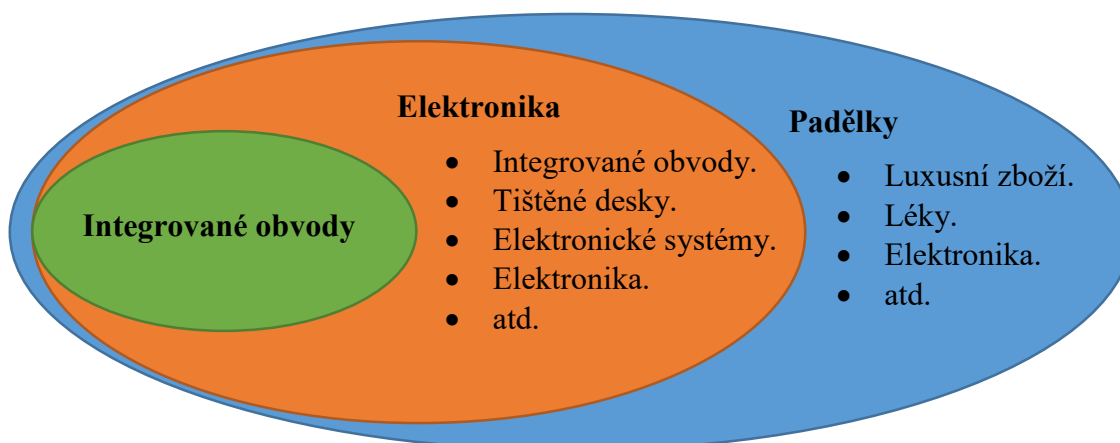
Aby si laik dokázal plně představit problematiku padělků, jsou zde uvedeny čísla od WHO - World Health Organization, neboli světové zdravotnické organizace, která uvádí, že něco mezi 10 – 30% léků v rozvojových zemích jsou padělky, což může vést k přímému ohrožení jejich uživatelů na životech. [1]

1.1 Historie padělků

V podstatě lze říci, že padělky na světě existují stejně dlouho, jako lidstvo samo. Kdykoliv se v minulosti objevily nějaké známky autenticity, docházelo také k jejich napodobování. První zmínky o paděláních pocházejí už z doby antického Egypta. Například římský filosof Plinius starší popisuje popularitu padělaných mincí jako sběratelských artiklů v té době. Další případ tentokrát již z novodobější historie pochází z roku 2007, kdy čínská instituce Public Security Bureau of China a FBI našli padělky softwaru značky Microsoft za cenu přibližně 2 miliardy dolarů. Bylo zabaveno 19 verzí produktů v 11 jazycích. Tento případ padělaní je dosud největším prokázaným paděláním software v historii, jelikož byly tyto padělky rozšířeny do 36 zemí v 6 světových kontinentech. [1]

1.2 Padělané produkty

Jednotlivé padělané produkty lze rozdělit do několika skupin a následných podskupin znázorněných na Obrázku 1. [1].



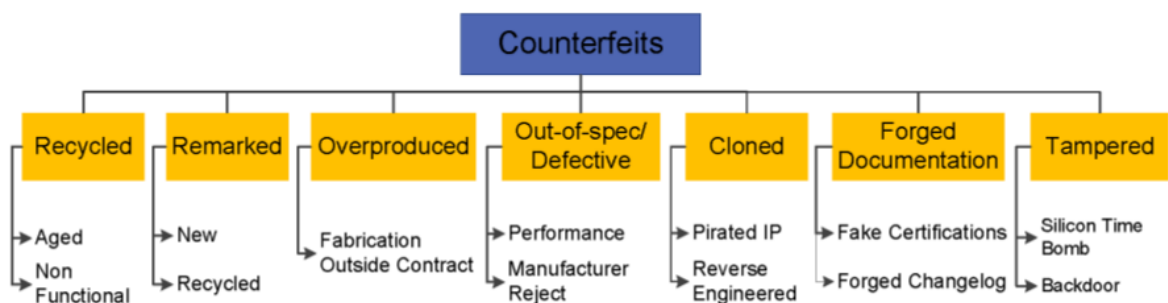
Obrázek 1 Padělané produkty [1]

1.2.1 Padělky elektronických součástek

Chceme – li nadále řešit problematiku padělaných součástek, je na místě samotnou padělanou součástku definovat. Právě k tomuto účelu se nabízí definice amerického Ministerstva obchodu. To definuje padělanou součástku jako takovou, která splňuje jeden z následujících bodů:

- Součástka je neautorizovanou kopií.
- Daná součástka nesouhlasí se vzhledem, parametry, výkonem, vlastnostmi a designem původní, originální součástky.
- Součástka, kterou produkují neschválení výrobci, nebo ji pře-prodávají neschválení distributoři.
- Součástka, která neodpovídá parametrům, nebo je již použitá, ale přesto prodávána jako bezchybná a nová.
- Součástka, která má špatné nebo padělané značení a dokumentaci. [1]

I přes vyjmenování několika definic padělaných součástek, existují další způsoby padělání. Jedná se zejména o tzv. zpětné inženýrství (reverse engineering), recyklaci. U zpětného inženýrství se jedná o jeden z hlavních typů padělání součástek. Princip této metody je v tom, že výrobce tuto součástku vyrobí jako novou a uvede ji na trh. Na trh jsou uvedeny pod značkou OCM (original component manufacturers), ale většinou jsou vyráběny třetími stranami, které s OCM mají uzavřeny dohody o dodání určitého zboží. Je-li tato třetí strana nedůvěryhodná a neprověřená, může dojít k tomu, že bude nabízet toto zboží pod jinou značkou, popřípadě pro jiného výrobce. Navíc může dojít k tomu, že HW (hardware) těchto součástek bude obsahovat HW chybu, která následně může ohrozit bezpečnost a spolehlivost systému, do kterého si zákazník danou součástku objednal. [1]



Obrázek 2 Klasifikace padělaných součástek [1]

1.2.1.1 Recyklace

Pojmem recyklace se v tomto případě rozumí to, že jsou původní součástky nějakým způsobem (odpájením, vyloupnutím apod.) vyjmuty z původních míst určení, očištěny a znovu dány do prodeje jako nové komponenty. Hlavními nevýhodami takových součástek je především nižší výkonnost a také životnost. Ruku v ruce s procesem vyjímání součástky z původního zařízení jde také to, že jsou tyto součástky vystaveny vlivům, které mohou značně snižovat jejich životnost nebo dokonce způsobit úplnou nefunkčnost součástky. Tímto je myšleno především:

- Vystavení velmi vysokým teplotám.
- Možnost poškození vlivem elektrostatického výboje.
- Použití nepřiměřené fyzické síly při vyjmutí součástky.
- Čištění.
- Pískování. [1]

Všechny tyto vlivy mají nesporný negativní vliv na další funkčnost součástky. Nemusí se jednat o zřejmé poškození, ale může také jít o určitý spouštěč, který sníží životnost, popřípadě způsobí úplné zničení dané součástky v postupu času. Například ve Spojených Státech Amerických dochází až k 75% ztrátám při recyklaci součástek. To znamená, že pouze jedna čtvrtina součástek určených k recyklaci je skutečně recyklována a zbylé tři čtvrtiny jsou opět použity. Dá se předpokládat, že podobná čísla lze odhalit i v dalších zemích. To dělá obrovský prostor pro obchod s padělanými, v tomto případě recyklovanými součástkami. [1]

Recyklační proces se dá popsat do následujících bodů:

1. Recyklační firma vyzvedne od dodavatelů vyřazené tištěné spoje se součástkami, které mohou být recyklovány.
2. Součástky se vloží do trouby, kde jsou zahřívány. Potom, co se začne spojovací materiál tavit, dojde k poklepání na danou desku tištěného spoje a součástky spadnou do předem připravené nádoby.
3. V dalším kroku je nutné odstranit značení z dané součástky. Pro tento proces se využívá různých prášků (hliníkový oxidový prášek, skleněné střípky apod.) a stlačeného vzduchu, který celý proces urychlí.
4. Po odstranění původního značení, je nutné na součástku nanést novou vrstvu, ta je realizována za pomoci speciální černé barvy.

5. Aby součástka vypadala jako originál, je nutné v dalším bodě za pomoci inkoustové či laserové tiskárny na vrchní část součástky natisknout značení nožiček, typ, logo společnosti a jiné poznávací prvky.
6. Zbylé části komponentu jako nožičky aj. jsou přepracovány a upraveny tak, aby se součástka jevila jako nová a mohla být tak dána znovu do oběhu. [1]

Je jasné, že takové součástky, přestože se mohou jevit jako nové, nemohou dosahovat parametrů nových součástek. Mezi hlavní nevýhody tohoto postupu při recyklaci součástek patří to že:

- Nejsou chráněny před elektrostatickým výbojem.
- Nejsou chráněny proti přepětí.
- Komponenty citlivé na vlhkost nejsou správně zabaleny v suchých obalech.
- Dále mohou být zničeny:
 - Teplotou.
 - Mechanickým poškozením.
 - Vlhkostí.
 - Dalšími vlivy souvisejícími s recyklačním procesem. [1]



Obrázek 3 Příklad recyklace součástek v Číně [2]

1.2.1.2 Přeznačení

Další z metod padělání součástek je také přeznačení. Elektronické součástky z výroby obsahují několik identifikátorů, které přesně určují jejich vlastnosti a parametry. Pro laika se jedná o číslo složené z několika číslic a písmen, nicméně odborník v tomto čísle nalezne například tyto parametry:

- Identifikační číslo.
- Číslo výrobního zařízení.
- Země kde byla daná součástka vyrobena.
- Označení certifikace.
- Označení citlivosti aj. [1]

Přeznačování součástek může mít nedozírné následky. Je to především proto, že označení součástky zároveň předurčuje to, jak by daný elektronický komponent měl být použit. Je totiž zřejmé, že například součástky pro použití v kosmickém průmyslu budou mít úplně jiné požadavky na provozní teploty, míru radiace a další parametry, než součástky pro použití v klasické komerční sféře. Jednoduchou úvahou lze odvodit také fakt, že součástky pro použití v kosmickém průmyslu jsou o několik řádů dražší než klasické součástky. Tím je také zřejmá motivace, která vede falzifikátory k prodeji takových součástek. Přestože se na první pohled může jevit součástka jako pravá a splňující parametry, až při provozu ve specifickém prostředí se mohou začít projevovat nedostatky a chyby. [1]

V podstatě lze říci, že přeznačení patří k jednomu z nejjednodušších způsobů, jak vyrobit padělek dané součástky. Postup je nejčastěji takový, že se součástka připraví pro přeznačení tím způsobem, že dojde k odstranění originální vrstvy, kde je popis dané součástky. Tohoto lze docílit buď chemicky, pokud je součástka potištěna některým z typů inkoustů, nebo přímo fyzicky např. odfrézováním horní vrstvy. Součástka je potom nalakována tak, aby lak nebo barva zakryly nedokonalosti při odstranění původní vrstvy a poté znovu potištěna, kdy je na první pohled nerozeznatelná od originálu. [1]

Jako jeden příklad za všechny lze uvést padělky procesorů AMD Athlon XP. Pro navýšení zisku, došlo k přetaktování tohoto typu procesoru tak, aby se jevil jako výkonnější. Tento zásah však měl za následek nestabilitu a vysokou provozní teplotu, se kterou šla ruku v ruce kratší životnost tohoto komponentu. Aby se procesor jevil jako jeho výkonnější verze, došlo k přeznačení pouzdra procesoru, které však zejména díky fontu

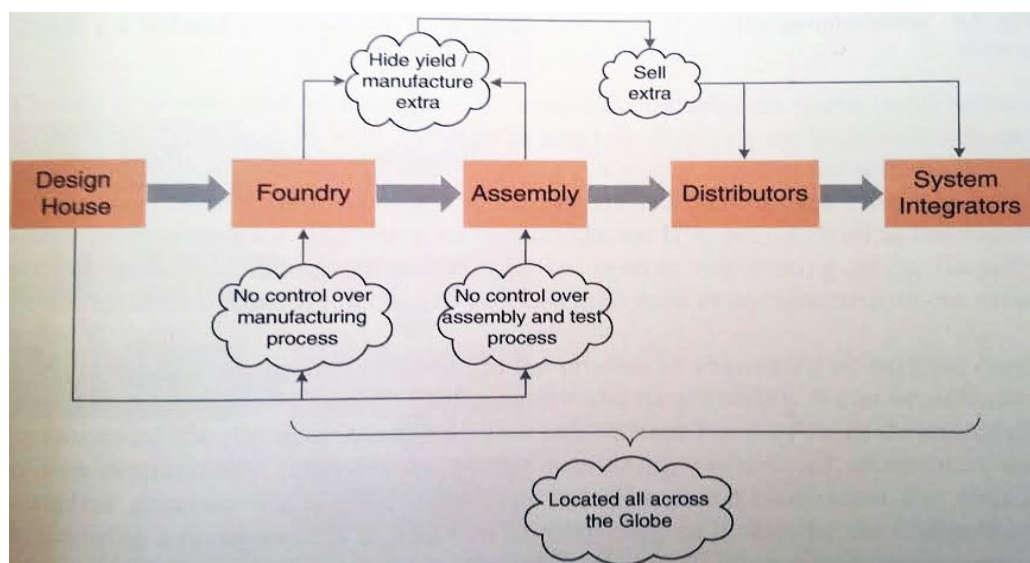
použitého písma pro potisk, bylo rozeznatelné pouhým okem viz Obrázek 4. V horní části obrázku je vidět originál a ve spodní části padělek. [3]



Obrázek 4 Demonstrace padělaného CPU [3]

1.2.1.3 Nadprodukce

Vzhledem k tomu, že výrobní technologie pro výrobu CMOS čipů stojí miliony dolarů, nemůže tyto čipy vyrábět každý. Proto společnosti, které čip navrhují, často další procesy přenechávají externím dodavatelům, aby ušetřily co nejvíce nákladů. Tento proces je ve světě znám jako „outsourcing“. Jedná se zejména o slévání a montáž, které jsou technologicky nejnáročnější. Právě díky tomu do procesu, od návrhu až po distribuci produktu ke konečným zákazníkům, vstupuje několik dalších subjektů tak, aby každý dělal to, co umí nejlépe a výsledná cena byla co nejnižší. Nicméně díky tomu s produktem přichází do styku spousta subjektů, kde nelze stoprocentně zaručit to, že se bez zadavatelova vědomí nevyrobí více čipů, než je původně požadováno, které jsou později prodány jiným distributorům. Motiv je zde zřejmý, protože tyto společnosti ušetří obrovské náklady za návrh samotného zařízení. Princip tohoto je popsán na obrázku 5. [1]



Obrázek 5 Princip nadprodukce elektronických součástek [1]

1.2.1.4 Závadné součástky

I přes to, že výrobní proces polovodičů udělal za poslední čtyři dekády obrovský postup dopředu, stále výrobci nemohou zaručit to, že z výrobní linky vyjdou pouze bezchybné součástky. Prověření výrobci mají nastavenou zpravidla takovou vnitřní kontrolu, že se závadné součástky v podstatě nemohou dostat k odběrateli a jsou určeny k likvidaci. Lze se domnívat proč tomu tak je, pravděpodobně proto, že by takový výrobce potom ztratil prestiž a následně i zákazníky. Nicméně ani toto nezaručuje, že se takové závadné součástky nemohou dostat na trh jinou neoficiální cestou v podobě fiktivního zničení a následného puštění do oběhu zaměstnanci továrny apod. Další z variant je to, že se na závadu součástky přijde až v provozu, a výrobce je tak nucen stahovat výrobky z trhu zpětně. [3]

1.2.1.5 Kopie

Kopírování součástek může probíhat ve dvou různých rovinách, a to buď tzv. zpětným inženýrstvím, či za pomoci ilegálního získání parametrů a dokumentů k dané součástce, ke které se váže duševní vlastnictví nějaké společnosti, jež ji vyvinula. [1]

Reverzním inženýrstvím potom rozumíme proces, kdy zpětně zkoumáme, jak je součástka fyzicky zapojena v pouzdru, a jaké další součástky jsou pro její výrobu použity. Tohoto se dá docílit buď destruktivní metodou, kdy jsou zkoumány jednotlivé vrstvy součástky, které se postupně odstraňují a nebo jinou, tentokrát nedestruktivní metodou. V tomto případě jsou vytvářeny pouze obrazy vnitřní struktury součástky za pomoci speciálního zařízení, jako je elektronový mikroskop apod. [1]

Klonování, neboli kopírování součástek, je také možno provádět tak, že jsou vytěžováni zaměstnanci firmy, která součástku navrhla. Pokud takoví zaměstnanci z firmy vynáší informace, jedná se nejčastěji o parametry k vodoznakům a jiným speciálním značením součástek, které mají znemožnit jejich padělání. [1]

1.2.1.6 Padělaná dokumentace

Mimo výše jmenované případy se objevuje také fenomén tzv. padělané dokumentace. V principu jde o to, že součástky, které jsou od výrobce vyřazeny a určeny k recyklaci s sebou nesou určitou dokumentaci, kde je potvrzen jejich nedostatek. Díky padělání této dokumentace potom lze součástku dále prodat jako tzv. „nezávadnou“. Velký problém je zejména v dokazování padělání této dokumentace, protože originální dokumenty často nejsou k dispozici. [1]

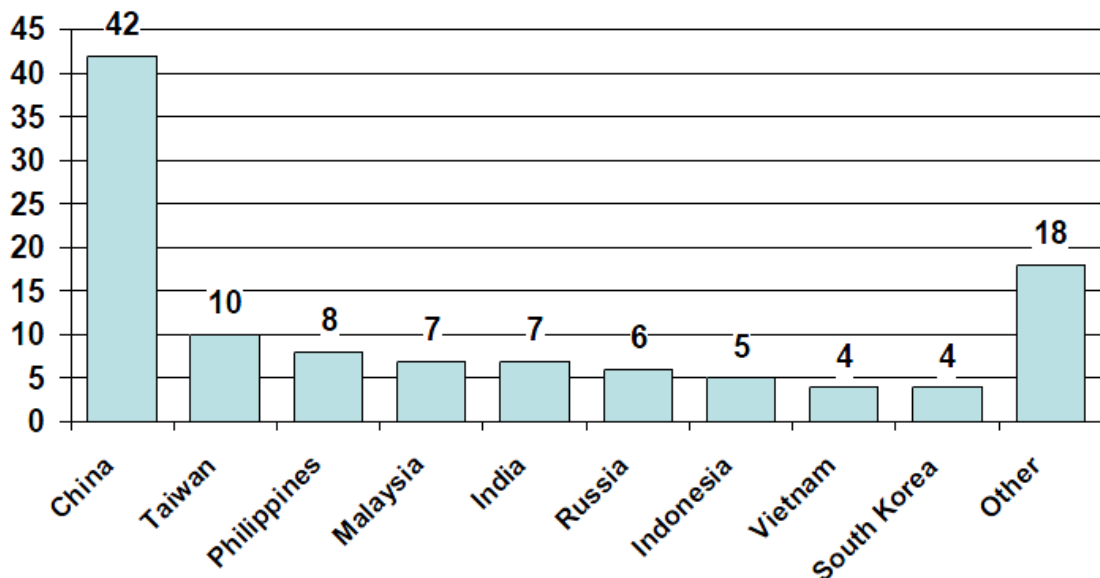
1.2.1.7 Upravené součástky

Nebezpečí upravených součástek tkví zejména v tom, že mohou obsahovat různé verze hardwarových trojských koňů apod. Mohou tedy fungovat zcela normálně až na to, že v kritickém okamžiku poskytnou vstup narušiteli do daného systému, v kterém je „nakažená“ součástka používána. Kritické je to zejména v následujících oblastech:

- Vojenské.
- Kosmické.
- Lékařské.
- Finanční.
- Dopravní. [1]

1.2.2 Zdroje a typy padělků

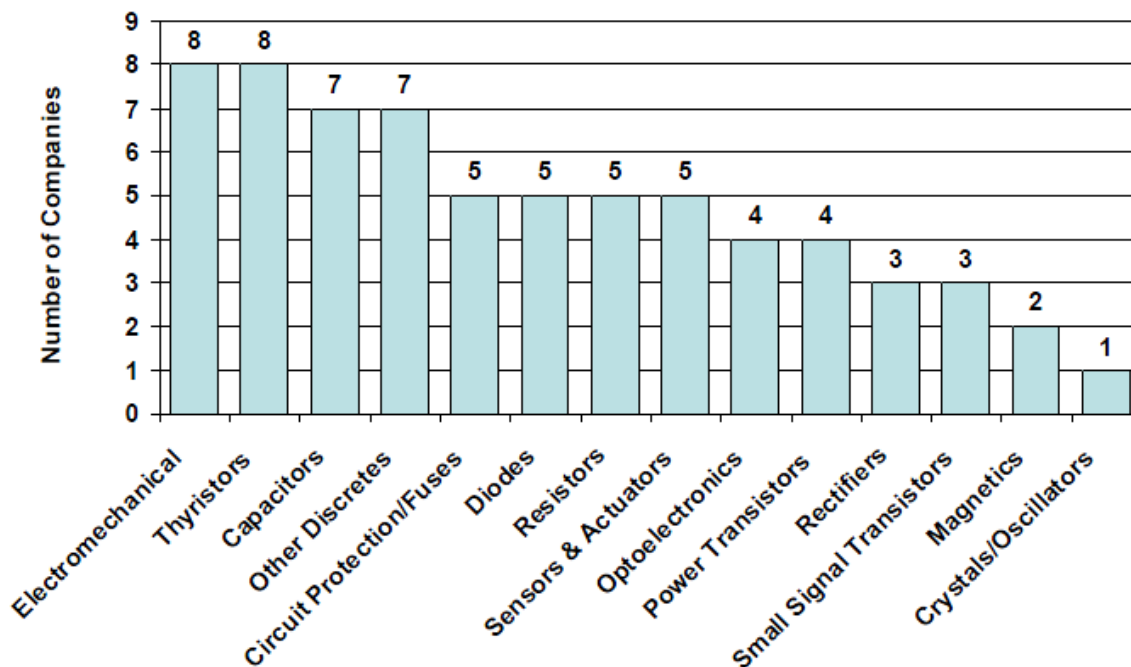
Lze říci, že hlavním zdrojem padělků jsou východní země, přesněji tedy Čína, Taiwan a Filipíny, jak je vidět na Grafu. č.1. Tento graf vznikl tak, že byli osloveni výrobci elektronických součástek, kteří měli označit země, odkud pochází padělky jejich součástek. [4]; 5]



Graf 1 Zdroje padělků elektronických součástek podle jednotlivých zemí [1]

Mezi nejčastější typy padělků patří dle autorizovaných výrobců zejména dodávky nefunkčních a falešných výrobků. Pokud se jednalo o funkční výrobky, byly to potom nejčastěji padělky vyšších řad. I když tyto padělky mohou fungovat, nelze u nich garantovat

stejné výkony jako u originálních součástek. Statistiku diskrétních padělaných součástek vedou elektromechanické součástky spolu s tyristory jak je patrné z Grafu č. 2. [4]; 5]



Graf 2 Typy padělaných diskretních součástek [1]

1.3 Odlišnosti padělaných součástek

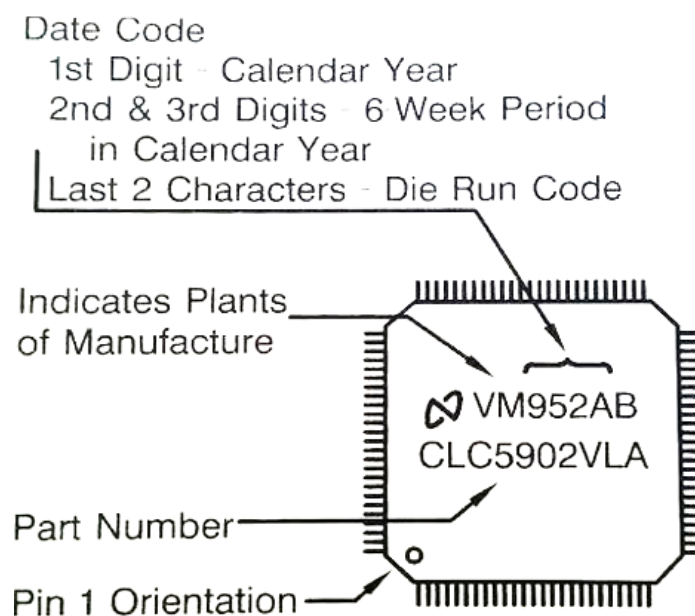
Existuje několik kategorií odlišností elektronických součástek, na které lze pohlížet z různých úhlů pohledu. Jako základní dělení je možné zvolit takové, které se zajímá o to, zda jde o nedostatek povahy:

- Procesní.
- Mechanické.
- Prostředí.
- Elektronické. [1]

1.3.1 Procesní nedostatky

Tyto nedostatky vychází z procesu tvorby výrobku, jeho zabalení a následného odeslání a také označení komponentu samotného. Jakýkoliv nedostatek v balení může způsobit další potencionální selhání výrobku v budoucnu. Navíc by měl zákazník obdržet spolu s komponentem dokumenty, které potvrzují autenticitu daného výrobku. K těmto nedostatkům řadíme:

- Špatné číslo série.
- Špatné balení.
- Špatné balící štítky, nálepky.
- Žádná ochrana před elektrostatickým výbojem.
- Chybějící nebo zfalšované dokumenty k výrobku.
- Orientace součástek.
- Různé datové kódy v jednom balení.
- Žádná ochrana před vlhkostí.
- Špatné značení. [1]



Obrázek 6 Příklad značení součástky [1]

1.3.2 Mechanické nedostatky

Jak je z názvu patrné, jedná se zejména o nedostatky, ať už vnější či vnitřní, které jsou mechanické povahy. Dle toho, které nedostatky je třeba zkoumat, je nutné uzpůsobit metodu zkoumání, jenž budou popsány níže. Zjednodušeně lze mechanické nedostatky rozřadit do čtyř kategorií, které se dále člení na další podkategorie:

- Vývody, vykrojení, piny.
- Pouzdra.
- Vnitřní propojení k vývodům.
- Vnitřní čip. [1]

1.3.3 Nedostatky prostředí

Tyto nedostatky vznikají tím, že pouzdro a ostatní části součástky jsou vystaveny nepřiměřeným podmínkám okolního prostředí, jako je vlhko apod. Tyto podmínky se poté podepisují na stavu součástky, kdy může docházet k její oxidaci, korozi apod. Zvláštním případem je potom kontaminace pouzdra nebezpečnými kapalinami, které mají záporný vliv na parametry a stav součástky. [1]



Obrázek 7 Příklad koroze nožiček a pouzdra [7]

1.3.4 Elektronické nedostatky

Elektronickými nedostatky rozumíme v podstatě rozdíl mezi implementovaným HW a jeho navrhovanou funkcí. Základ elektronických nedostatků lze rozdělit do dvou rovin, a to nedostatků způsobených parametry a nedostatků způsobených výrobou. Dělení elektronických nedostatků potom vypadá následovně:

- Nedostatky parametrů součástek.
- Nedostatky při výrobě součástek.
 - Nedostatky při výrobním procesu.
 - Nedostatky v materiálu.
 - Nedostatky pouzdra. [1]

2 METODY PRO OVĚŘOVÁNÍ PŮVODNOSTI SOUČÁSTEK

Jak vypovídají čísla v předchozí kapitole, falšování součástek je v současné době obrovský nadnárodní problém. S tímto problémem musí jít logicky ruku v ruce restrikce, ať už ze strany výrobců, tak i ze strany jednotlivých vládních agentur. Pro ověření původnosti dané součástky lze využít několika metod, které lze dělit následovně:

- Vnější vizuální kontrola.
- Vnitřní vizuální kontrola.
- Analýza použitých materiálů.
- Elektronické měření. [6]

2.1 Vnější vizuální kontrola

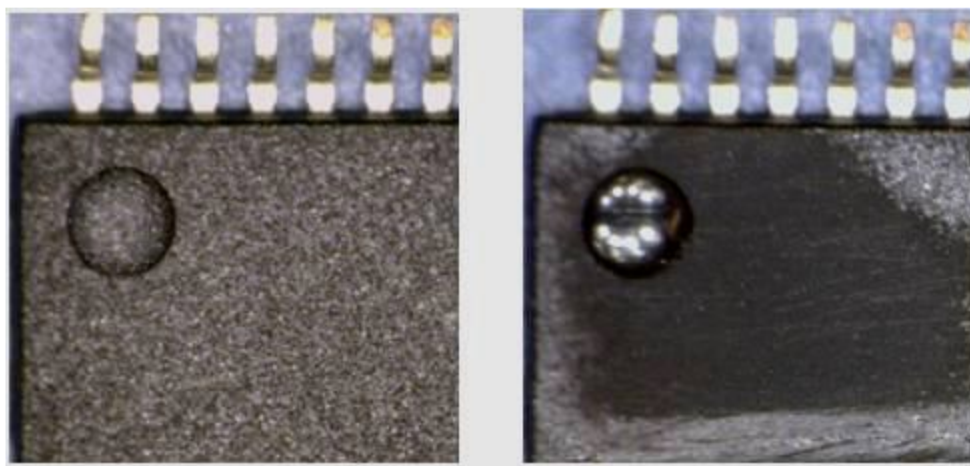
Při této metodě dochází k porovnávání součástky originální s podezřelou součástkou. Jedná se o nejjednodušší metodu co do vybavení, tak i časové náročnosti. Zjednodušeně lze říci, že dochází ke komparaci vlysů součástky, fontů písma a textury součástky. Jako vybavení se používá nejčastěji mikroskop či lupa s požadovaným zvětšením, avšak u nedokonalých padělků si lze všimnout podstatných rozdílů i pouhým okem. Vzhledem k jednoduchosti a rychlosti této metody, ji lze doporučit, jako první krok k posouzení pravosti součástky, avšak měla by po ní následovat další metoda, která podezření potvrdí či vyvrátí. I v případě, že se součástka vizuálně jeví jako pravá, je doporučeno použít další metodu pro potvrzení původního předpokladu, protože výrobci padělků mohou být i na takové technické úrovni, kdy pouzdro dokáže perfektně napodobit. Hlavní pozornost u této metody by měla být věnována následujícím parametrům:

- Přeznačení součástky.
- Chybné vlysy.
- Struktura povrchu.
- Fyzické rozměry součástky a stav vývodů. [6]

2.1.1 PŘEZNAČOVÁNÍ SOUČÁSTEK

Synonymem pro přeznačování součástek je tzv. „blacktopping“, ve volném překladu černá poleva, což dokonale vystihuje co se děje se součástkou. Horní vrstva, kde je původní označení součástky se zbrousí, nebo chemicky odstraní, poté se na ni nanese nový povrch, nebo rovnou natiskne nové značení součástky. Aby toto mělo efekt, většinou se součástka

přeznačí na výkonnější model, což zaručuje vyšší zisk. Pro odhalení padělku vytvořeného touto metodou stačí použít obyčejný aceton, který vrstvu vytvořenou takovým způsobem naleptá a odstraní. Poté je jasně patrné, zda se jedná o originální, či padělanou součástku. Kromě výše zmíněného postupu existuje také novější a sofistikovanější postup, kdy se na horní část součástky (s odstraněným původním značením) netiskne značení, ale toto značení je vypáleno laserem. Tento princip je sice hůře odhalitelný, nicméně o poznání nákladnější.



Obrázek 8 Příklad součástky (vlevo) před a (vpravo) po použití acetonu [3]

2.1.2 Chybné vlysy

Pro správnou orientaci ve výrobě či značení pinu součástky, jsou pouzdra vybaveny z výroby tzv. vlysy. Jedná se o drobné zahloubení do pouzdra součástky, které mají většinou kulatý tvar, avšak lze se setkat i s různými jinými obrazy. Právě tyto vlysy jsou často ukazatelem na nepůvodnost součástky. Padělatelé totiž častokrát nedodrží správný tvar, popřípadě umístění na pouzdře. Není také výjimkou, že při přeznačování součástky metodou „blacktopping“, nechají ve vlysu znečištění, které je poté opticky patrné. [6]



Obrázek 9 Chybné vlysy [6]

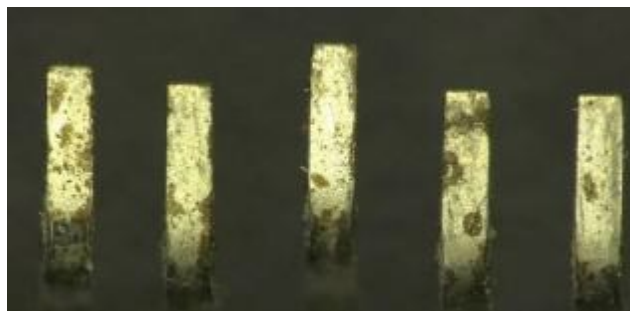
2.1.3 Analýza použitých materiálů

Materiál pouzder elektronických, zejména polovodičových součástek má specifické vlastnosti díky použitým materiálům, jako jsou polymery s příměsí skla apod. I přesto, že se padělky na první pohled mohou tvářit věrohodně, tak originální součástky budou mít pod mikroskopem vždy homogenní strukturu. V případě podezření na „blacktoping“ budou vzhledem k originálu příliš lesklé, nebo naopak příliš tmavé. [6]

2.1.4 Fyzické rozměry součástky a stav vývodů

O tom, zda souhlasí rozměry s technickou dokumentací výrobce, se může přesvědčit i naprostý laik za pomoci mikrometru, popřípadě posuvného měřidla. [6]

Co se týče stavu vývodů, tak ty by měly být z výroby rovné, se stejnou roztečí mezi nožičkami. Pokud tomu tak není, lze se domnívat, že součástka byla již minimálně použita. Mimo to, vývody mohou nést také stopy cínu, koroze či jiných nečistot. [6]



Obrázek 10 Znečištěné a nerovnoměrné vývody

2.2 Vnitřní vizuální kontrola

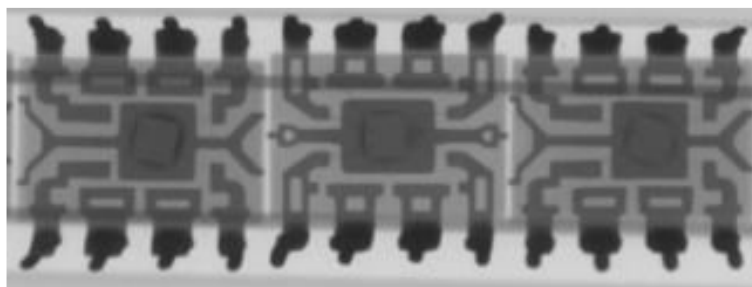
Při tomto zkoumání součástky je již vyžadováno složitější a dražší vybavení a také časová náročnost je zde vyšší. Jak je z názvu patrné, k tomu aby se dalo do součástky podívat „zevnitř“, je třeba použití různě složitých technologií a to buď:

- Rentgenové analýzy.
- Akustické mikroskopie.
- Infračervené termografie. [3]

2.2.1 Rentgenová analýza

Rentgenová analýza často následuje až po vizuální kontrole, protože je o poznání složitější. Výhodou této metody je to, že je nedestruktivní. Rentgenové paprsky velmi dobře

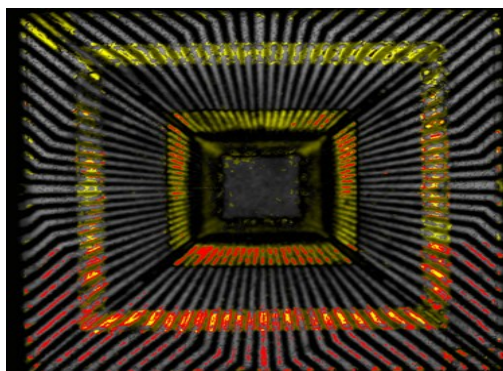
prochází hmotou nehermetických pouzder, ze kterých jsou polovodičové součástky často vyráběny, a tudíž si lze udělat přesný obrázek o tom, co se v pouzdru skutečně nachází a zda to co tam je, tam skutečně být má. Mimo kontrolu plagiátů je tato metoda vhodná pro výrobce samotné, jelikož se dá provádět plně automatizovaně a rychle, navíc i při zabaleném výrobku. [3]



Obrázek 11 Rentgenová analýza součástky [3]

2.2.2 Akustická mikroskopie

I v případě akustické mikroskopie se jedná o nedestruktivní metodu. Tato metoda má smysl v tom, že dokáže člověku vykreslit různé anomálie v pouzdrech elektronických součástek. Princip funkce celého zařízení je takový, že ultrazvukový vysílač posílá ultrazvukové vlny o frekvenci 100 Mhz – 2 Ghz skrz médium, nejčastěji destilovanou vodu, do součástky. Při dopadu zvukové vlny do vnitřní struktury součástky se některé vlny odrazí a vzniknou tzv. echa. Tyto echa se poté vhodně přemodulují do jasu na monitoru a dají tak vzniknout tzv. C skenům. Tyto skeny poté ukazují, kde je součástka propojena a kde případně propojení chybí. Velkou výhodou oproti rentgenové analýze je to, že akustická mikroskopie dokáže odhalit i velmi malé trhliny, dutiny a mezery ve vnitřní struktuře součástky. Nevýhodou je potom především časová náročnost celé metody. [6; 8]

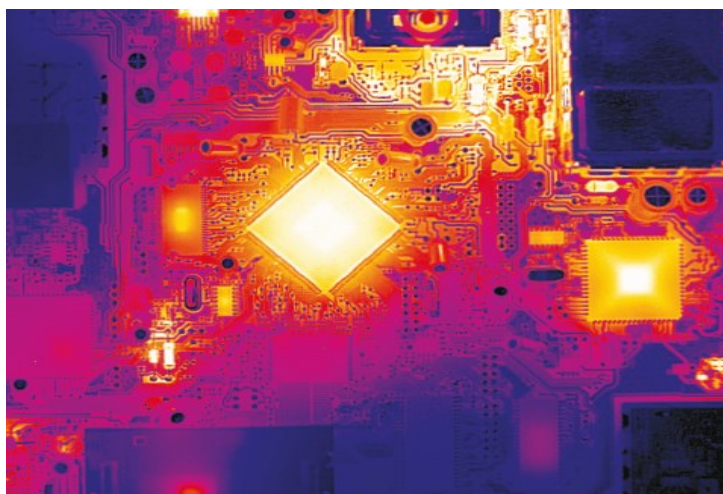


Obrázek 12 Akustická mikroskopie [8]

2.2.3 Infračervená termografie

Tato metoda je založena na předpokladu, že padělaná součástka vyzařuje odlišnou tepelnou energii než součástka originální. Vychází se zde z teorie, že cokoliv, co má teplotu vyšší než je absolutní nula, vyzařuje infračervené záření a velikost tohoto záření závisí na teplotě daného objektu. Čím je objekt teplejší, respektive čím více tepelné energie do okolí vyzařuje, tím vyšší je také infračervené záření, které vydává. Jelikož je vlnová délka tohoto záření delší, než jsou vlnové délky záření, které je možno vnímat lidským okem, není toto záření pozorovatelné bez dalšího technického vybavení. Toto záření může dosahovat vlnových délek v rozmezí od 780 nm až do 1 mm. K pozorování se využívá tzv. termokamer, které jsou citlivé právě na infračervenou oblast.

Při použití této metody se předpokládá odhalení padělaných součástek, které jsou nejčastěji upraveny tak, aby se jevily jako výkonnější. Taková součástka potom bude vyzařovat odlišné množství infračerveného záření, než součástka originální. [6]



Obrázek 13 Příklad použití infračervené termografie [9]

2.3 ANALÝZA POUŽITÝCH MATERIÁLŮ

Tyto metody zkoumají součástky na základě použitých materiálů. K tomuto testování jsou zapotřebí dvě součástky, jedna originální, odkud se berou data pro porovnání a jedna, u které máme podezření na padělek. K tomuto lze využít několika metod, a to:

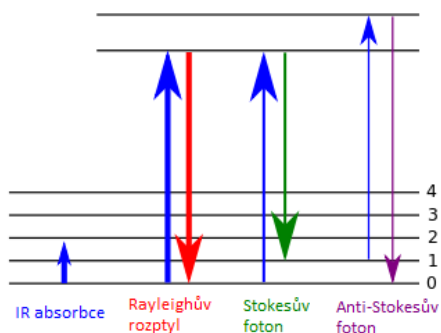
- Ramanovy spektroskopie.
- Rentgenové fluorescenční spektroskopie - XRF. [1; 6]

2.3.1 Ramanova spektroskopie

Ramanova spektroskopie je metoda, která má široké pole využití. Kromě možnosti využít ji k posuzování pravosti součástek, nachází také uplatnění při analýze jiných pevných látek, kapalin, plynů, povrchů atd. Metoda nese jméno po Chandrasekharu Vankata Ramanovi, který jako jeden z prvních popsal její princip na základě neelastického optického rozptylu. [10]

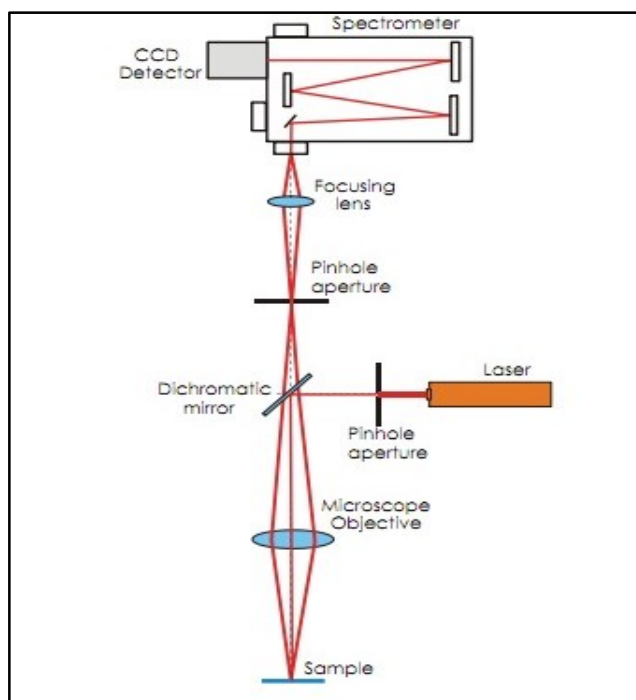
Kromě názvu celé metody je po Chandrasekharu Vankata Ramanovi pojmenován také tzv. Ramanův jev, který je základem pro Ramanovu spektroskopii. Tento jev nastává při vzájemném působení laserového paprsku a elektronů (v tomto případě) pouzdra zkoumané součástky. Mezi pouzdrum součástky a laserovým paprskem mohou nastat tři druhy interakcí:

1. V prvním případě, který je také nejčastější, dojde k tomu, že je elektron laserovým paprskem vybuzen, z jeho základního stavu, do vyššího energetického stavu. V takovém stavu potom zůstane po velmi krátkou dobu, aby se následně opět vrátil do svého původního stavu. Při tomto procesu zároveň dochází k uvolnění energie, která se projeví jako vyzáření fotonu. Tento foton má stejnou vlnovou délku, jako laser, kterým byl vybuzen, a tak nese žádnou informaci o zkoumaném pouzdru součástky. Jedná se o tzv. Rayleighův rozptyl.
2. V druhém případě se elektron již nevrátí do původního stavu, ale zůstane na vyšší energetické hladině. Díky tomu dojde opět k vyzáření fotonu, avšak tento foton již nese informaci o materiálu zkoumaného pouzdra, a to díky změně jeho vlnové délky, která je delší, než má budící laser. Tyto fotony mají speciální označení – Stokesovy fotony.
3. V třetím případě se elektron na rozdíl od druhého případu dostane naopak do nižší energetické hladiny. Tím dojde opět k vyzáření fotonu ale s nižší vlnovou délkou, než měl budící laser. Těmto fotonům se říká Anti-Stokesovy fotony. [22]



Obrázek 14 Interakce fotonu [22]

Z toho lze vypožorovat, že pokud použijeme k ozáření dané součástky monochromatické světlo, což je světlo pouze o jedné frekvenci, bude ve spektru rozptýleného záření část čar s posunutou vlnovou délkou, oproti původní vlnové délce monochromatického světla. Díky záření s posunutou vlnovou délkou lze analyzovat materiály použité na výrobu pouzdra, protože pro jednotlivé materiály jsou specifické posuny vlnové délky. [10]



Obrázek 15 Princip Ramanovy spektrografie [10]

Stěžejní vlastností Ramanovy spektroskopie při analýze padělaných součástek je to, že díky ní lze zkoumat a identifikovat látky pouzdra součástky. Je tedy vhodná k nedestruktivnímu zkoumání padělků, a to jak ke zkoumání pouzder, tak i dalších pevných látek, kapalin, plynů atd. Mezi další výhody potom patří:

- Nedestruktivní a nekontaktní metoda.
- Velmi rychlá metoda.
- Možnost dynamických studií.
- Metoda je schopná měřit vzorky různé povahy.
- Možnost využití vody jako rozpouštědla, která neovlivňuje měření.
- Možnost zkoumání i velmi malých vzorků. [4]

Metoda Ramanovy spektroskopie má i své nevýhody, mezi které patří především následující:

- Možnost ovlivnění výsledků fluorescencí.
- Pro analýzu je třeba použití citlivých přístrojů.
- Možnost zničení vzorků, které jsou citlivé na laserové světlo.
- Existují také materiály, které nejsou tzv. Ramanovsky aktivní, u těchto nelze tuto metodu použít. [4]

2.3.2 Rentgenová fluorescenční spektroskopie XRF

Stejně jako v případě Ramanovy metody dochází i zde ke zkoumání materiálu, z kterého je daná elektronická součástka vyrobena. Její využití, kromě detekce padělků, je možné také ve výrobním procesu. Konkrétně u kontroly kvality dochází k častému využití této metody, kdy dochází ke zkoumání, zda je součástka vyrobena z deklarovaných materiálů. Mimo to je možné využití této metody také pro zkoumání na přítomnost zakázaných prvků, které definuje RoHS (Restriction of the use of Hazardous Substances) směrnice. Mezi tyto prvky řadíme především:

- Olovo (Pb).
- Rtuť (Hg).
- Kadmium (Cd).
- Chrom (Cr).
- Brom (Br). [3]

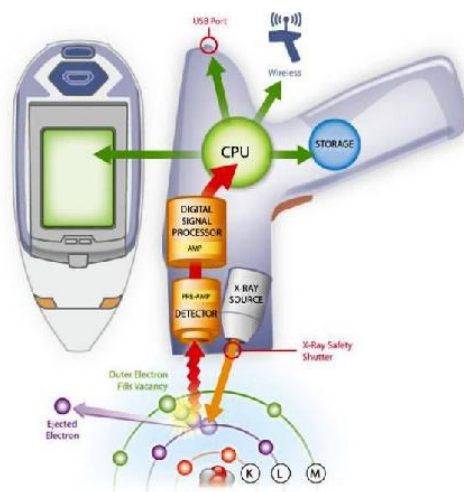
„XRF metoda používá k vybuzení proud rentgenového záření. To je schopno aktivovat vnitřní elektron, který může opustit atom. Ve chvíli, kdy se uvolní, elektrony z vyšších slupek přeskóčí na jeho místo a uvolní přebytečnou energii ve formě fotonu. Elektrony mohou změnit umístění kaskádovitě, takže se může objevit spektrum různých fotonů. Právě toto fluorescenční spektrum se používá k identifikaci atomu. Protože každé atomové jádro

má jinou sadu těchto elektronů s mírně odlišnými energiemi, sledováním vyzářených elektronů získáváme informaci přímo o přítomném jádře a tedy i o typu atomu.“ [3]



Obrázek 16 Princip rentgenové spektroskopie [3]

Existují také ruční zařízení pro rentgenovou spektroskopii ve tvaru pistole. Tato zařízení jsou používána zejména při kontrolách u distributorů a také přímo ve výrobě. Díky nízké hmotnosti a rozměrům celého zařízení, jsou velmi flexibilní a rychlé. Lze s nimi analyzovat jak kovové, tak i nekovové součástky. [3]



Obrázek 17 Příruční XRF zařízení [3]

2.4 Elektronické měření

Elektronickým měřením součástek je myšleno zejména to, že se do součástky použije určitý signál, a čeká se na odezvu komponentu. Dochází zde k porovnávání odezvy originální součástky a součástky, která je podezřelá z padělání. Existuje několik typů měření podle použitého vybavení nebo podle použitých metod. [1]

2.4.1 Dělení podle způsobu měření:

- Automatické ATE. (Automatic Test Equipment)
- Manuální. [1]

2.4.1.1 Manuální měření

V případě manuálního měření součástek jsou používány zařízení jako osciloskop, ampérmetr, voltmetr, ohmmetr, generátor signálu, spektrální analyzátory atd. Tyto zařízení jsou, jak již z názvu vypovídá, k součástce připojovány manuálně a taktéž celý proces měření probíhá manuálně. Při měření dochází zejména ke zkoumání těchto parametrů:

- Napětí.
- Proud.
- Frekvence atd. [1]

2.4.1.2 Automatické měření

U automatického měření je již celý proces měření automatizovaný. Dochází zde k používání určitých univerzálních patič, kde se připojují integrované obvody a jiné součástky a ty jsou poté skrze tyto patice propojeny s ATE - přístrojem pro automatické měření. Přístroj poté analyzuje odezvu součástky na signály, které do ní posílá a tyto signály dále zpětně analyzuje a porovnává s daty z originální součástky, které jsou uloženy v paměti přístroje. ATE přístroje jsou nejčastěji řízeny systémy na základě Unix či Windows. [1]

2.4.2 Dělení podle použitých metod:

- Vyhodnocování V-A (volt – ampérových) charakteristik.
- Testování klíčových parametrů.
- Teplotní testy. [1]

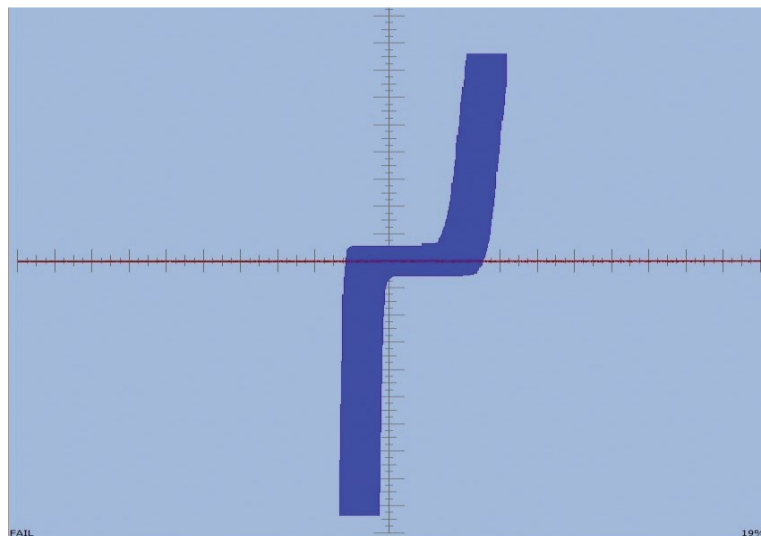
2.4.2.1 Vyhodnocování V-A charakteristik

Testování volt – ampérových charakteristik, patří k velmi používaným metodám detekce vad. K jejím výhodám patří zejména to, že se jedná o nedestructivní metodu, která se tedy nijak nepodepíše na testované součástce. Test samotný se provádí na speciálním zařízení, které porovnává V-A charakteristiku testované součástky s V-A charakteristikou referenční součástky. Tvar charakteristiky je dán Ohmovým zákonem ($U = R \cdot I$),

kdy lze zobrazovat např. změnu průběhu proudu, mezi určitou dvojicí vývodů, která je závislá na přiloženém napětí. [1; 6; 11]

Podle toho, jak jsou charakteristiky zdeformované či odlišné od referenční součástky, lze poukazovat na pravděpodobnou poruchu u dané součástky. V dnešní době se můžeme nejčastěji setkávat s vícekanálovými detektory padělaných součástek, které fungují např. v režimech:

- Základní testování – v tomto případě je IO (integrováný obvod) testován tak, že je testován bez napájení. Dochází k testování jednoho vývodu se všemi ostatními nebo testování každého vývodu s každým – tzv. maticové testování. V tomto režimu je možné detekovat různá poškození, například nepropojený vnější vývod se systémem na čipu i součástku vystavenou zvýšenému tepelnému zatížení apod.
- Pokročilé testování s napájením – tady je již k součástce přiloženo napájení a je testována tak, že dochází k vykreslení křivky vztahů každého pinu s každým. Toto testování může odhalit další výrobní a parametrické chyby. [1]



Obrázek 18 Příklad základního testování – nepropojený vývod [11]

2.4.2.2 Úplný parametrický test

Testování klíčových parametrů se používá zejména při podezření, že je daná součástka přeznačena na její vyšší typ. Právě otestováním jejich parametrů lze dojít k závěru, zda součástka je, či není padělaná. Je možné takto ověřovat např. její výkon, zatížitelnost, zahřívání, a další parametry. Testování probíhá nejčastěji za pokojové teploty 25°C, lze se ale setkat i s testováním za vyšších teplot, pokud jsou deklarovány stálé parametry

i za takových teplot výrobcem. Nevýhodou těchto testů je to, že jsou velmi nákladné, ať už na vybavení, tak i na čas a peněžní prostředky. Naopak výhodou je vysoká přesnost a spolehlivost. [1]

2.4.2.3 Životnostní a spolehlivostní testy

Při těchto testech dochází k záměrnému zatěžování součástky, často až na okraj jejích parametrů tak, aby se projevil různé odchylky a neočekávané chyby v součástce. Nejčastěji dochází k tomu, že součástka musí pracovat za velmi nízkých, nebo naopak velmi vysokých teplot, kdy tyto teploty ale nesmí překročit destrukční mez, dále při zvýšeném napětí apod. Toto testování má za cíl simulovat měsíce, popřípadě roky reálného provozu součástky a ukázat tak, zda je schopna takové funkce, k jaké byla navržena dlouhodobě. Tyto testy mají uplatnění zejména tam, kde je podezření na špatné označení součástky, které by se poté použily např. ve vojenském, kosmickém či leteckém průmyslu, a mohly by tak způsobit nedozírné škody. [1]

2.4.3 Omezení při testování

I přes to, že elektronické testování součástek je mnohdy efektivnější pro odhalování padělků než vizuální metody, je i zde několik omezení, se kterými je nutno počítat. Mezi tyto omezení patří především:

- **Změna výrobního procesu** – Výrobci mohou měnit výrobní proces daných součástek. Může se poté například stát, že i originální součástka je vyrobena např. z jiného materiálu, avšak bez vlivu na technické specifikace. Proto je potom nutné udělat nové referenční měření, které stojí časové i finanční náklady navíc.
- **Testovací čas a náklady** – U tzv. „životnostních“ testů se zvýšeným tepelným zatížením, kdy testování trvá častokrát i desítky hodin jdou ruku v ruce vysoké časové i finanční náklady.
- **Nedostatek informací o součástce** – Lze se setkat s případy, kdy ani výrobce nemá přesné charakteristiky výrobku. Jedná se o případy, kdy již součástku nevyrobí apod. Možnost srovnání s originálem je tedy potom téměř nemožná.
- **Nedetektovatelnost** – i přes velmi sofistikované metody odhalování padělků se lze setkat s případy, kdy je detekování nemožné. Jde o případy nadprodukce apod. [1]

3 MATERIÁLY PRO ZAPOUZDŘENÍ SOUČÁSTEK

V podstatě lze pouzdra elektronických součástek rozdělit podle toho, zda jsou oddělena či nikoliv od vnějších vlivů, na pouzdra:

- Hermeticky uzavřená.
- Nehermeticky uzavřená. [6; 15]

Zapouzďení elektronických součástek má samozřejmě svůj význam především v ochraně dané součástky. Jedná se o ochranu před poškozením:

- Mechanickým.
- Tepelným.
- Elektrickým.
- Chemickým.
- Povětrnostními podmínkami.[6; 16]

3.1 Hermeticky uzavřená pouzdra

Základní vlastností těchto pouzder je to, že jejich obsah je absolutně nepřístupný okolí. Nedostanou se do nich tedy ani plyny, aerosoly a jiné látky. Jejich použití je rozšířeno především u aplikací, kde se vyžaduje vysoká spolehlivost a schopnost pracovat v nejrůznějších podmínkách okolí. Základním materiálem, který se používá k výrobě takových pouzder, jsou hlavně kovy a keramika. I přes dobré tepelně vodivé vlastnosti kovů, je teplo ze součástky odváděno skrze její základnu a jen malá část se odvádí skrze pouzdro součástky. [6; 15]

3.1.1 Keramická pouzdra

Keramická pouzdra svým principem připomínají jakýsi sarkofág. Dodávají se totiž jako duté pouzdra a až poté je do nich vložena elektronika. Aby byl jejich obsah propojen s okolím, jsou do pouzdra implementovány vodiče, které propojují vnitřní elektroniku s vnějškem - vývody pouzdra. Poté, co je do nich vložena elektronika, jsou pouzdra hermeticky uzavřena za pomoci zlato-cínové pájky, popřípadě je použito keramické víčko se skleněnou fritou. Mezi hlavní výhody keramických pouzder patří to, že jsou velmi odolná proti korozi, opotřebení, oplývají vysokou pevností, také téměř nevedou teplo a excelují elektro-izolačními vlastnostmi. [6; 15]

3.1.2 Kovová pouzdra

Z vývojového hlediska se jedná o nejstarší typ pouzder. Jako základní materiál jak již název vypovídá je použit kov, v tomto případě konkrétně kovová destička. Skrze tuto destičku jsou vyvedeny průchody pro vodiče, které dále vedou do pouzdra, které má nejčastěji sloupový tvar. Nad kovovou destičkou je uvnitř vyveden kus propojovacího drátu navíc, aby mohlo dojít k propojení elektroniky uvnitř pouzdra s okolím. Celá součástka se poté uzavře kovovou hlavičkou, která se ke zbytku pouzdra navaří laserem. [6]

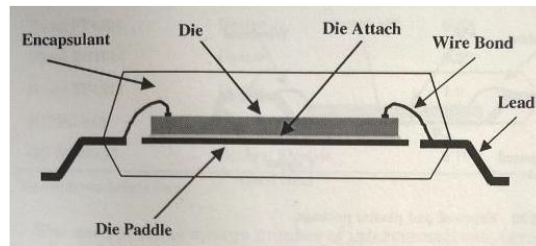
Tyto pouzdra nalézají uplatnění zejména při použití s nízkým napětím. Součástky, které je nutné využívat v aplikacích s vysokým napětím, jsou obvykle složeny z mědi, wolframu, stříbra a jiných materiálů. [6; 15]



Obrázek 19 Příklad použití kovového pouzdra [18]

3.2 Nehermetická pouzdra

„Ve většině aplikací jsou integrované obvody zapouzdřeny do tvarovaných plastových pouzder zvaných Plastic Encapsulated Microcircuits (PEMs). Tento způsob zapouzdření je nejběžnější, zároveň jej ovšem nelze použít u součástek, kde se vyžaduje vysoký stupeň spolehlivosti. Pouzdra PEMs jsou používána u typů pouzder SOIC, SOJ, PLCC, BQFP, TQFP a TSOP.“ [6]

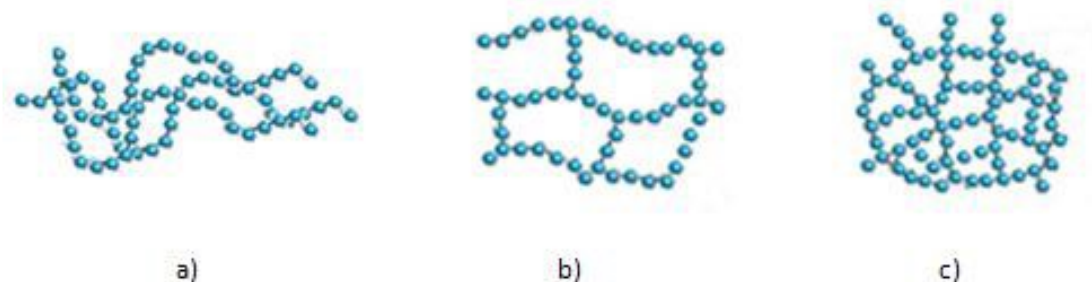


Obrázek 20 Průřez PEMs pouzdrém [6]

3.2.1 Plastová pouzdra

Základním materiálem pro výrobu plastových pouzder jsou polymery. Polymer jako takový je složen z makromolekul, které jsou zase složeny z velkého počtu menších molekul, kterým se říká monomery. Pokud je třeba vyrobit polymer, je nutné pospojovat jednotlivé monomery do sebe, tomuto procesu se pak říká polymerace. Z toho vyplývá, že plastová pouzdra jsou složena z atomů a molekul. Podle toho, jaké chemické vazby se v polymeru nachází, lze plastová pouzdra dělit do třech kategorií:

- **Termoplasty** – zvláštností u termoplastů je vliv teploty na jejich vlastnosti. Při vysokých teplotách jsou termoplasty vláčné a tvarovatelné, avšak za normální (pokojové) teploty jsou tvrdé a často i křehké. Mezi zástupce termoplastů patří například styreny, vinyly, akryly apod. Obrázek 21 a) [6; 15]
- **Reaktoplasty** – mezi jejich hlavní vlastnosti patří především mechanická a fyzická odolnost. Tento fakt vychází z jejich silné struktury, viz Obrázek 21 b). S jejich výhodami přímo souvisí i nevýhody, a těmi je zejména křehkost a špatná pružnost. S termoplasty sdílí reaktoplasty to, že pokud je zahřejeme, jsou tvárné a pružné, avšak tento proces je nevratný. K zástupcům reaktoplastů patří nejruznější druhy pryskyřic, silikony, polyestery atd. [6; 15]
- **Elastomery** – za normálních podmínek jsou velmi elastické a tvarovatelné. Podobně jako u reaktoplastů a termoplastů i elastomery reagují na změny teploty. Tyto změny nejsou však příliš patrné. Dochází pouze k jakémusi vytvrzování materiálu, kterému se odborně říká vulkanizace. Mezi výhody elastomerů patří v první řadě vysoká odolnost proti prasknutí a zlomení. Díky jejich elasticitě jsou však nevhodné pro výrobu pouzder elektronických součástek. Mezi zástupce elastomerů se řadí především kaučuk, ethylen-propylen, neopren atd. Obrázek 21 c) [6; 15]



Obrázek 21 Struktura jednotlivých polymerů [6]

3.3 Technologie výroby u pouzder polovodičových součástek

Při aplikování technologie laserové ablace je vhodné znát jak materiály pro výrobu pouzder polovodičových součástek, tak i technologii jejich výroby. Obecně lze tvrdit, že polymery užívané k výrobě pouzder je nutné pro tuto technologii nejdříve zahřát a až poté tvarovat do požadovaných tvarů. Mezi metody, jak tohoto docílit, patří:

- **Vstříkování** – při tomto technologickém postupu je nutné hmotu pro výrobu pouzdra nejdříve přehřát. Jakmile je hmota přehřátá, může dojít k jejímu naplnění do hydraulického vstříkolisu, odkud putuje dále do formy. V tomto zařízení díky vysokému tlaku stoupne teplota na bod, kdy se začne materiál tavit. Díky tomuto postupu je materiál tekutý, a může se tak dopravit speciálním kanálkem až k obnažené součástce, která čeká na zalívání. Jakmile je tento proces ukončen, dojde k ochlazení formy, kde docházelo k lisování, aby mohla hmota uvnitř vytuhnout. Potom co je hmota vytvrzená, odstraní se forma a součástka je zalívána. Základním stavebním materiálem pro tuto technologii jsou především termoplasty a reaktoplasty. [6; 15]
- **Zalévání** – tato technologie nalézá uplatnění zejména u malovýroby a omezených sérií součástek. Podobně jako v předchozím případě jsou reaktoplasty, které se používají pro výrobu touto metodou zahřátý na teplotu tání a touto hmotou je součástka s vývody zalita. Základní materiály využívané k zapouzdřování součástek touto metodou jsou pryskyřice, polyestery, silikony atd. [6; 15]
- **Fluidizace** – „*Fluidizace je proces, kdy sypká prášková hmota nabývá vlastností kapalin. Podstatou procesu fluidizace jsou drobné pevné částice plastické hmoty. Tyto částice jsou umístěny v nádobě s perforovaným dnem, kterým do nádoby proudí vzduch. Pokud je průtok vzduchu malý, prochází proud vzduchu mezi částicemi*

a celkově hladinou téměř nepohne. Jde o ustálený stav.“ Pokud je naopak proud vzduchu velký, jsou drobné částice vymršťovány z pracovního prostoru. Pokud je proud mezi těmito extrémy, dochází k vzednutí hladiny, která ale nepřesáhne okraj pracovní nádoby. Tento stav se nazývá expandovaným stavem. V stavu jsou částice ve vzájemném kontaktu se všemi částicemi okolními. Ve stavu expandovaném existuje mezi jednotlivými částicemi určitá volná vzdálenost, přičemž jsou částice nesený tahem vzduchu. Expandovaný stav se dále označuje jako fluidizovaný. [17]

3.4 Typy používaných pouzder

Každá aplikace má odlišné nároky na použité pouzdra součástek, ať už se jedná o nároky na rozměry nebo vlastnosti pouzdra. Pro specifickou aplikaci, lze zvolit jeden z následujících typů pouzdra:

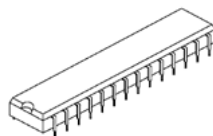
- Pouzdra vyráběná ve standardizovaných řadách.
- Pouzdra navrhovaná zákaznický.
- Pouzdra MCM.
- Pouzdra CSP. [19]

3.4.1 Pouzdra vyráběná ve standardizovaných řadách

Použití těchto pouzder je typické svojí nízkou cenou a respektovanou standardizací. Jedná se o levné řešení, protože výrobce nemusí vyvíjet nové technologické postupy pro každou zakázku zvlášť. Pouzdra vyráběná touto metodou jsou vhodná pro součástky, které jsou jednoduché a nemají velký počet vývodů. Díky standardizaci je zde problém s možností přizpůsobit pouzdro pro požadavky dané aplikace. Mezi tyto typy pouzder patří zejména pouzdra:

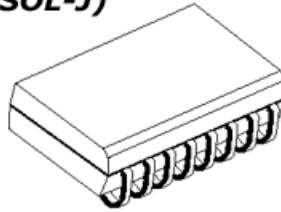
- **DIP/DIL (Dual In-Line Package)** – klasické pouzdro u kterého vývody prochází skrze otvory v plošném spoji. Vzdálenost jednotlivých pinů je cca 2,5 mm. [19]

DIP (DIL)



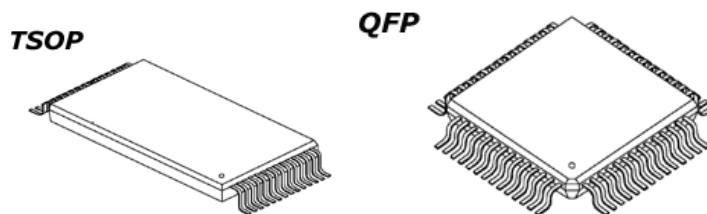
Obrázek 22 DIP Pouzdro [20]

- **SOJ (Small outline “J” leads)** – dalším názvem pro tento typ pouzdra je (SOL-J). [19]

SOJ (SOL-J)

Obrázek 23 SOJ pouzdro [20]

- **QFP (Quad Flat Pack)** – Jedná se o standardizovaný typ pouzdra, u kterého je předpoklad povrchové montáže. Liší se tyto pouzdra mohou délkou pinů. Dalšími alternativami pro tento typ pouzdra jsou TQFP, PQFP, TSOP. [19]

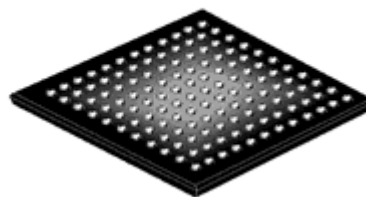


Obrázek 24 TSOP a QFP Pouzdro [20]

3.4.2 Pouzdra navrhovaná zákazníky

Jak již název napovídá, u těchto typů pouzder je možné na přání zákazníka manipulovat například s velikostí a počtem vývodů daného pouzdra apod. Jejich neodmyslitelnou výhodou je to, že díky variabilitě při výrobě může docházet k mnohem vyšší miniaturizaci, než je tomu v případě standardně vyráběných pouzder. K nevýhodám tohoto typu pouzder patří vyšší cena a delší čas potřebný k jejich výrobě. Do této kategorie řadíme pouzdra:

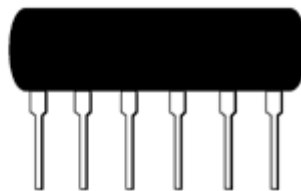
- **BGA/PGA (Ball grid array)** [19]

BGA

Obrázek 25 BGA Pouzdro [20]

- SIP – (Small Inline Package) [19]

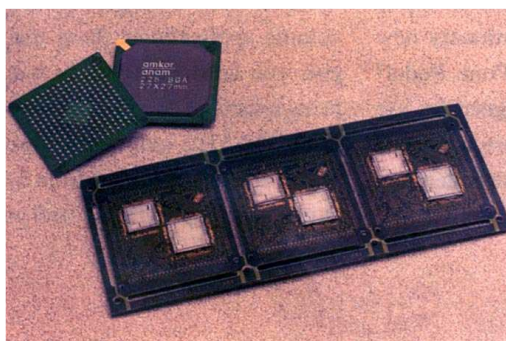
SIP



Obrázek 26 SIP Pouzdro [20]

3.4.3 Pouzdra MCM

Označení tohoto pouzdra v sobě skrývá zkratku anglického sousloví MultiChip Module. Což se dá volně přeložit jako více čipů v jednom modulu a přesně tak tomu je i ve skutečnosti. Tyto pouzdra se začala vyrábět v osmdesátých letech minulého století jako odpověď na stále se více prosazující miniaturizaci. Základní filozofie tohoto pouzdra je taková, že dva čipy (popřípadě i více) jsou v takovém pouzdře propojeny rychlejší cestou, než pokud by např. byly na plošném spoji napájeny samostatně. Díky tomu je komunikace mezi čipy efektivnější a s minimem parazitních vlastností. [19]



Obrázek 27 Příklad MCM pouzdra [19]

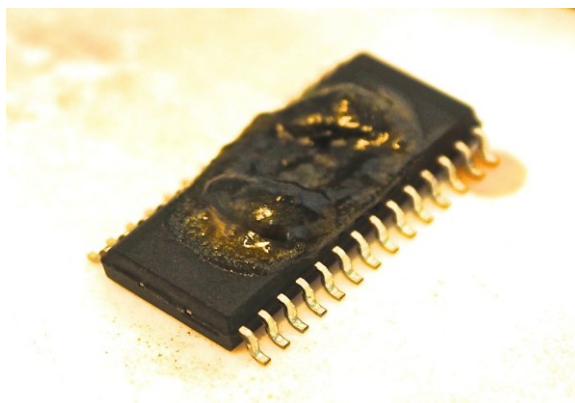
3.4.4 Pouzdra CSP

CSP (Chip Scale Packing) pouzdra se ještě více podrobují minimalizaci a to tak, že pouzdro nepřesahuje víc než 120% čipu samotného. Díky tomu jsou takové součástky extrémně malé s nízkými požadavky na prostor. Využití těchto pouzder je všude tam, kde je vyžadována vysoká hustota součástek na jednotku plochy. Kromě malých rozměrů se výrobci snaží docílit co nejmenšího přesahu nožiček, které jen o malou část přesahují samotnou plochu pouzdra. [19]

4 ZPŘÍSTUPNĚNÍ SOUČÁSTKY ZA POMOCÍ LASEROVÉ ABLACE

Získání přístupu k vnitřní struktuře součástky se anglicky označuje jako tzv. „decapsulation“, tento pojem vychází z jeho anglického ekvivalentu. Ke zpřístupnění obvodů a vnitřního zapojení součástky lze využívat několika metod. Jedná se o metody:

- **Chemické** – Tyto metody je vhodné používat zejména tam, kde dochází k používání pouzder z pryskyřice, jako je např. PEM pouzdro. K odkrytí vnitřní struktury součástky se používá vhodný typ kyselin. Jedná se o kyselinu sírovou, popřípadě také kyselinu dusičnou apod. Princip metody je takový, že se koncentrovaná kyselina v předem daném množství nanese na vrchní část pouzdra a nechá se působit určitý čas. Dalším důležitým parametrem je teplota leptání. Tato teplota by měla být ideálně okolo 50°C, v závislosti na použitém leptacím roztoku. Po konci leptání je nutné součástku opláchnout např. acetonem v ultrazvukové čističce. [6; 12; 13]



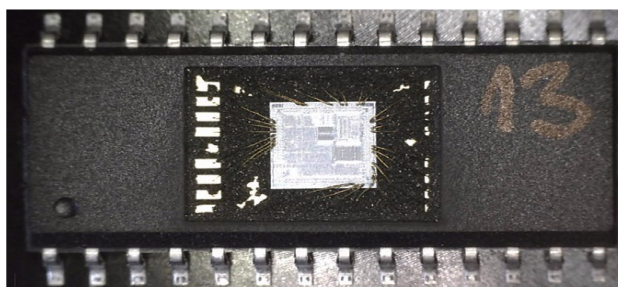
Obrázek 28 Naleptané pouzdro kyselinou [13]

- **Mechanické** – při mechanickém otevření přístupu k vnitřní struktuře součástky lze narazit také na pojem „delidding“, což je výraz pro mechanické otevření, především hermetických pouzder. Při této metodě je za pomoci vhodných nástrojů, jako je odvrtání, frézování apod., odkryt přístup k vnitřnímu zapojení součástky. Je třeba ovšem věnovat velkou pozornost tomu, aby nedošlo k poškození vnitřního zapojení součástky. Z tohoto důvodu se tento princip využívá výhradně u větších součástek s kovovými pouzdry, kde je toto nebezpečí poškození nižší. [6]
- **Laserové** – jak je již z názvu patrné, pro zpřístupnění vnitřní struktury je využit laser. [6]

4.1 Laserová ablace

Ablací je myšleno především odstranění či odpaření materiálu pouzdra. Při využití laserové ablace ve vztahu k padělaným součástkám je použití zřejmé. Jedná se tedy o technologii, která má zpřístupnit vnitřní strukturu součástky, která je zalitá v nehermeticky uzavřeném pouzdře. Jde o destrukční metodu, avšak pokud jsou parametry laseru voleny správně, nedojde k poškození označení zapouzdrěného čipu a při kombinaci s dalšími metodami, zejména chemickým leptáním, lze zachovat i funkčnost součástky pro další testování např. V-A charakteristik nebo funkčních testů. Právě chemické leptání vhodně doplňuje tuto technologii. [14; 36]

Princip metody je takový, že je nejdříve nutné zjistit, kde se čip, popřípadě jiná elektronika v hermetickém pouzdře přesně nachází. Tohoto lze docílit např. z parametrů udávaných výrobcem, popřípadě kombinací s jinou metodou např. rentgenovou analýzou. Pokud je jasné, kde se čip nachází, dojde k zadání souřadnic za pomoci CAD specifikace do laserového zařízení. Laser, který je nejčastěji řízený ve třech osách, potom na základě zvolených parametrů ozařuje dané místo. Díky reakci laserového paprsku, který v sobě nese určitou energii, a materiálu pouzdra součástky, dochází k odpařování materiálu pouzdra v místě kontaktu s laserovým paprskem. Tyto výpary je nutné odvětrávat odsávacím zařízením. Bohužel nevýhodou této metody je nutnost specifického nastavení parametrů tak, aby systém na čipu uvnitř pouzdra snesl výkon a s ním tepelné zatížení, které laser součástce předá. Dalším nežádoucím jevem při laserové ablaci je odlišná drsnost povrchu po tomto procesu. Toto je nejčastěji způsobeno tím, že pro výrobu pouzder polovodičových součástek není použit jen jeden materiál, popřípadě tento materiál, v sobě nese další příměsi pro lepší vlastnosti samotné součástky. Díky tomu, že se v něm objevují různé příměsi, dochází k tomu, že různé materiály různě absorbují laserový paprsek. Právě proto je plocha po laserové ablaci nesterjnorodá. Tento jev lze částečně eliminovat vhodným nastavením parametrů. [6; 13; 14; 36]

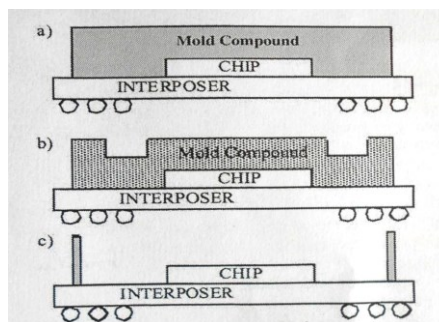


Obrázek 29 Pouzdro po laserové ablaci [14]

4.2 Kombinace metod

Ať už se jedná o laserovou ablací či chemické zpřístupnění čipu, každá z těchto metod má své výhody i nevýhody. K maximální efektivitě tedy přispěje, pokud dojde ke kombinaci těchto metod. Takový postup může vypadat následovně:

1. Laserovým zařízením se odstraní určitá vrstva ze zkoumané součástky. Nejčastěji jde o odstranění materiálu nad čipem součástky v řádech desetin milimetru viz Obrázek 30 b)
2. Dalším krokem, jak lze odkrýt samotný čip je právě použití chemie. Na součástku v místě, kde z ní bylo odstraněno několik vrstev v předchozím kroku, je nanášena ohřátá leptací kompozice na dobu, potřebnou k odleptání zbytkové ochranné vrstvy materiálu pouzdra.
3. Po skončení tohoto procesu by mělo být možné zkontrolovat povrch čipu, který byl ukryt v pouzdře a také stav vývodů, viz Obrázek 30 c). [6; 15]



Obrázek 30 Princip kombinace metod [17]

4.2.1 Nevýhody samostatného chemického ošetření

Jak již bylo napsáno výše, hlavně kvůli efektivitě celého procesu je vhodné zmíněné metody kombinovat, aby se předešlo jednotlivým nevýhodám daných metod. K hlavním nevýhodám při použití pouze chemické metody patří zejména:

- Poškození nebo zničení vnitřní struktury při špatném postupu.
- Poleptání vývodů, které vedou z pouzdra.
- Nebezpečí poleptání operátora.
- Ekologické aspekty.
- Tvar leptání je nutné předem zvolit např. laserem, nebo kulisou vymezující otvor pro leptání. [6]

PRAKTICKÁ ČÁST

5 MĚŘENÍ HLOUBKY ODEBRANÉHO MATERIÁLU

Aby se dala laserová ablace vhodným způsobem kvantifikovat, je nutné stanovit jednak měřicí postup a potom také zvolit správný přístroj na měření hloubky odebraného materiálu z nehermetického pouzdra. Existuje nespočet metod a zařízení, které se k tomuto účelu dají použít. Pro účely laserové ablace u nehermeticky uzavřených pouzder je však vyžadována vysoká přesnost v řádech stovek, spíše až desítek mikrometrů. Z tohoto důvodu přicházejí v úvahu použít metody:

- Optické.
- Světelné a laserové.
- Kontaktní úchylkoměry.

5.1 Optické měřicí přístroje – mikroskopy.

Odečítání hloubky odebraného materiálu u optických přístrojů je realizováno tak, že je na Z – ose mikroskopu buď umístěno měřidlo posuvu, nebo naopak dochází k posuvu zkoumaného předmětu na stolku ve směru osy Z. Do této kategorie spadají především všechny typy mikroskopů, jako jsou:

- Složený mikroskop – jedná se o nejpoužívanější typ mikroskopu. Nabízí velmi variabilní zvětšení od 40x do 1000x. Dají se nalézt také mikroskopy, jejichž rozsah je až do zvětšení 2000x. Nejčastěji využívaný rozsah u tohoto typu mikroskopu je však okolo zvětšení 400x – 500x. Svůj název tento mikroskop dostal, jak již z názvu vyplývá, podle toho, že je složený z několika čoček. Při průchodu obrazu těmito čočkami je postupně zvětšován až do nastaveného zvětšení.



Obrázek 31 Složený mikroskop [23]

- **Stereo mikroskop** – tento mikroskop by se dal označit za druhý nejpoužívanější. Nabízí zvětšení od 10x až do 80x s tím, že nejpoužívanější rozsah je okolo zvětšení 40x. Oproti složenému mikroskopu nabízí sice menší zvětšení, avšak ve 3D zobrazení díky dvěma světelným cestám. Vzhledem k nízkému zvětšení se však nehodí k použití pro určování hloubky odebraného materiálu, kde je vyžadováno právě zvětšení 100x – 200x pro zachování co nejvyšší přesnosti odečtu.
- **Polarizační mikroskop** – u tohoto mikroskopu dochází k ozáření objektu zkoumání polarizovaným světlem, při kterém dochází k analýze organických nebo anorganických materiálů. Pro zkoumání hloubky laserové ablace se tento typ mikroskopu nehodí.
- **Fluorescenční mikroskop** – používá se hlavně ke zkoumání fluoreskujících látek, jako jsou různé proteiny, enzymy apod. Tento typ se opět nehodí ke zkoumání parametrů laserové ablace.
- **Elektronový mikroskop** – jedná se o jeden z nejlepších mikroskopů co do zvětšení. Povrch dokáže zvětšit až 250 000x čemuž ale na druhé straně odpovídá také cena, která je okolo 2 500 000 Kč. Na zkoumání parametrů laserové ablace by byl tedy takový mikroskop zbytečně předimenzovaný.
- **Digitální mikroskop** – tyto mikroskopy jsou v podstatě kombinací některého z výše zmíněných mikroskopů a CCD čipu, který obraz z nich přenáší přes USB do počítače, odkud je následně zobrazován na monitoru. [23]



Obrázek 32 Digitální mikroskop [23]

Princip měření je takový, že se nejdříve zaostří v případě nehermeticky uzavřených pouzder elektronických součástek např. na plochu, která nebyla zasažena laserovým

paprskem. Tento bod pro nás bude tzv. referenční rovinou, od které budeme odečítat další naměřenou hodnotu. Tuto hodnotu zjistíme tak, že ve směru osy Z pohybujeme buď celým mikroskopem přes zaostřovací kolečko, nebo pouze stojanem se zkoumaným předmětem tak, aby došlo k zaostření v oblasti, kde byl odebrán materiál. Je-li zaostřeno na tuto oblast, stačí již jen odečíst naměřenou hodnotu na měřidlu od tzv. referenční roviny. Pro tento typ měření je nutné použít speciální stojan, který umožňuje nastavení minimálně ve směru osy Z.

K výhodám tohoto měření patří zejména to, že je rychlé a jednoduché. Vzhledem k nehomogennímu povrchu po laserové ablaci je další výhodou také to, že si lze určit, na kterou rovinu se bude zaostřovat. Nevýhodou takového optického měření je potom to, že je měření zatíženo subjektivním vnímáním ostrosti daného jedince, a tak se lze dopracovat k různým výsledkům v případě dvou různých osob provádějících měření.

Příkladem zařízení pro takové optické měření je mikroskop pro hloubkové měření 2034-CIL-300-ZX. Tento mikroskop nabízí zvětšení až 300x, přičemž dokáže rozlišit 0.001 mm. Cena takového zařízení je kolem 110 000 Kč. [24]



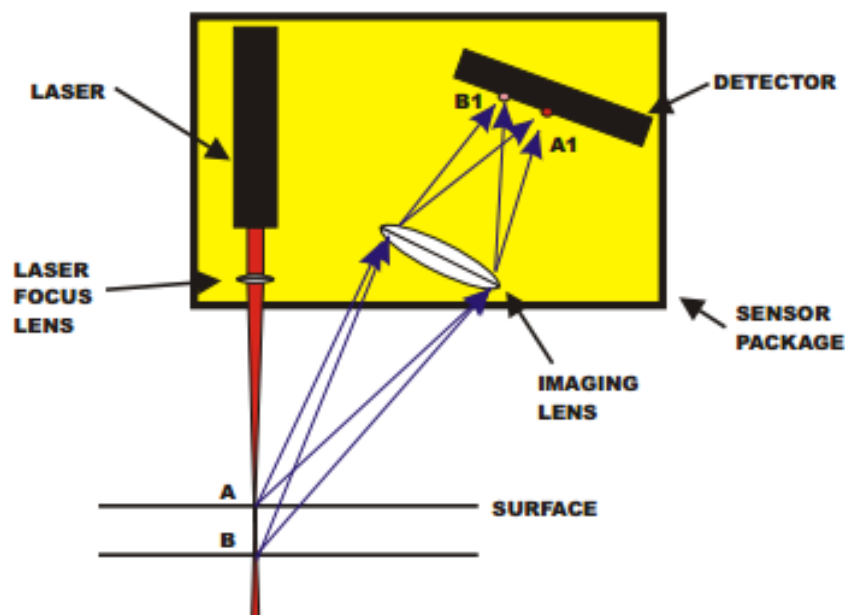
Obrázek 33 Hloubkový mikroskop [24]

5.2 Laserové a optické metody

5.2.1 Laserová triangulace

Tyto přístroje fungují nejčastěji na principu laserové triangulace. To je proces, při kterém dochází k měření jedné nebo více rovin, pomocí úhlového výpočtu. Celý princip spočívá v tom, že se promítá laserový paprsek na měřenou plochu. Od této plochy se poté odráží do světlo-citlivého elementu (nejčastěji se jedná o CCD čipy) skrze vstupní čočku pod určitým úhlem. Tento úhel je potom přepočítán na vzdálenosti měřeného předmětu od snímače. [25; 26; 27]

Mezi hlavní výhody patří to, že se jedná o bezkontaktní a velmi rychlé měření. Tyto přístroje mají další výhodu v tom, že mohou měřit také průhledné materiály. Jediným rozdílem je to, že se z měřeného materiálu neodráží jeden, ale rovnou dva paprsky. V případě laserového měření založeném na triangulačním principu jsou vždy předem stanoveny rozsahy měření, které limitují rozměry CCD čipu a jeho rozlišovací schopnost. Další vlastností těchto přístrojů je to, že u nich často bývá stanoveno více hodnot rozlišení v závislosti na vzdálenosti od čela snímače. Je to dáno zejména tím, že rozlišení snímače je pevně dané a tak čím blíže k optice přístroje se měřený předmět nachází, tím větší změny je u něj možné rozlišit. Nevýhodou tohoto principu je rozlišení pouze v řádech 0,1 mm. [25; 26; 27]



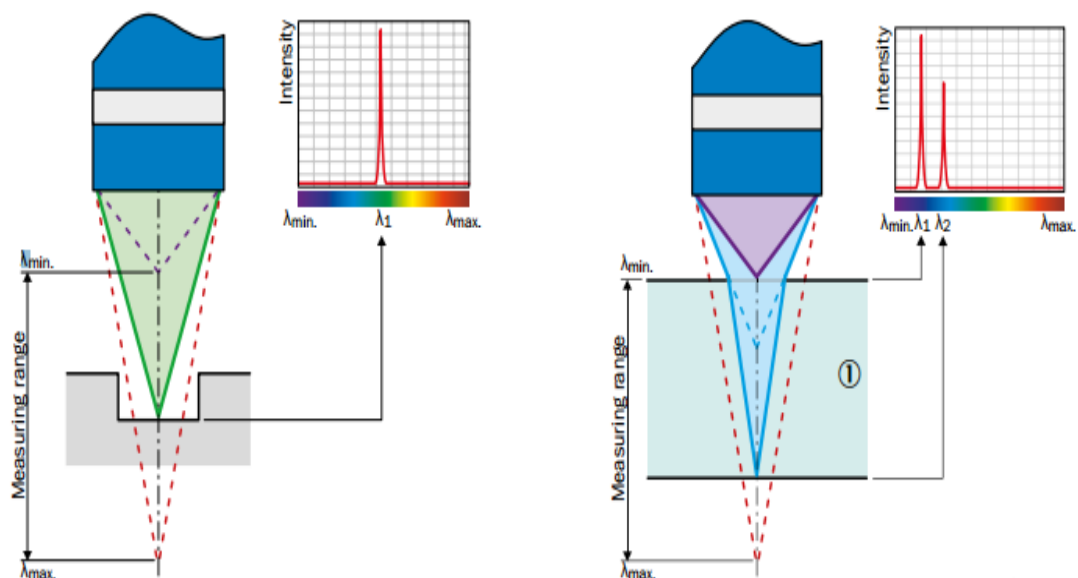
Obrázek 34 Princip laserové triangulace [25]

5.2.2 Konfokální princip

Přístroje založené na konfokálním principu optického měření vzdálenosti, patří mezi nejpřesnější přístroje měření vzdálenosti nebo hloubky na trhu. Tyto přístroje jsou schopny měřit vzdálenost v řádech jednotek mikrometrů. Další výhodou tohoto principu je to, že jej lze využít k měření hloubky jakýchkoli materiálu, včetně skleněných ploch. Mezi další výhody patří imunita vůči elektromagnetickému rušení, vysoká rychlost měření a to že se jedná o bezkontaktní měření. [28; 29]

Konfokální princip byl původně určen pro mikroskopy, kde bylo třeba zlepšit kontrast u silných tkáňových vzorků. Koncem 90. let se tento princip také rozšířil do oblasti velmi přesného měření malých vzdáleností. [29]

Princip konfokálního měření je takový, že dochází k zaostřování polychromatického bílého světla na měřenou rovinu skrze speciální objektiv. Tento objektiv je potom uspořádán tak, aby došlo k rozdělení polychromatického světla na jeho jednotlivé monochromatické složky, tedy jednotlivé vlnové délky. Světlo, které dopadá na povrch měřeného vzorku, má tedy jasně definovanou vlnovou délku, která odpovídá tzv. fokálnímu bodu, tj. měřený bod. Toto světlo (určité vlnové délky) dává tedy na rozdíl od ostatních světél (s jinými vlnovými délkami) jako jediné do objektivu ostrý obraz. Na základě tohoto je každé vlnové délce světla přiřazena odchylka a barevná složka, tedy vlnová délka, která je potom zaostřena na cílovou měřicí plochu, která vyhodnotí vlnovou délku a ostrost. [28; 29]



Obrázek 35 Konfokální princip [27]

Mezi zařízení, která jsou založena na konfokálním principu, patří senzory od firmy SICK, jedná se především o řadu OC Sharp. Toto zařízení má parametry uvedené na Obrázku 36.

Measuring range	600 μm	3 mm	12 mm
Working distance ¹⁾ , ca.	6,5 mm	22,5 mm	54 mm
Spot diameter	4 μm	12 μm	30 μm
Lateral resolution	2 μm	6 μm	15 μm
Numerical aperture	0,5	0,5	0,27
Measurement angle to surface ²⁾	90° +/- 30°	90° +/- 30°	90° +/- 15°
Thickness measuring range ³⁾	to 900 μm	to 4,5 mm	to 18 mm
Dimensions (LxD mm)	125 x 19	105,8 x 49	l = 61,1 mm d = 36 mm
Weight	71 g	501 g	281 g
Order number	6053131	6053132	6053133

Tab. 2-2: Chromatic probes, technical data

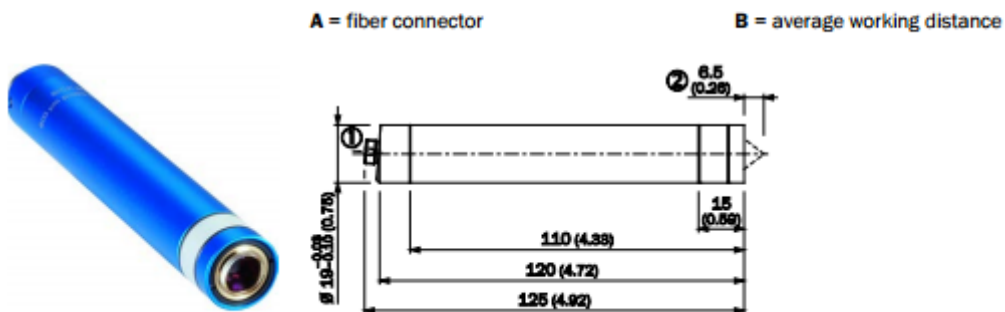


Fig. 2-6: 600 μm Probe

Obrázek 36 Parametry OC Sharp [28]

Jak je z parametrů zřejmé, pro měření hloubky odebraného materiálu po laserové ablací, se nejvíce hodí senzor s měřícím rozsahem 600 μm , popřípadě 3 mm při vyšším nastaveném výkonu a tedy i vyšší hloubce ablace.

5.3 Kontaktní úchylkoměry a výškoměry

Jak je již z názvu patrné, při měření hloubky dochází ke kontaktu měřidla s měřeným vzorkem. To může být v závislosti na povaze vzorku někdy nechtěné. U kvantifikace ablačního procesu právě může být takový problém s dotykem měřidla a vzorku. Do tohoto typu měřidel patří nejrůznější hloubkoměry, úchylkoměry, mikrometry, posuvná měřidla a výškoměry. V podstatě se jedná o nejjednodušší měření, kdy je měření prováděno odečtem od referenční hodnoty. Princip měření je tedy takový, že je-li měřící zařízení fixováno na stojanu, dojde k naměření jedné roviny (např. povrch pouzdra součástky). Od této roviny je odečtena naměřená hodnota v otvoru po laserové ablací. Rozdíl potom udává tloušťku

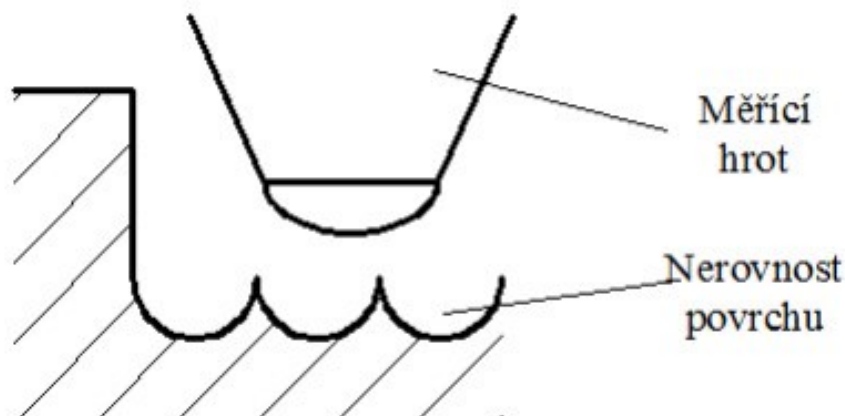
odebraného materiálu ablačním procesem. V závislosti na použitém měřicím přístroji se lze dostat na přesnosti měření uvedené v tabulce 1.

Tabulka 1 Přehled kontaktních měřidel

Název měřidla	Rozlišení [mm]	Přesnost [\pm mm]	Rozsah[mm]
Posuvné měřidlo	0,01	0,03	150 - 300
Úchylkoměr	0,001	0,003	0-25
Hloubkoměr	0,001	0,004	0 - 25
Mikrometr	0,001	0,002	0-25
Výškoměr	0,01	0,03	0-300

5.4 Porovnání kontaktních a bezkontaktních metod

Vzhledem k různým fyzikálním principům měření, se ne všechny měřicí metody hodí právě pro měření tloušťky odebraného materiálu. Zároveň je nutné brát ohled na vybavení školních laboratoří a tomu částečně přizpůsobit metody měření. Pro měření kvantifikace laserového ablačního procesu lze doporučit zejména měření založené na optickém principu, jelikož jeho parametry nejvíce vyhovují požadované přesnosti měření. Oproti kontaktnímu měření má tu výhodu, že je nezávislé na nerovnosti povrchu, které může způsobovat rozdílné výsledky naměřených hodnot a tím pádem i větší konečnou chybu měření.



Obrázek 37 Chyba vzniklá nerovností povrchu [30]

6 APLIKOVANÝ VLÁKNOVÝ LASER

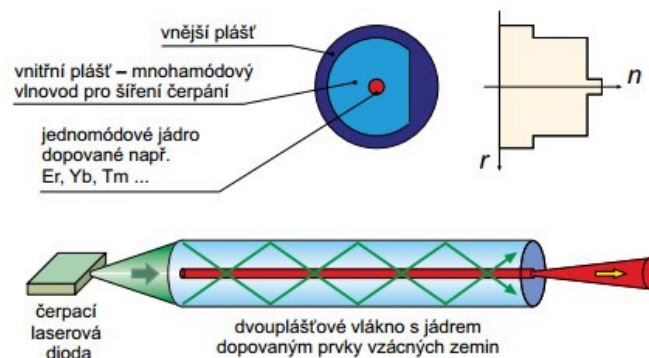
Historie vláknových laserů sahá až do roku 1960, kdy byly vyvinuty těsně potom, co poprvé Theodore Maiman koherentním světlem ozářil krystal rubínu. V návaznosti na tento pokus sestavil Elias Snitzer první vláknový laser, který používal jako aktivní prostředí skleněné vlákno s neodymovým jádrem. Laser tehdy fungoval na vlnové délce 1060 nm. Zdrojem záření byla výbojka, kolem které bylo optické vlákno obmotáno. Od té doby byly potom vláknové lasery na dlouhou dobu zapovězeny, až do devadesátých let minulého století, kdy došlo k jejich opětovnému zkoumání a nasazování vzhledem k vynálezu EDFA – Erbium Doped Fiber Amplifier, který slouží jako zesilovač optického signálu a taktéž se může využívat u vláknových laserů. [31]

6.1 Princip vláknového laseru

Vláknový laser je v podstatě optický oscilátor, který sestává ze třech nejdůležitějších součástí:

- Laserové čerpací diody.
- Koherentního optického zesilovače.
- Systému zpětné vazby zrcadly, nebo FBG – Fiber Bragg Grating.

Laserová dioda je zdrojem záření, které je zesilováno koherentním optickým zesilovačem skrze zpětnou vazbu. Je vyžadováno, aby se jednalo o koherentní zesilovač, protože je nutné, aby zůstaly zachovány vlastnosti vyzařovaných fotonů laserovou diodou. Právě optické vlákno tvoří v tomto případě daný zesilovač a to díky tomu, že obsahuje některý z prvků vzácných zemin jako je erbium, ytterbium nebo thulium. Prakticky tento jev funguje tak, že optické vlákno je tzv. aktivní, což v tomto případě znamená, že jím záření z laserových diod pouze neprochází, ale také dochází k jeho zesilování. [31; 32]

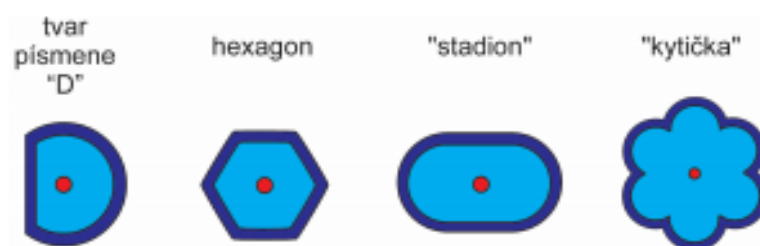


Obrázek 38 Vláknový laser [31]

Nejdůležitější vlastností, která mnohonásobně zvýšila výkon vláknových laserů, je právě metoda čerpání aktivního prostředí skrze plášť. Tato metoda byla vyvinuta v polovině osmdesátých let minulého století a používá se dodnes. Díky tomuto principu dochází k transformaci rozbíhavého světelného paprsku z optických diod do jednomódového laserového paprsku charakteristického nízkou divergencí. [31; 32]

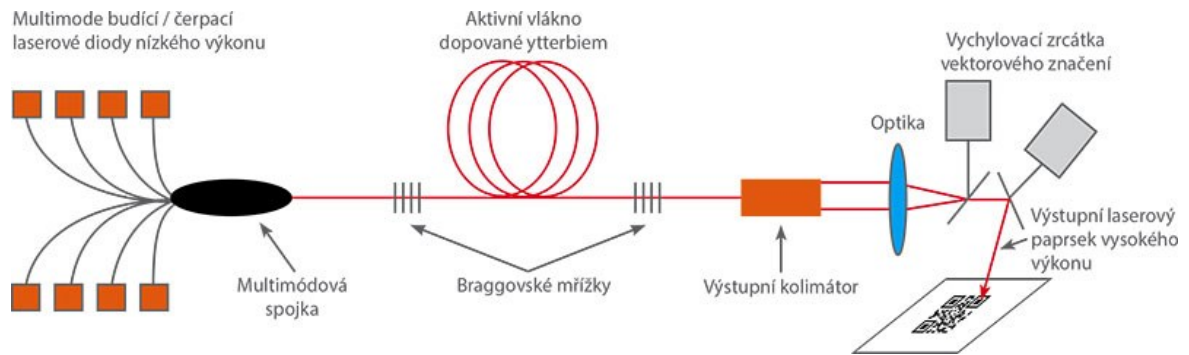
„Jádro je většinou jednomódové. Vnitřní plášť je též obklopen materiálem s nižším indexem lomu, než má sám, např. polysiloxanovým polymerem nebo akrylátém. Vnitřní plášť tedy slouží také jako vlnovod, a to pro šíření čerpání. Protože vnitřní plášť má relativně velkou plochu průřezu, je možné do něj účinně navázat z čerpacích diod vysoký optický výkon. Jak se čerpací záření šíří podél vlákna, stále znovu křížuje oblast dopovaného jádra a je v něm absorbováno na iontech vzácných zemin. Excitované ionty pak mohou formou stimulované emise předat svou energii zesilovanému signálu. Oproti klasickým pevnolátkovým laserům mají tyto lasery inherentně vysokou stabilitu a provozní spolehlivost, kompaktnost a malé rozměry, díky jednomódovému jádru i výbornou módovou kvalitu výstupního svazku. Vzhledem k velké délce aktivního prostředí mají lepší odvod tepelných ztrát a odpadá komplikované chlazení.“ [31]

Bez zajímavosti není ani to, že se pro metodu čerpání přes plášť nehodí kruhový průřez optických vláken. Je to proto, že paprsky v optickém vláknu obíhají kolem jádra, a nemohou tak být pohlceny v jádře a předat energii aktivnímu prostředí. Z tohoto důvodu se používají jiné tvary než kulové, viz Obrázek 39. [32]



Obrázek 39 Tvar používaných průřezů optických vláken [32]

Zpětná vazba je potom realizována zesilovačem, který se vkládá mezi dvě zrcadla, z nichž jedno je polopropustné a vychází jím tak laserové záření ven. Další možností jak konstruovat zpětnou vazbu je použití Braggovských vláknových mřížek - FBG. Tyto mřížky jsou přímo navařeny na vláknový zesilovač. Jedná se o část vlákna, kde se periodicky mění jeho index lomu. Důvodem použití FBG je to, že odráží pouze světlo, které se rovná dvojnásobku mřížkové periody. Jiné vlnové délky propouští. [31; 32]



Obrázek 40 Princip vláknového laseru s FBG [33]

6.2 Výhody vláknového laseru

Vývoj laserů, od jejich objevu v roce 1960, urazil dlouhou cestu. Od té doby docházelo k objevům nových koncepcí, zlepšování parametrů a neustálému vylepšování samotné technologie. Stejně tak urazily dlouhou cestu i vláknové lasery, které se vypořádaly s dřívějšími problémy, zejména ohledně výkonu, který byl v počátcích v řádech desetin wattů. Nyní se výkony vláknových laserů pohybují od desítek do několika tisíc wattů. Mezi jejich další výhody patří:

- **Vysoká účinnost** – oproti jiným koncepcím využívaných pro lasery mají vláknové lasery jednu z nejvyšších účinností. Jedná se typicky o 25 - 35 %.
- **Kvalitní výstupní svazek** – vzhledem k vlastnostem laserových diod, jejichž světlo je v nekvalitním a rozbíhavém svazku, dochází díky použití koncepce s optickým vláknem k soustředění světla do jednoho kvalitního laserového svazku.
- **Robustnost a kompaktnost** – jelikož jsou k sobě jednotlivé části laseru na rozdíl od pevnolátkových laserů pevně spojeny, odpadá zde nutnost složitého nastavování, kalibrace a údržby.
- **Životnost** - standardně by měly tyto lasery vydržet až 150 000 hodin, což odpovídá 17-ti rokům nepřetržitého provozu. Pro srovnání, CO₂ laser má životnost přibližně třetinovou, tedy okolo 50 000 hodin, tj. 6 let provozu a pevnolátkové lasery asi 10 000 hodin, což je okolo jednoho roku nepřetržité práce.
- **Nevyžadují chlazení** – vzhledem k rozměrům, zejména délce a plochy vlákna, které je nezdírká kdy dlouhé i 30 m, stačí pro běžné aplikace do výkonu laseru 50 W chlazení pouze vzduchem. [32; 33]

6.3 Hlavní parametry laseru

Vlnová délka – na vlnové délce záleží proces absorbování laserového paprsku materiálem, na který je používán. Pro laserovou ablaci v této práci je používán Ytterbiový laser o vlnové délce 1060 nm. Další typy laserů jsou uvedeny v Tabulce 2. [34]

Tabulka 2 Přehled vlnových délek laserů [34]

Typ laseru	Pracovní vlnová délka [nm]
Ytterbiový vláknový	1030 - 1100
CO ₂	10 600
Neodymový YAG	1064; 355; 266
CVL	511 - 578
Ultrafialový	126 - 259

Energie pulzu – tento parametr popisuje energii laserového paprsku, kterou laser přenesl do dané plochy objektu. [34]

Šířka pulzu a frekvence – tento parametr popisuje časový úsek, po který laserový paprsek působí na předem definované ploše objektu. Pokud se jedná o pulzní laser, dodává laserový paprsek energii danému místu po pulzech. Tento parametr se potom značí PRR – pulse repetition rate. [34]

Výkon – jedná se o nejdůležitější parametr, který udává energii paprsku za jednotku času. [34]

Výkonová hustota – tímto parametrem je myšlen výkon laserového paprsku na jednotku plochy paprsku. Nejčastěji se udává ve $W \cdot cm^{-2}$. [34]

Kvalita laserového paprsku – tento parametr porovnává naměřenou kvalitu paprsku s ideální charakteristikou Gaussovského rozložení energie v paprsku. [34]

Průměr bodu laseru – laserový paprsek je obvykle zaměřen na plochu, se kterou bude následně pracovat. Průměr bodu laseru je potom funkcí zaostření čoček laseru, ohniskové vzdálenosti, kvality laserového paprsku a vlnové délky. [34]

6.4 Použitý laser

Tabulka 3 Parametry použitého laboratorního laseru [35]

Parametr	Hodnota
Rozměry	650 x 465 x 600 mm
Hmotnost	52 kg
Pracovní prostor	345 x 250 mm
Maximální výška vzorku	50 - 125 mm
Motorová Z Osa	Krokový motor, dráha 130 mm
Přizpůsobení	Hlavní laser, pomocný laser, kamera
Bezpečnostní dveře	Ano, s magnetickým zámekem
Osvětlení	LED
Typ laseru	Ytterbiový vláknový laser
Třída laseru	1
Vlnová délka	1060 nm
Výkon	10 W
Energie pulzu	1 mJ
Funkční pole	70 x 70 mm
Frekvence pulzu	10 – 200 kHz
Zaostřovací laser	670 nm / < 1 mW
Náhled	HD Camera 10x Digital zoom
Chlazení	Vzduchové
Pracovní teplota	15 - 35°C
Příkon	350 W
Napájení	230 V



Obrázek 41 Používaný vláknový laser [35]

7 ZAHLUBOVÁNÍ POMOCÍ LASEROVÉ ABLACE

7.1 Postup experimentu

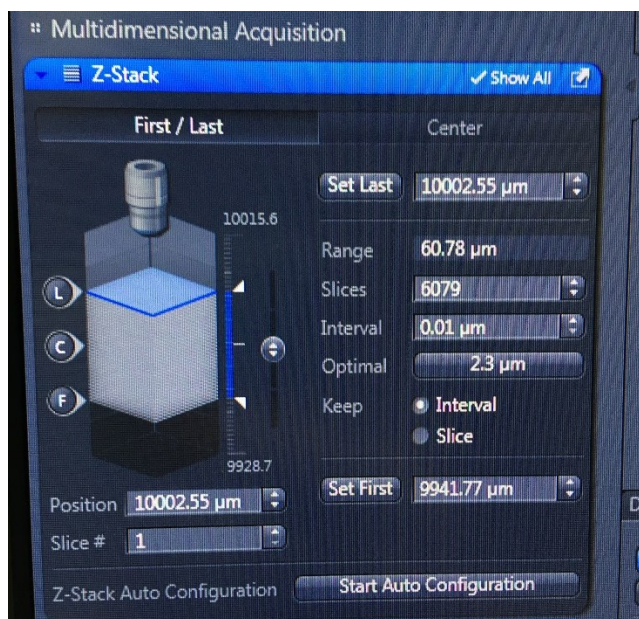
Pro kvantifikaci zahlubování pomocí vláknového laseru byl volen vždy jeden parametr laseru variabilně a další zůstaly po celý test neměnné. Docházelo tedy ke změnám těchto parametrů:

- Výkon.
- Frekvence.
- Rychlost.
- Hatch.

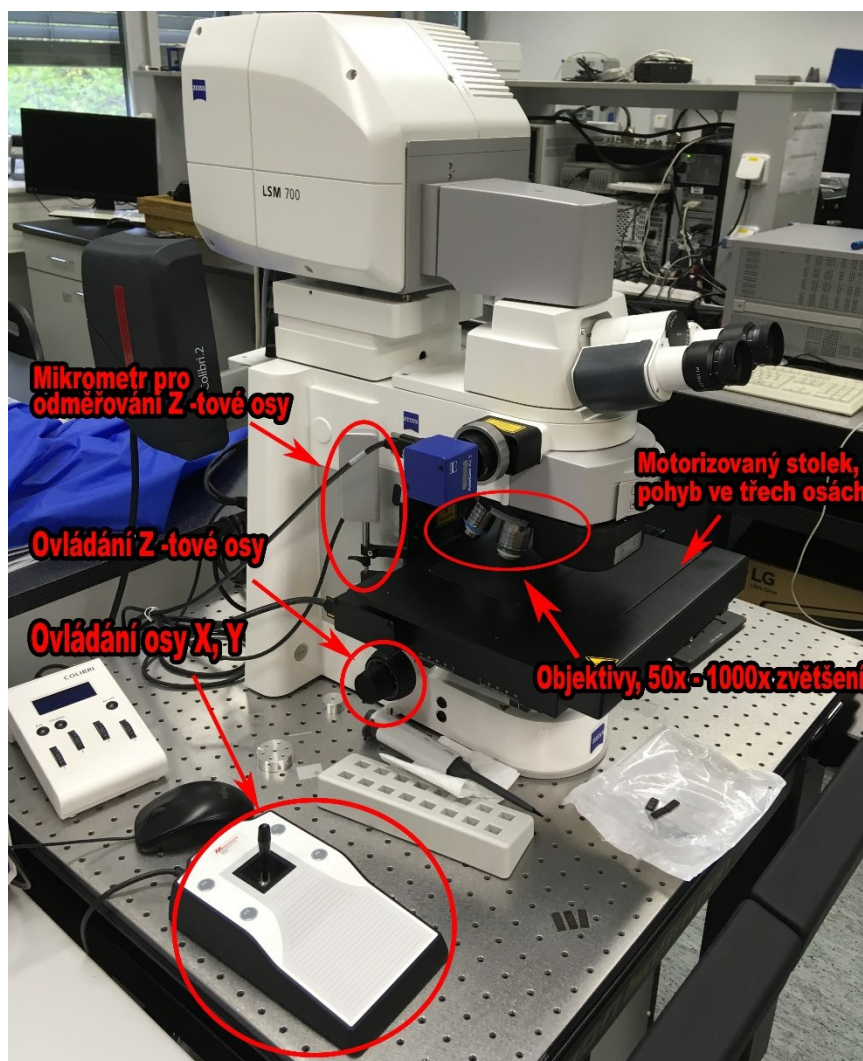
Vzhledem k tomu, že povrch po laserové ablaci nemá homogenní strukturu (výška nejvyššího a nejnižšího místa povrchu součástky po laserové ablaci dosahuje normálně hodnot okolo 100 μm), bylo třeba aplikovat takovou metodu, která by tento rozdíl dokázala rozpoznat. Tyto rozdíly tvoří především příměsi jako sklo apod., které jsou do pouzdra součástky přidávány pro zlepšení jeho vlastností.

Pro odečítání hodnot byl použit konfokální mikroskop LSM 700, protože nebyl přístup k hloubkovému mikroskopu, popsanému výše. Pro metody měření hloubky však mikroskop nepracoval v konfokálním, ale v klasickém optickém režimu, který pro odečet hodnot hloubky po ablaci bohatě dostačoval. Pro odečítání hloubky bylo používáno 100x zvětšení, pro detailní foto výrobce čipu potom až 400x zvětšení.

Princip odečítání hodnot byl následovný. Vzhledem k možnosti pohybu stolku mikroskopu v ose - Z docházelo k odečtům vlivů parametrů na hloubku ablace změnami právě výšky v ose - Z a ostřením. Tento parametr byl měřen velmi přesným mikrometrem, který je součástí mikroskopu. Nejprve došlo k zaostření na povrch pouzdra. Zde byla vynulována výška v ose - Z. Poté bylo nutné zaostřit na nejvyšší vrchol povrchu po ablaci a odečíst naměřenou hodnotu v ose - Z. Po odečtu tohoto parametru pohybem stolku v ose - Z došlo k zaostření na spodní mez po laserové ablaci a opět k odečtu hodnoty osy - Z. Drsnost povrchu byla potom měřena stejným způsobem, vždy s nulováním osy - Z a následným odečtem nejvyšší, nebo nejnižší hodnoty. Přesnost ukazatele pohybu stolku ve směru osy - Z, byla 2,3 μm . Vzhledem k subjektivnosti ostření a nerovnoměrnosti povrchu celkovou přesnost odhaduji na +/- 20 μm .



Obrázek 42 Princip odečítání Z-tové souřadnice



Obrázek 43 Popis použitých součástí mikroskopu

7.2 Kvantifikace výkonu

Pro kvantifikaci výkonových parametrů vláknového laseru byly voleny výkony od 0,5 W až do 10 W po 0,5 W kroku. Další parametry testu jsou v Tabulce 4. Pro výkony 0,5 – 1,5 W nebylo možno ablaci kvantifikovat z důvodu neměřitelné hloubky ablace.

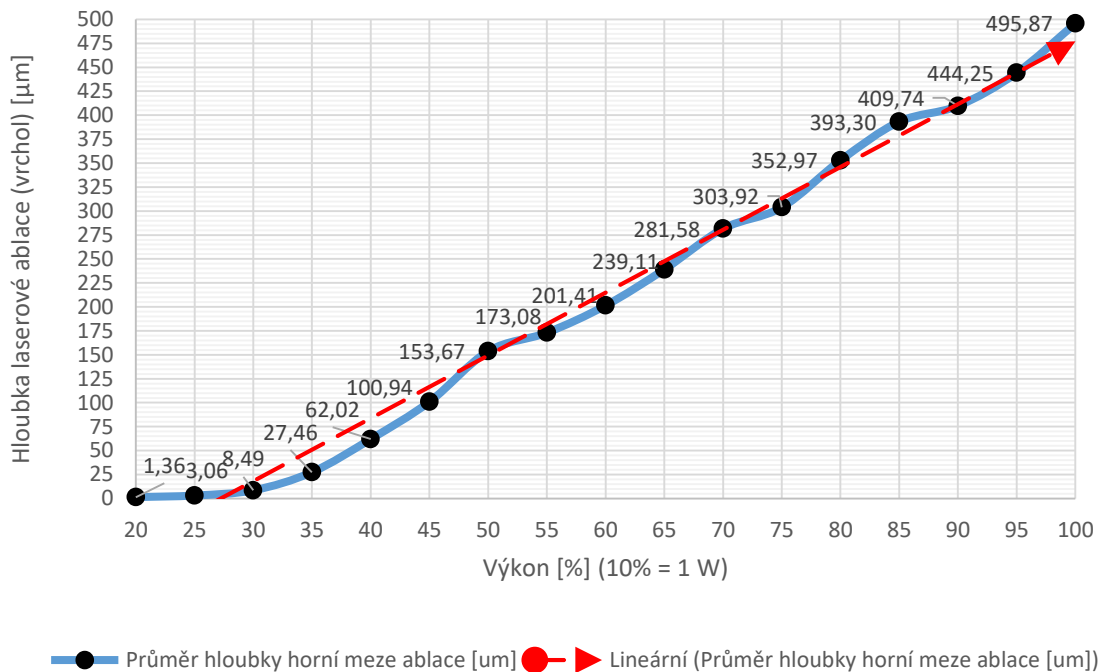
Tabulka 4 Parametry testování výkonu

Název	Test výkonu
Výkon	Proměnný, změna po 0,5 W
Frekvence	20 kHz
Rychlost	200 mm/sec
Hatch	Cross 0,025 mm

Tabulka 5 Naměřené výkonové parametry

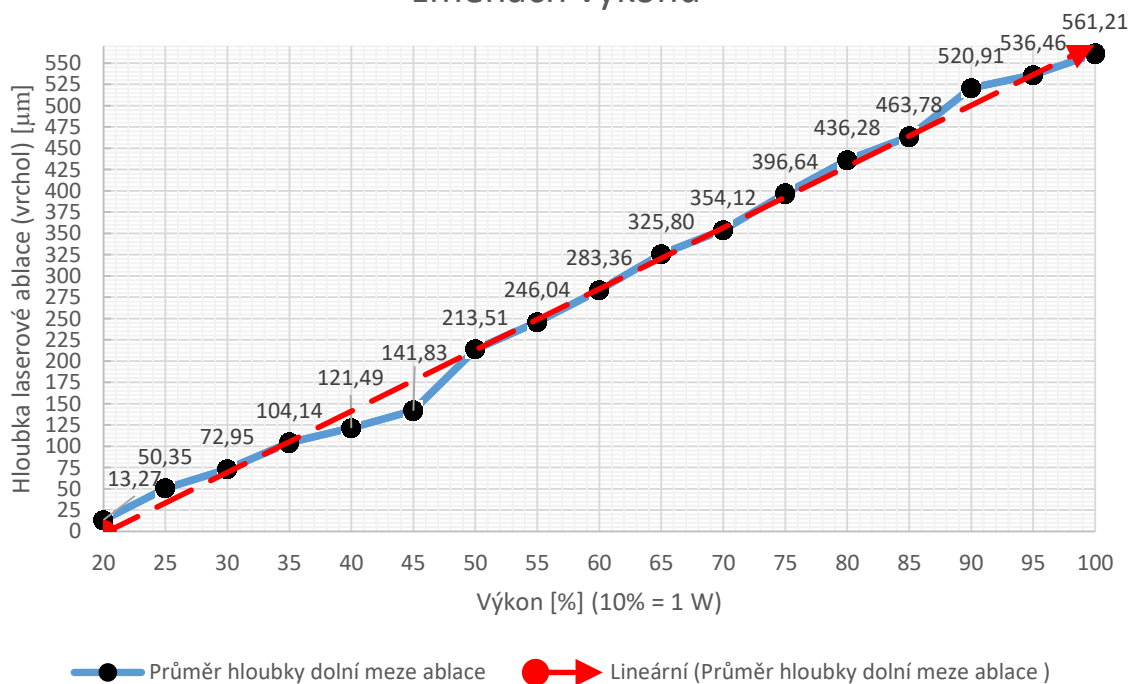
P[%] (10% =1W)	Hloubka po horní mez ab- lace [um]	Hloubka po horní mez ab- lace 2 [um]	Průměr hloubky horní meze ab- lace [um]	Hloubka po spodní mez ab- lace [um]	Hloubka po spodní mez ab- lace 2 [um]	Průměr hloubky spodní meze ablace [um]	Drsnost 1 [um]	Drsnost 2 [um]	Průměr drsnosti [um]
5	Žádná ablace								
10	Žádná ablace								
15	Zanedbatelná ablace								
20	1.11	1.60	1.36	9.64	16.90	13.27	27.67	28.64	28.16
25	3.64	2.48	3.06	42.15	58.55	50.35	58.24	38.48	48.36
30	8.78	8.19	8.49	72.85	73.05	72.95	60.91	60.78	60.85
35	23.13	31.78	27.46	97.41	110.86	104.14	65.5	64.82	65.16
40	58.78	65.25	62.02	130.56	112.42	121.49	60.01	53.63	56.82
45	100.9	100.98	100.94	151.89	131.77	141.83	67.89	78.09	72.99
50	146.81	160.52	153.67	205.72	221.3	213.51	80.6	76.32	78.46
55	161.69	184.46	173.08	257.74	234.33	246.04	88.13	84.9	86.52
60	216.33	186.49	201.41	273.02	293.69	283.36	86.54	83.09	84.82
65	242.76	235.45	239.11	325.9	325.7	325.80	84.39	93.7	89.05
70	276.57	286.58	281.58	353.04	355.2	354.12	85.47	96.37	90.92
75	304.85	302.98	303.92	398.27	395.01	396.64	93.36	88.2	90.78
80	349.69	356.24	352.97	441.00	431.55	436.28	107.89	111.9	109.90
85	393.21	393.39	393.30	468.9	458.65	463.78	128.29	102.66	115.48
90	409.97	409.51	409.74	513.54	528.27	520.91	116.46	102.38	109.42
95	447.79	440.71	444.25	538.35	534.57	536.46	120.24	124.97	122.61
100	491.45	500.28	495.87	570.53	551.89	561.21	117.32	126.63	121.98

Průměr hloubky horní meze laserové ablace při změnách výkonu



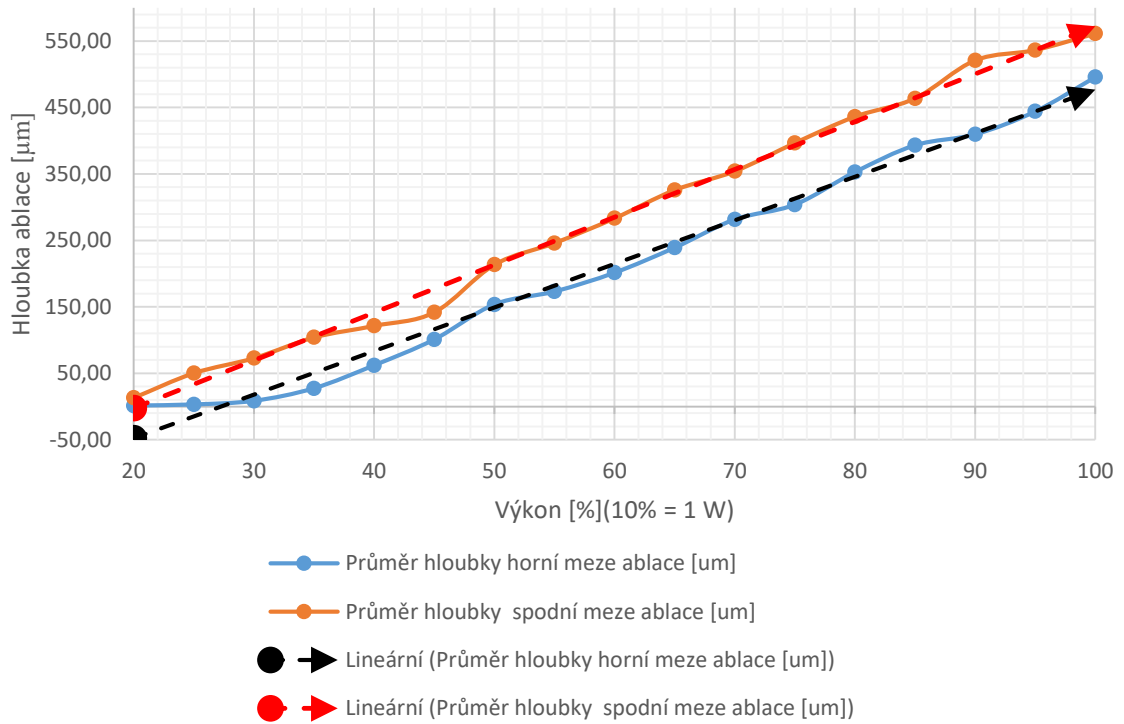
Graf 3 Horní mez laserové ablace při změnách výkonu

Průměr hloubky dolní meze laserové ablace při změnách výkonu

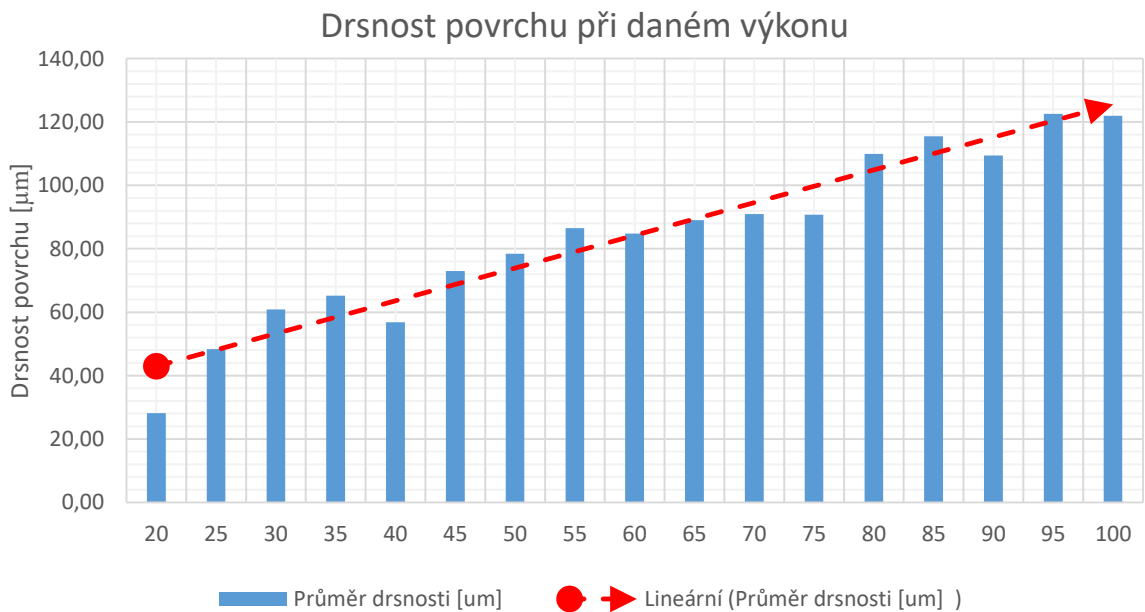


Graf 4 Dolní mez laserové ablace při změnách výkonu

Porovnání horní a dolní meze ablace závislé na výkonu laseru



Graf 5 Porovnání horní a dolní meze ablace při změnách výkonu



Graf 6 Drsnost povrchu při změnách výkonu

7.3 Kvantifikace parametru rozteče šrafování

Pro kvantifikaci hatch parametru vláknového laseru byly voleny rozteče šrafování laserového paprsku od 0,001 mm až po 0,03 mm. Další parametry testu jsou v Tabulce 6. Bohužel na rozdíl od ostatních testů nebylo možno zachovat výkon 5 W, protože u hatch vzdálenosti 0,001 mm docházelo vlivem vysokého výkonu k zapékání odebraného materiálu. Celý test je tak proveden pro výkon laseru 2 W. Mezi další důležité parametry patří typ hatch. Je zde na výběr z následujících typů:

- Křížové šrafování (Cross hatch) – tento typ hatch je pro laserovou ablací vhodnější z důvodu rovnoměrnějšího odebrání množství materiálu, jelikož na povrchu vytváří obdobu jakési mřížky viz Obrázek 44. V tomto případě byl konkrétně volen cross hatch s úhlem 45°.
- Jednoduché šrafování – v případě volby tohoto typu hatch, laser na povrchu součástky nedělá mřížkovou strukturu jako v předchozím případě, ale pouze zahloubení v jednom směru.
- Meandrové šrafování – tento typ lze volit jak pro křížové, tak pro jednoduché šrafování. Jde tak spíše o parametr šrafování. Jedná se o pohyb laserového paprsku, kdy se paprsek pohybuje po jedné dlouhé křivce. Tento parametr byl využit spolu s křížovým šrafováním pro všechny měření.



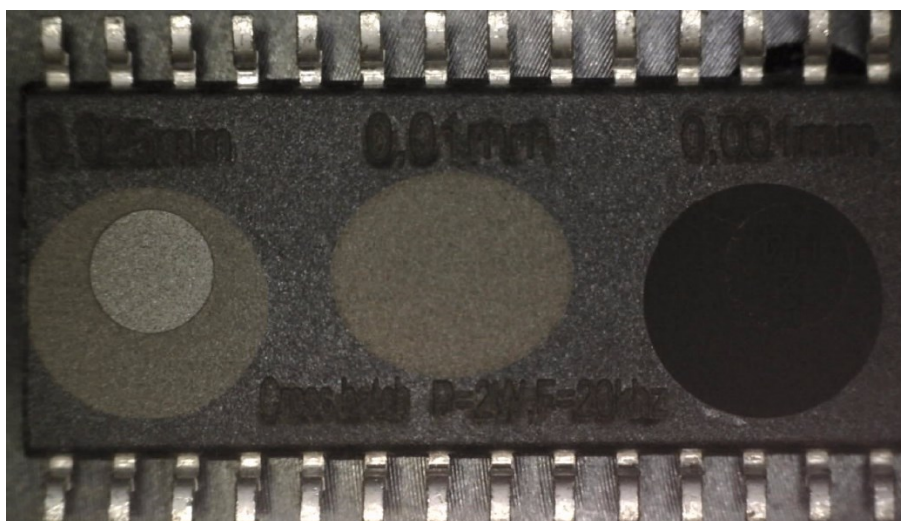
Obrázek 44 Typy šrafování

Tabulka 6 Testování hatch parametru

Název	Test hatch
Výkon	2 W
Frekvence	20 kHz
Rychlost	200 mm/sec
Typ šrafování a vzdálenost	Proměnný cross hatch 0,001mm – 0,03mm

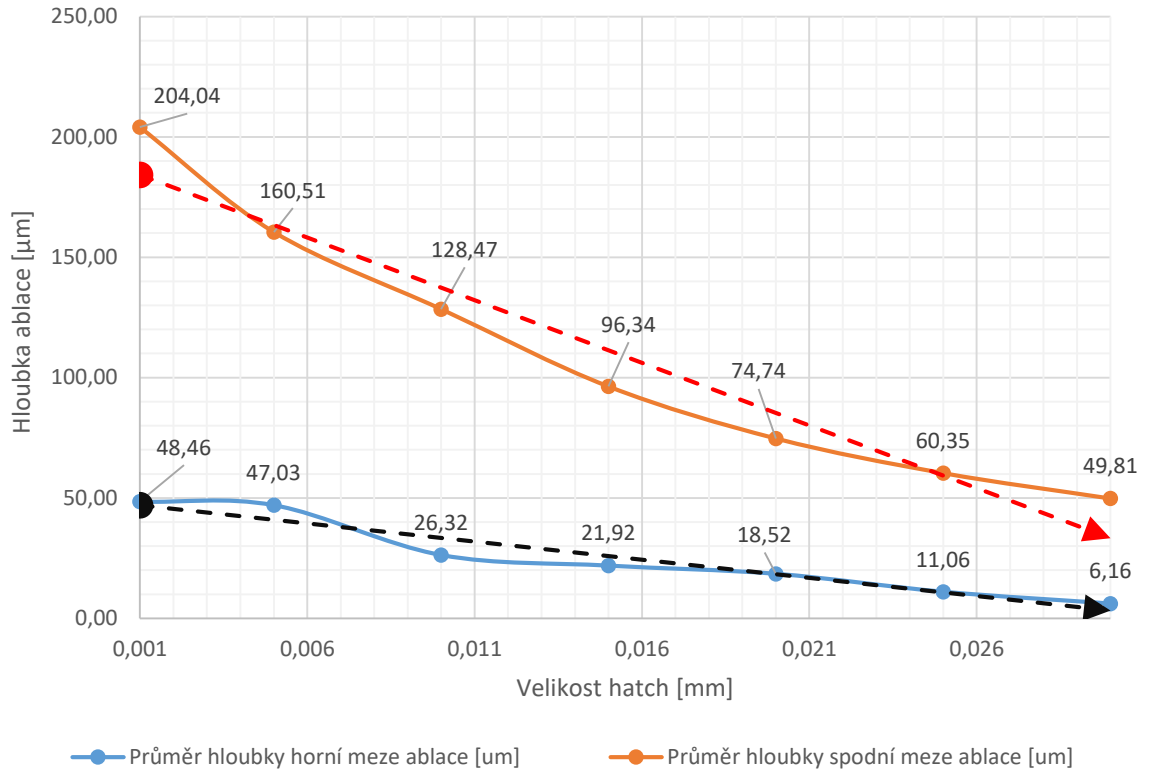
Tabulka 7 Naměřené parametry v závislosti na hodnotě hatch

Hatch velikost	Hloubka po horní mez ablance [um]	Hloubka po horní mez ablance 2 [um]	Průměr hloubky horní meze ablance [um]	Hloubka po spodní mez ablance [um]	Hloubka po spodní mez ablance 2 [um]	Průměr hloubky spodní meze ablance [um]	Drsnost 1 [um]	Drsnost 2 [um]	Průměr drsnosti [um]
0.001	48.66	48.26	48.46	204.94	203.13	204.04	182.86	176.79	179.83
0.005	44.83	49.22	47.03	163.99	157.02	160.51	115.01	108.79	111.90
0.010	24.65	27.98	26.32	130.47	126.46	128.47	104.5	98.72	101.61
0.015	21.54	22.29	21.92	97.23	95.44	96.34	83.21	86.46	84.84
0.020	18.74	18.30	18.52	77.4	72.08	74.74	68.46	62.15	65.31
0.025	9.64	12.48	11.06	52.15	68.55	60.35	58.24	38.48	48.36
0.030	4.81	7.51	6.16	41.23	58.38	49.81	49.82	42.19	46.01



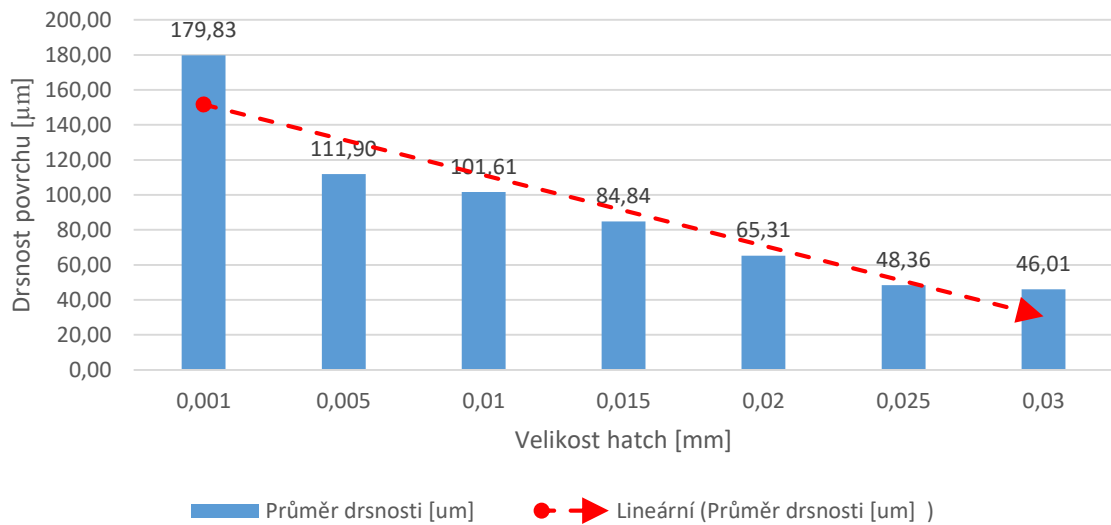
Obrázek 45 Porovnání jednotlivých roztečí šrafování

Vliv rozteče šrafovaní na hloubku ablace



Graf 7 Vliv rozteče šrafovaní na hloubku ablace

Vliv rozteče šrafovaní na drsnost povrchu po ablaci



Graf 8 Vliv rozteče šrafovaní na drsnost povrchu po ablaci

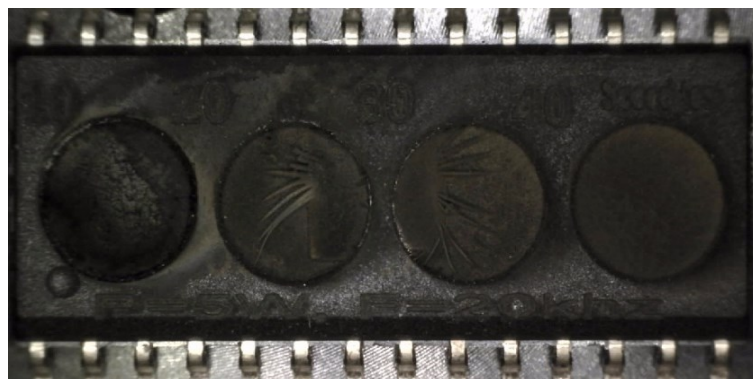
7.4 Kvantifikace parametru rychlosti přeběhu

Pro kvantifikaci parametrů rychlosti přeběhu vláknového laseru byly voleny rychlosti od 10 mm/sec až po 900 mm/sec. Další parametry testu jsou v Tabulce 8.

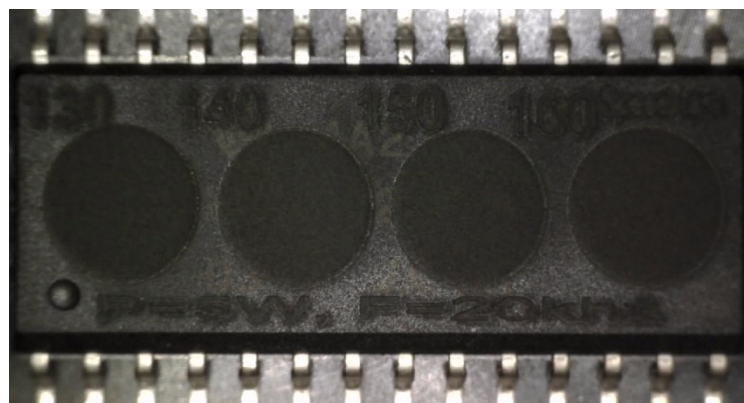
Největší změny však byly zaznamenány pouze do rychlosti 250 mm/sec. Vzhledem k tomuto faktu je volen krok 10 mm/sec pro rychlost přeběhu od 10 mm/sec po 300 mm/sec. Od rychlosti 300 mm/sec po 900 mm/sec je potom volen krok 100 mm/sec.

Tabulka 8 Testování parametru rychlosti přeběhu

Název	Test frekvence
Výkon	5 W
Frekvence	20 kHz
Rychlost	Variabilní
Typ šrafování a vzdálenost	Cross hatch 0,025 mm



Obrázek 46 Testování rychlosti přeběhu 10 – 40 mm/sec

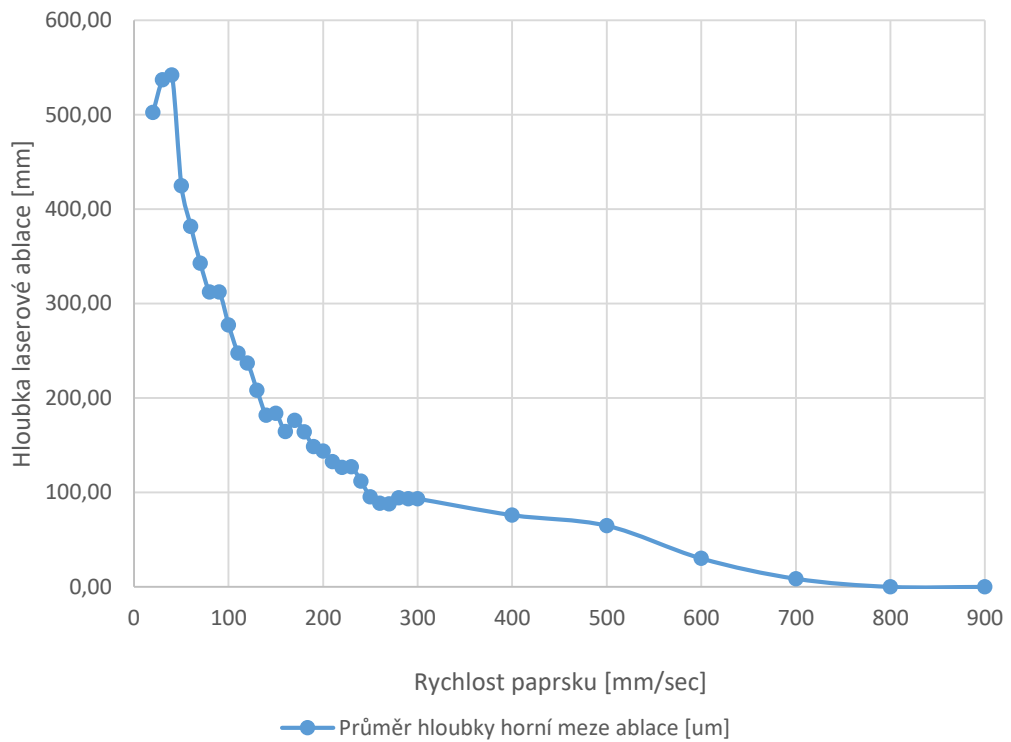


Obrázek 47 Testování rychlosti přeběhu 130 - 160 mm/sec

Tabulka 9 Naměřené parametry ablace v závislosti na rychlosti přeběhu

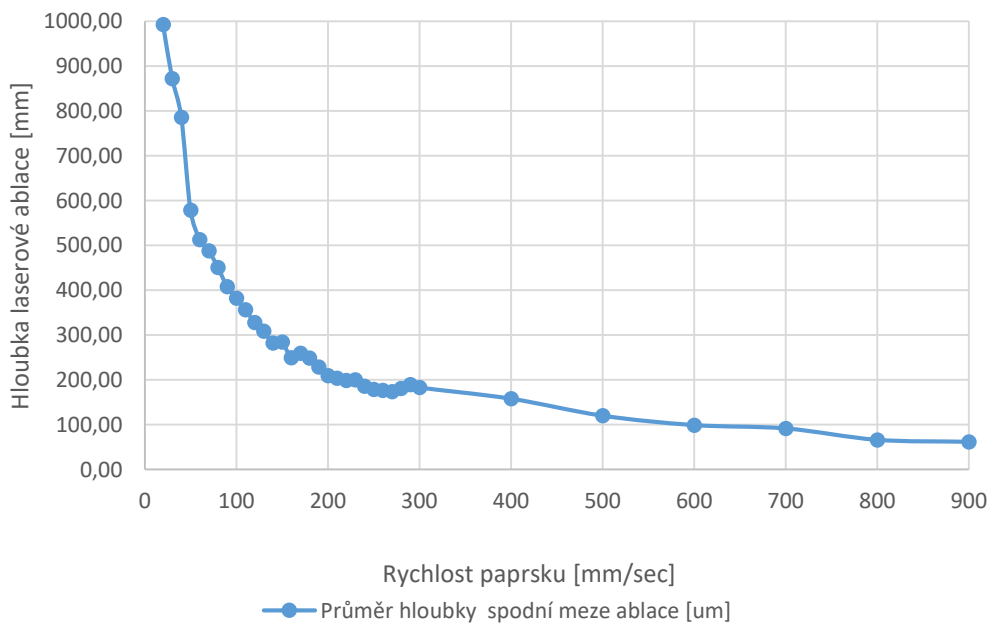
Rychlost [mm/sec]	Hloubka po horní mez ablance [um]	Hloubka po horní mez ablance 2 [um]	Průměr hloubky horní meze ablance [um]	Hloubka po spodní mez ablance [um]	Hloubka a po spodní mez ablance 2 [um]	Průměr hloubky spodní meze ablance [um]	Drsnost 1 [um]	Drsnost 2 [um]	Průměr drsnosti [um]
10	64.8	58.08	61.44	747.44	790.39	768.92	768.67	751.34	760.01
20	513.78	491.31	502.55	1004.04	981.76	992.90	340.65	351.62	346.14
30	542.12	531.87	537.00	881.46	863.28	872.37	303.64	312.45	308.05
40	544.45	539.67	542.06	797.48	773.21	785.35	232.18	243.52	237.85
50	414.30	435.17	424.74	584.40	573.12	578.76	206.06	200.43	203.25
60	384.88	378.41	381.65	497.57	528.79	513.18	141.86	154.56	148.21
70	339.54	345.87	342.71	475.38	500.27	487.83	111.87	134.95	123.41
80	310.84	313.42	312.13	444.35	457.26	450.81	116.34	116.82	116.58
90	312.51	312.30	312.41	417.53	398.40	407.97	113.98	111.89	112.94
100	289.01	265.56	277.29	373.92	391.10	382.51	110.29	115.5	112.90
110	257.06	238.24	247.65	362.07	350.99	356.53	101.1	106.8	103.95
120	237.68	236.34	237.01	323.36	333.23	328.30	92.5	97.22	94.86
130	203.06	213.32	208.19	307.2	309.85	308.53	102.86	88.25	95.56
140	179.31	183.95	181.63	281.12	283.27	282.20	107.88	103.38	105.63
150	181.08	186.74	183.91	283.87	285.18	284.53	88.53	92.47	90.50
160	155.76	173.14	164.45	245.26	254.01	249.64	93.32	83.56	88.44
170	173.3	179.23	176.27	259.56	259.88	259.72	83.41	79.01	81.21
180	172.7	155.63	164.17	245.48	252.49	248.99	87.43	87	87.25
190	149.18	147.61	148.40	230.30	227.11	228.71	60.77	77.87	69.32
200	142.23	145.12	143.68	208.00	211.13	209.57	71.01	65.56	68.29
210	139.34	125.63	132.49	203.7	203.87	203.79	74.24	72.46	73.35
220	124.42	128.62	126.52	196.93	200.11	198.52	76.11	74.93	75.52
230	126.92	127.19	127.06	198.93	201.62	200.28	62.43	69.79	66.11
240	110.84	112.85	111.85	186.49	185.91	186.20	77.29	86.78	82.04
250	94.73	95.59	95.16	177.65	179.47	178.56	74.95	77.79	76.37
260	92.73	84.34	88.54	181.13	172.18	176.66	86.91	89.34	88.13
270	76.21	99.55	87.88	161.73	185.59	173.66	80.52	78.3	79.41
280	97.88	90.82	94.35	197.45	164.50	180.98	68.96	79.66	74.31
290	97.69	88.70	93.20	194.38	184.94	189.66	78.68	86.27	82.48
300	101.19	85.36	93.28	187.85	177.94	182.90	81.83	82.26	82.05
400	75.78	76.12	75.95	165.90	150.14	158.02	56.61	77.41	67.01
500	60.51	69.04	64.78	101.91	138.36	120.14	81.17	64.86	73.02
600	10.68	49.5	30.09	80.68	117.76	99.22	71.94	73.03	72.49
700	5.96	11.27	8.62	75.52	108.05	91.79	70	82	76.22
800	0	0	0.00	67.47	65.24	66.36	74.28	69.51	71.90
900	0	0	0.00	61.84	62.01	61.93	60.58	59.76	60.17

Průměr hloubky horní meze laserové ablace při změnách rychlosti

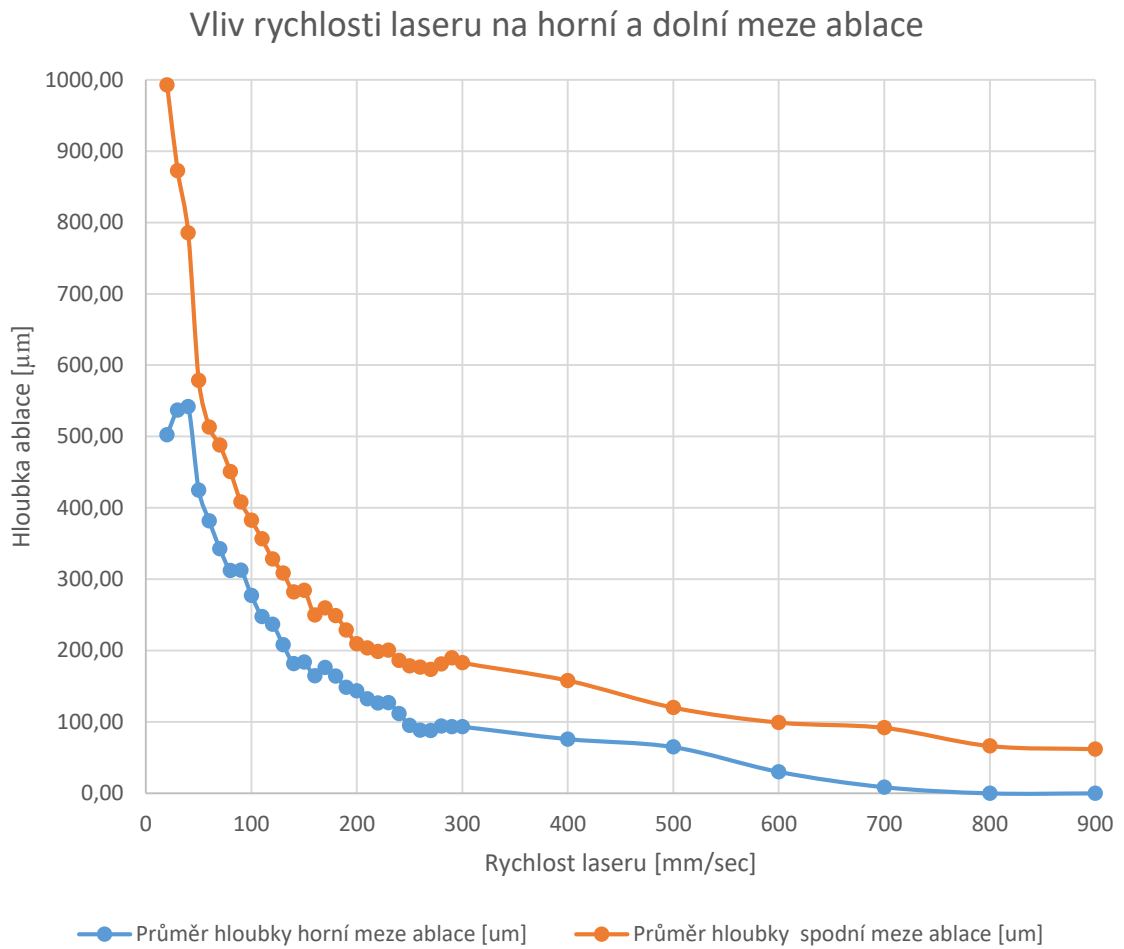


Graf 9 Horní mez laserové ablace při změnách rychlosti přeběhu laseru

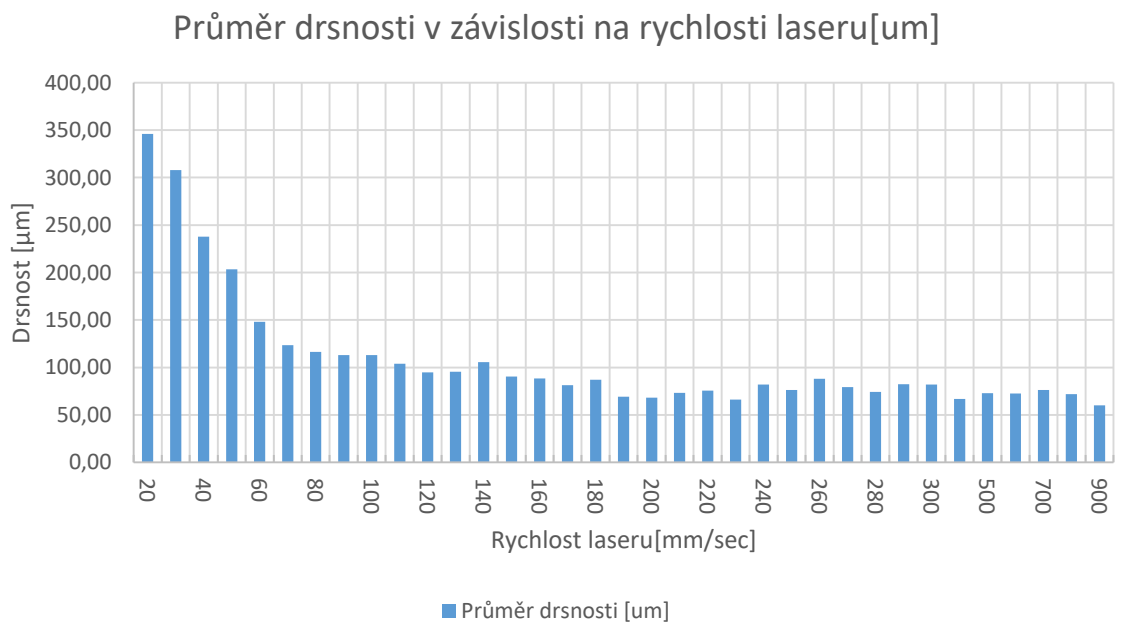
Průměr hloubky dolní meze laserové ablace při změnách rychlosti



Graf 10 Dolní mez laserové ablace při změnách rychlosti přeběhu laseru



Graf 11 Porovnání horní a dolní meze ablace při změnách rychlosti přeběhu



Graf 12 Vliv hatch parametru na drsnost povrchu po ablaci

7.5 Kvantifikace frekvenčního parametru

Pro kvantifikaci frekvenčních parametrů vláknového laseru byly voleny frekvence od 20 kHz až po 200 kHz. Další parametry testu jsou v Tabulce 10.

Největší změny však byly zaznamenány pouze do frekvence 60 kHz. Vzhledem k tomuto faktu je volen krok v rozmezí 20 kHz – 100 kHz po 20 kHz. Pro potvrzení trendu byla naměřena také hodnota pro 200 kHz.

Tabulka 10 Testování frekvenčního parametru

Název	Test frekvence
Výkon	5 W
Frekvence	Variabilní
Rychlost	200 mm/sec
Typ šrafování a vzdálenost	Cross hatch 0,025 mm

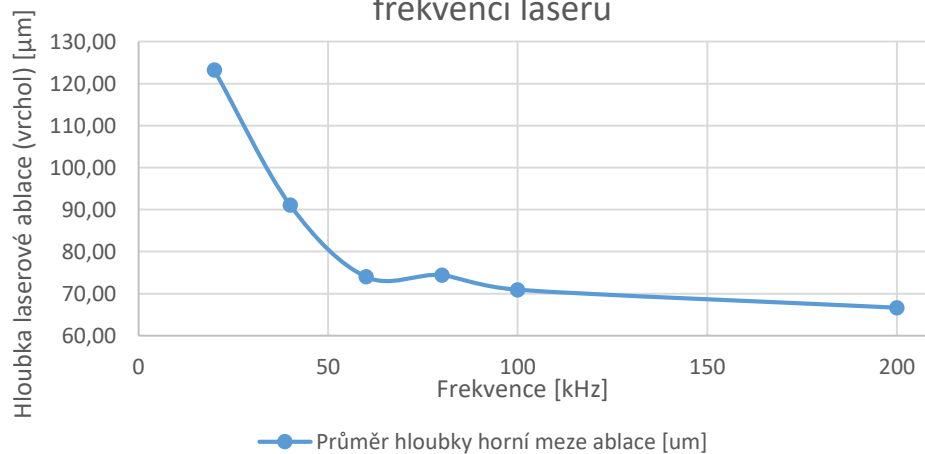


Obrázek 48 Porovnání struktury nejvyšší 200 kHz a nejnižší 20 kHz frekvence

Tabulka 11 Naměřené parametry ablace v závislosti na frekvenci

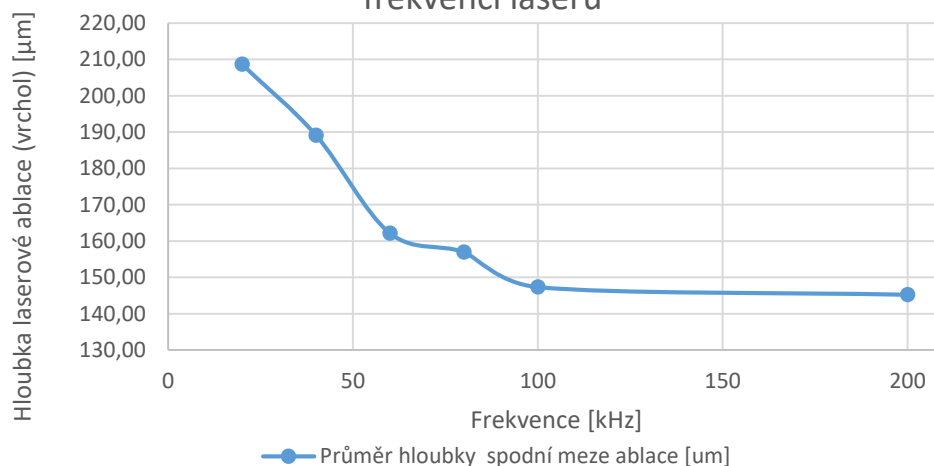
Frekvence [kHz]	Hloubka po horní mez ablace [um]	Hloubka po horní mez ablace 2 [um]	Průměr hloubky horní meze ablace [um]	Hloubka po spodní mez ablace [um]	Hloubka po spodní mez ablace 2 [um]	Průměr hloubky spodní meze ablace [um]	Drsnost 1 [um]	Drsnost 2 [um]	Průměr drsnosti [um]
20	125.47	121.03	123.25	215.8	201.54	208.67	72.96	76.35	74.66
40	85.54	96.66	91.10	188.75	189.60	189.18	98.19	79.25	88.72
60	70.63	77.34	73.99	164.76	159.68	162.22	96.68	85.33	91.01
80	72.15	76.67	74.41	159.99	154.00	157.00	87.21	85.54	86.38
100	71.26	70.53	70.90	148.36	146.37	147.37	81.23	78.59	79.91
200	70.89	62.34	66.62	154.72	135.79	145.26	80.74	68.88	74.81

Průměr hloubky horní meze ablace závislé na frekvenci laseru



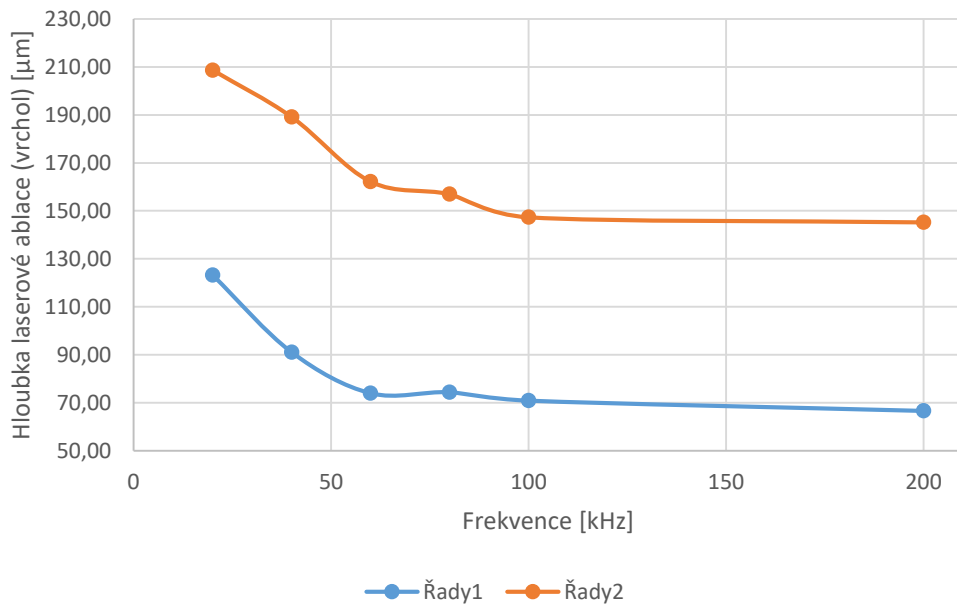
Graf 13 Horní mez laserové ablace při změnách frekvence

Průměr hloubky dolní meze ablace závislé na frekvenci laseru



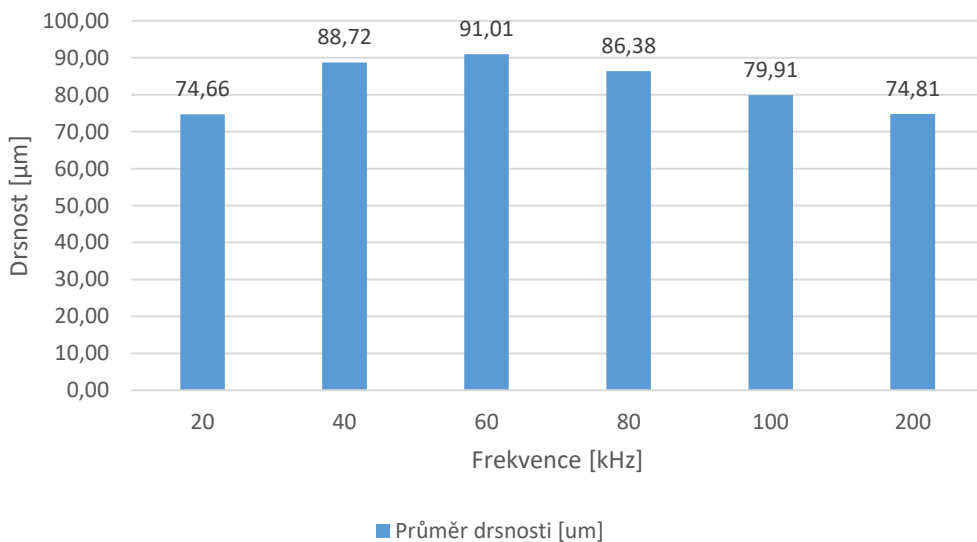
Graf 14 Dolní mez laserové ablace při změnách frekvence

Porovnání horní a dolní meze ablace závislé na frekvenci laseru



Graf 15 Porovnání horní a dolní meze ablace při změnách frekvence

Závislost drsnosti na frekvenci



Graf 16 Vliv frekvenčního parametru na drsnost povrchu po ablaci

7.6 Vyhodnocení naměřených hodnot

7.6.1 Výkon

Parametry ablace při výkonu 0,5 – 2 W se pro laserovou ablaci pouzder polovodičových součástek nehodí z důvodu minimálního nebo žádného odebraného množství materiálu pouzdra.

Parametry ablace při výkonu od 2,5 W do 5 W se pro laserovou ablaci daného pouzdra elektronické součástky hodily nejlépe. Laser při těchto výkonech dokázal odebírat materiál od 30-40 μm v jednom cyklu, což je při potřebě přesného zahloubení velká výhoda. Taktéž drsnost povrchu byla velmi dobrá, a pohybovala se v rozmezí od 50 - 80 μm .

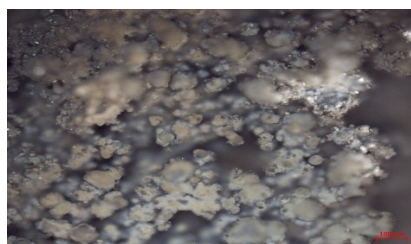
Parametry ablace při výkonu od 5 W do 10 W se hodí spíše pro laserovou ablaci vyšších pouzder, kdy je v nich samotný čip uložen v hloubce nad 600 μm . Drsnost plochy po ablaci se při využívání vyšších výkonů pohybuje taktéž ve vyšších hodnotách a to od 80 μm do 122 μm .

7.6.2 Hatch

Vzhledem k šířce samotného laserového paprsku, která činí u tohoto laseru 0,03 μm , je vhodné použití mírného překrytí jednotlivých průchodů laserového paprsku. Z tohoto důvodu je na místě použití hodnoty 0,025 μm . U nižších hodnot rozteče, se jednotlivé průchody natolik překrývají, že plocha pouzdra musí absorbovat větší množství energie a tudíž je tímto způsobem odebráno také více materiálu při vyšší drsnosti povrchu.

7.6.3 Rychlost přeběhu

Při nízkých rychlostech, typicky do 150 mm/sec, docházelo vlivem nízké rychlosti laserového paprsku a tím pádem i větší energie absorbované na jednotku plochy k ablaci většího množství materiálu. U velmi nízkých rychlostí (10 mm/sec) docházelo až k zapékání a tavení materiálu pouzdra viz Obrázek 49.



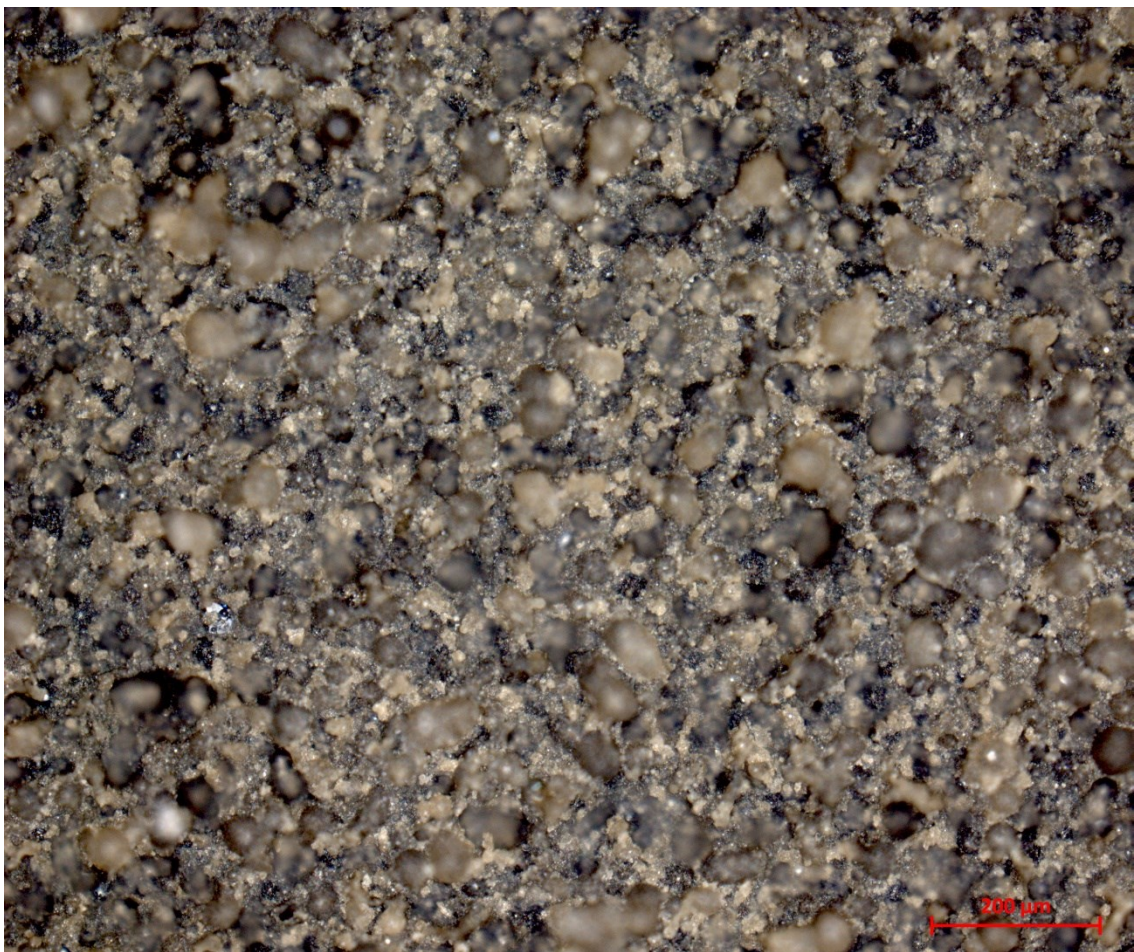
Obrázek 49 Detail zapečení

Naopak u velmi rychlých přeběhů laseru docházelo k tomu, že materiál pouzdra neabsorboval téměř žádnou energii a ablační proces tak nebyl účinný. Tento jev se začínal projevovat cca od rychlosti 400 mm/sec.

Rychlost přeběhu má taktéž nezanedbatelný vliv na drsnost povrchu po ablaci, zejména u hodnot do 100 mm/sec je drsnost od 760 μm po 113 μm . U vyšších rychlostí zejména od 160 mm/sec je možné drsnost povrchu považovat za konstantní. Pro laserovou ablaci se nejlépe hodí parametry okolo rychlosti 200 mm/sec, kterým při výkonu 5 W odpovídá množství odebraného materiálu 210 μm s drsností povrchu cca 70 μm .

7.6.4 Frekvence

Lze říci, že změna frekvence laseru měla na ablační proces nejmenší vliv. Nejefektivnější bylo pracovat s frekvencí 20 kHz, kdy při výkonu 5 W, docházelo k odebrání přibližně 210 μm materiálu. Vliv frekvence na drsnost povrchu byl nulový.



Obrázek 50 Struktura materiálu po laserové ablaci, 100x zvětšeno

8 STANOVENÍ A OVĚŘENÍ HODNOT PRO ABLAČNÍ PROCES

Nejprve je nutné definovat, co je od procesu laserové ablace očekáváno. Konkrétně u problematiky falšování elektronických součástek se lze setkat se dvěma požadavky, a to požadavky na:

- Vyhroubení otvoru nad čipem pro následné leptání.
- Odstranění veškerého materiálu nad čipem, pro jeho ověření.

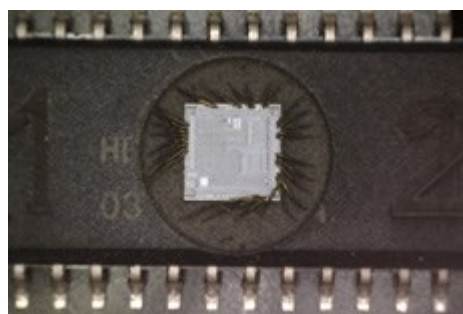
Na základě výše uvedených požadavků, je potom třeba upravit parametry pro proces laserové ablace. Pro nastavení těchto parametrů je však důležité znát hloubku, ve které je čip zapouzdřen. K tomuto údaji se lze dopracovat několika metodami:

- Ultrazvukovou metodou.
- Experimentálním zahloubením.
- Rentgenovým zářením.



Obrázek 51 Zkoumané pouzdro

Pro účely této práce byla využívána metoda experimentálního zahloubení pomocí vláknového laseru a také prozáření součástky rentgenovým zářením. U experimentálního zahloubení docházelo k odečtu hodnoty při 100x zvětšení na konfokálním mikroskopu od zaostření na povrch čipu k zaostření na povrch pouzdra. Ostření probíhalo na motorizované Z ose s přesností pohybu osy na 2,3 μm . Z průměru čtyř opakovaných měření vyplývá, že čip je v pouzdře uložen přibližně 607 μm od povrchu pouzdra.



Obrázek 52 Odhalení čipu

8.1 Metoda odstranění veškerého materiálu nad čipem pro jeho ověření

Tabulka 12 Vzdálenost čipu od horní hrany pouzdra

Vzorek	Hloubka po horní mez ablance [um]	Hloubka po horní mez ablance 2 [um]	Průměr hloubky horní meze ablance - na čip [um]	Bonds od čipu [um]	Bonds od pouzdra [um]
1.1	611.08	606.39	608.74	270.02	342.50
1.2	575.57	554.71	565.14	235.11	322.16
1.3	620.79	629.08	624.94	242.50	381.41
1.4	625.41	632.98	629.20	269.32	350.26
Průměr			607.00	254.24	349.08

8.1.1 Vzorek 1.1

Tabulka 13 Parametry receptury 1.1

Receptura 1.1				
Krok	Výkon [W]	Hatch [mm]	Frekvence [kHz]	Rychlost [mm/sec]
1	5	0.025	20	200
2	5			
3	4			
4	3.5			
5	3			
6	3			
7	3			
8	3			
9	2.5			
10	2.5			

8.1.2 Vzorek 1.2

Tabulka 14 Parametry receptury 1.2

Receptura 1.2				
Krok	Výkon [W]	Hatch [mm]	Frekvence [kHz]	Rychlost [mm/sec]
1	5	0.025	20	200
2	5			
3	4			
4	4			
5	3			
6	3			
7	3			
8	3			
9	2.5			
10	2.5			

8.1.3 Vzorek 1.3

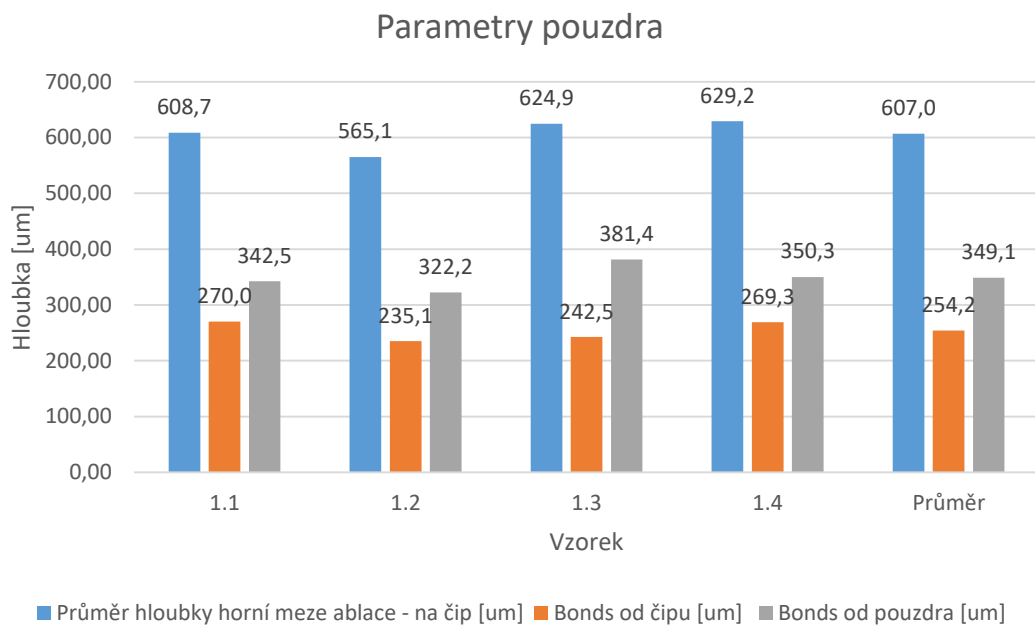
Tabulka 15 Parametry receptury 1.3

Receptura 1.3				
Krok	Výkon [W]	Hatch [mm]	Frekvence [kHz]	Rychlost [mm/sec]
1	5	0.025	20	200
2	5			
3	5			
4	4			
5	4			
6	3.5			
7	3.5			
8	3.5			
9	3.5			
10	3			
11	3			
12	2.5			
13	2.5			

8.1.4 Vzorek 1.4

Tabulka 16 Parametry receptury 1.4

Receptura 1.4				
Krok	Výkon [W]	Hatch [mm]	Frekvence [kHz]	Rychlost [mm/sec]
1	5	0.025	20	200
2	5			
3	5			
4	5			
5	4			
6	4			
7	3.5			
8	3.5			
9	3.5			
10	3.5			
11	3			
12	3			
13	2.5			
14	2.5			



Graf 17 Parametry jednotlivých receptur odhalující čip

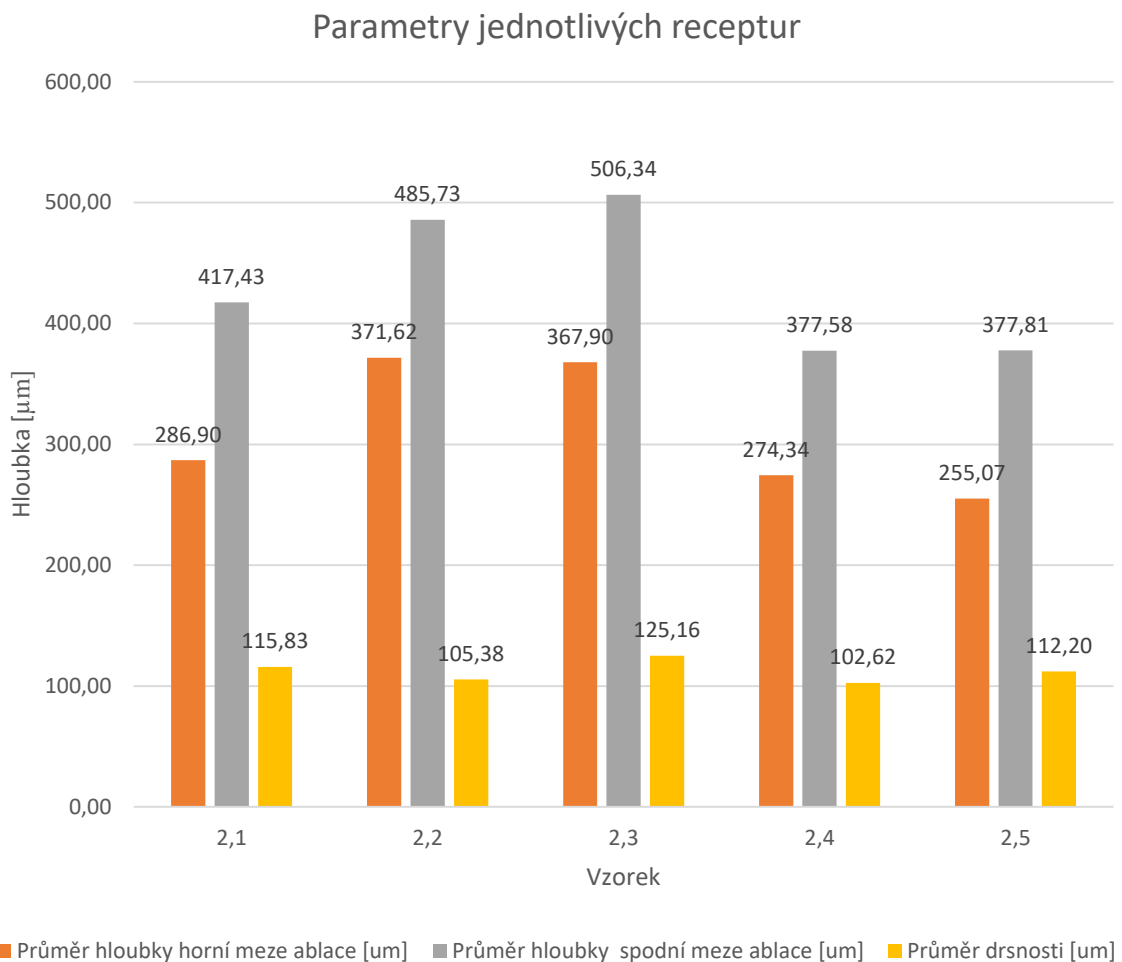


Obrázek 53 Odhalení výrobce čipu (receptura 1.4)

8.2 Metoda pro vyhloubení otvoru nad čipem pro následné leptání

Tabulka 17 Naměřené parametry pro metodu neodhalující čip

Vzo- rek	Hloubka po horní mez ab- lace [um]	Hloubka po horní mez ab- lace 2 [um]	Průměr hloubky horní meze ablance [um]	Hloubka po spodní mez ab- lace [um]	Hloubka po spodní mez ab- lace 2 [um]	Průměr hloubky spodní meze ablance [um]	Drs- nost 1 [um]	Drs- nost 2 [um]	Průměr drs- nosti [um]
2.1	282.91	290.88	286.90	420.02	414.83	417.43	124.2	107.46	115.83
2.2	374.18	369.05	371.62	493.14	478.31	485.73	108.66	102.09	105.38
2.3	370.51	365.28	367.90	519.46	493.22	506.34	116.78	133.54	125.16
2.4	268.34	280.33	274.34	378.55	376.60	377.58	105.09	100.14	102.62
2.5	248.72	261.42	255.07	387.27	368.35	377.81	121.14	103.26	112.20



Graf 18 Porovnání jednotlivých receptur neodhalující čip

8.2.1 Definice parametrů

Pro teoretické výpočty odebraného materiálu je vhodné definovat další parametr, kterým je celkový průměr zahloubení. Tento průměr dosáhneme zprůměrováním horní a dolní meze hloubky ablace udávané v μm . Poslední krok v receptuře se však vzhledem k možnosti průsvitu laseru až na samotný čip, musí udávat v průměru dolní meze ablace v μm .

Pokud by se při výpočtech vycházelo pouze z průměru spodní hranice laserové ablace, výsledky by se lišily od reálných hodnot až o $100 \mu\text{m}$. Tímto postupem se lze dopracovat k přesnosti až $50 \mu\text{m}$, což vzhledem k drsnosti povrchu, který dosahuje až $115 \mu\text{m}$ (v závislosti na volbě parametrů) považují za velmi dobrý výsledek.

Tabulka 18 Průměr spodních a horních mezí ablace

Výkon [%] (10% = 1 W)	Průměr hloubky spodní meze ablace [μm]	Průměr mezí [μm]
20	13.27	7.31
25	50.35	26.71
30	72.95	40.72
35	104.14	65.80
40	121.49	91.75
45	141.83	121.39
50	213.51	183.59
55	246.04	209.56
60	283.36	242.38
65	325.80	282.45
70	354.12	317.85
75	396.64	350.28
80	436.28	394.62
85	463.78	428.54
90	520.91	465.32
95	536.46	490.36
100	561.21	528.54

8.2.2 Vzorek 2.1

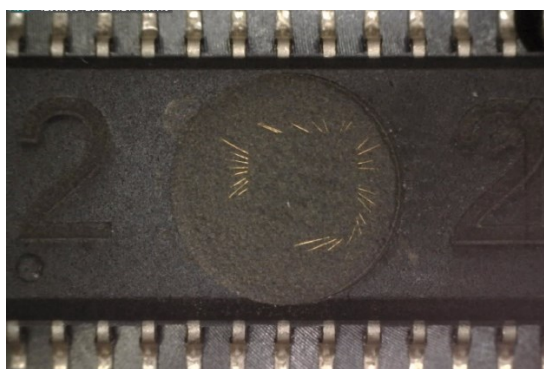
Tabulka 19 Parametry receptury 2.1

Receptura 2.1						
Krok	Výkon [W]	Hatch [mm]	Frekvence [kHz]	Rychlost [mm/sec]	Očekávané zahloubení [μm]	Reálné zahloubení [μm]
1	5	0.025	20	200	183.59	417.43
2	3.5				65.8	
3	3.5				65.8	
4	3				72.95	
Celkem:					388.14	
Rozdíl očekávané vs. reálné zahloubení [μm]					29.29	

8.2.3 Vzorek 2.2

Tabulka 20 Parametry receptury 2.2

Receptura 2.2						
Krok	Výkon [W]	Hatch [mm]	Frekvence [kHz]	Rychlost [mm/sec]	Očekávané zahloubení [μm]	Reálné zahloubení [μm]
1	5	0.025	20	200	183.59	485.73
2	3.5				65.80	
3	3.5				65.80	
4	3.5				65.80	
5	3				72.95	
Celkem:					453.92	
Rozdíl očekávané vs. reálné zahloubení [μm]					31.81	



Obrázek 54 Aplikace receptury 2.2

8.2.4 Vzorek 2.3

Tabulka 21 Parametry receptury 2.3

Receptura 2.3						
Krok	Výkon [W]	Hatch [mm]	Frekvence [kHz]	Rychlost [mm/sec]	Očekávané zahloubení [μm]	Reálné zahloubení [μm]
1	4	0.025	20	200	91.75	506.34
2	4				91.75	
3	3.5				65.8	
4	3.5				65.8	
5	3.5				65.8	
6	3				72.95	
Celkem:					453.85	
Rozdíl očekávané vs. reálné zahloubení [μm]					52.49	

8.2.5 Vzorek 2.4

Tabulka 22 Parametry receptury 2.4

Receptura 2.4						
Krok	Výkon [W]	Hatch [mm]	Frekvence [kHz]	Rychlost [mm/sec]	Očekávané zahloubení [μm]	Reálné zahloubení [μm]
1	4	0.025	20	200	91.75	377.58
2	4				91.75	
3	3.5				65.8	
4	3				72.95	
Celkem:					322.25	
Rozdíl očekávané vs. reálné zahloubení [μm]					55.33	

8.2.6 Vzorek 2.5

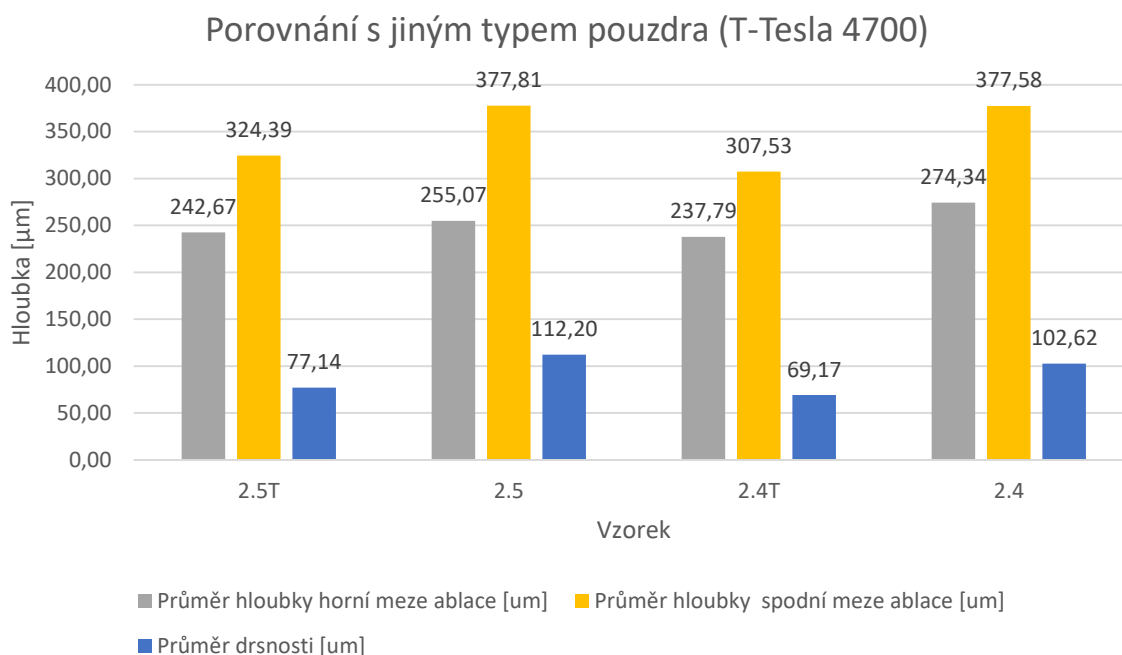
Tabulka 23 Parametry receptury 2.5

Receptura 2.5						
Krok	Výkon [W]	Hatch [mm]	Frekvence [kHz]	Rychlost [mm/sec]	Očekávané zahloubení [μm]	Reálné zahloubení [μm]
1	3.5	0.025	20	200	65.8	377.81
2	3.5				65.8	
3	3.5				65.8	
4	3.5				65.8	
5	3				72.95	
Celkem:					336.15	
Rozdíl očekávané vs. reálné zahloubení [μm]					41.66	

8.3 Porovnání s jiným typem pouzdra

Tabulka 24 Porovnání účinků receptury na jiný typ pouzdra

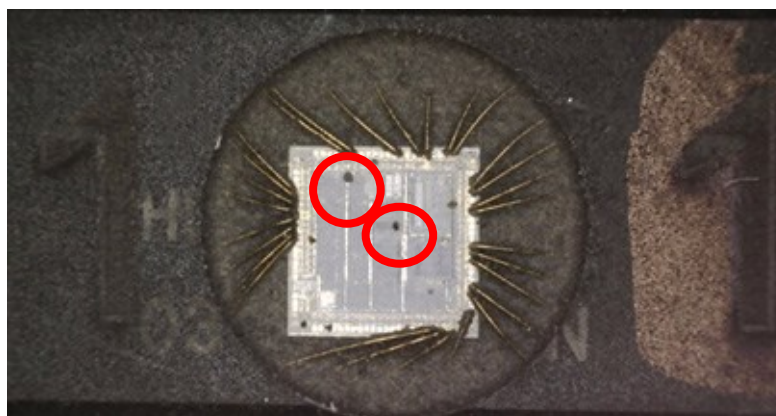
Vzo- rek	Hloubka po horní mez ab- lace [μm]	Hloubka po horní mez ab- lace 2 [μm]	Průměr hloubky horní meze ablance [μm]	Hloubka po spodní mez ab- lace [μm]	Hloubka po spodní mez ab- lace 2 [μm]	Průměr hloubky spodní meze ablance [μm]	Drs- nost 1 [μm]	Drs- nost 2 [μm]	Průměr drs- nosti [μm]
2.5T	243.91	241.42	242.67	327.42	321.36	324.39	74.05	80.23	77.14
2.5	248.72	261.42	255.07	387.27	368.35	377.81	121.14	103.26	112.20
2.4T	219.06	256.52	237.79	296.47	318.58	307.53	66.20	72.13	69.17
2.4	268.34	280.33	274.34	378.55	376.60	377.58	105.09	100.14	102.62



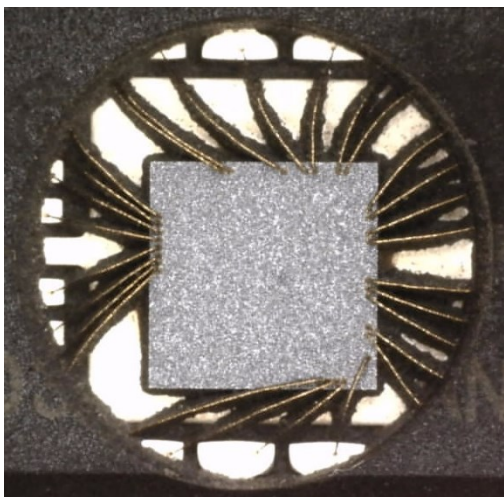
Graf 19 Porovnání účinků receptury na jiný typ pouzdra

8.4 Analýza a vyhodnocení dosažených výsledků

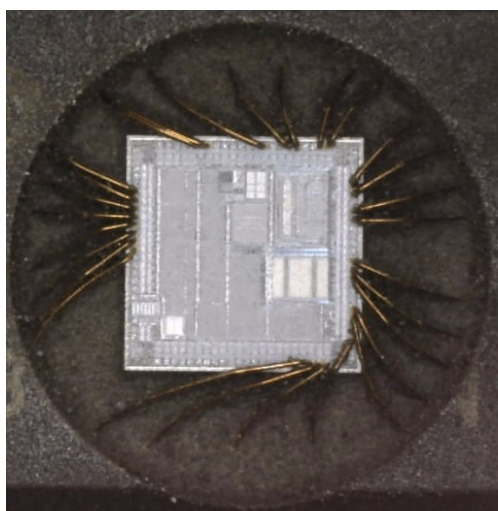
Vzhledem k průměrné hloubce uložení čipu v pouzdře, která činí $607 \mu\text{m}$, se jako ideální receptura v případě úplného odkrytí a čitelnosti čipu, jeví receptura 1.4, kdy došlo k nejlepší čitelnosti parametrů na čipu při $400\times$ zvětšení. Při úplném odkrytí čipu, vzhledem k účelu jeho identifikace, nezáleží tolik na parametru, v jaké hloubce je uložen. Čitelnost je relativně dobrá po tom, co dojde k odstranění veškerého materiálu a nečistot nad čipem viz Obrázek 57. Opačným extrémem je zcela zjevně nepřiměřená volba parametrů, kdy dojde ke zničení struktury na čipu viz Obrázek 56.



Obrázek 55 Nečistoty na čipu



Obrázek 56 Zničený čip



Obrázek 57 Očištěný čip

V případě, kdy je nutné odebrat pouze část materiálu nad čipem pro následné chemické leptání, již na parametru hloubky čipu velmi závisí. Měřením, bylo zjištěno, že nejnižší se čip v pouzdře nacházel v $565,1 \mu\text{m}$ oproti průměru $607 \mu\text{m}$. Obecně by šlo vycházet z průměrné hodnoty uložení čipu, pokud by čip nadále nemusel být funkční a vzhledem k následnému chemickému leptání by šlo pouze o identifikaci čipu samotného. S ohledem k rozdílnosti hloubky uložení čipu byla ponechána určitá bezpečnostní vrstva nad samotným čipem, která by v nejhorším případě, tedy pro hodnotu uložení $565,1 \mu\text{m}$ v případě receptury 1.3 činila ještě asi necelých $60 \mu\text{m}$. V případě nutnosti bezpečnějšího postupu, lze taktéž doporučit metodu 2.1 se zahloubením $417 \mu\text{m}$, popřípadě 2.2, se zahloubením $486 \mu\text{m}$, které nad čipem nechají v nejhorším případě necelých $80 \mu\text{m}$, v případě metody 2.2 potom $148 \mu\text{m}$ materiálu pouzdra.

8.5 Další možnosti směřování v oblasti

Zejména kvůli rozdílnému výškovému uložení čipu v pouzdře součástky, je nutné před laserovou ablací tento parametr zjistit. Vzhledem k tomu, že se toto provádí pro potvrzení či vyvrácení podezření na padělanou součástku, nedá se spoléhat na oficiální parametry výrobce, protože se parametry u padělané součástky mohou logicky lišit. Zjištění polohy čipu v součástce, kromě destrukční metody odkrytí materiálu nad čipem pomocí laseru, lze realizovat také například pomocí rentgenového záření.

U lokalizace čipu pomocí rentgenu je třeba zajistit pomocí přípravku to, aby byla zkoumaná součástka kolmo ke zdroji rentgenového záření. Oproti půdorysnému pohledu, je třeba tedy zajistit pohled kolmý, vzhledem k uložení čipu v součástce. Dalším problémem u takové lokalizace čipu v pouzdře je přesnost a odečtení hloubky, v které se čip nachází. Pro co nejpřesnější výsledky, by bylo na místě lokalizovat čip, minimálně $\pm 10 \mu\text{m}$, od horní hrany pouzdra, pro co nejvyšší zefektivnění procesu následné ablace. Teoretickou možností je odečítání uložení čipu vzhledem k poměru výšky celého pouzdra, ovšem přesnost, na kterou se lze touto metodou dostat je přinejmenším diskutabilní. Další možností jak zjistit hloubku, v které se čip nachází je použití například ultrazvukových vln.

Další možností, kudy směřovat v této oblasti je test ablace na jiném než pulzním laseru, např. na kontinuálním laseru. Je to především proto, že pulzní laser, jak již z názvu vyplývá, pracuje za pomoci energetických pulzů. Tyto pulzy se také projevují v materiálu, na který působí, jako malé krátery a tímto způsobem je tak plocha nehomogenní. Vzhledem k příměsím, které pouzdra polovodičových součástek obsahují, bude plocha po laserové ablací pravděpodobně vždy nehomogenní. Otázkou však je, zda by použití kontinuálního laseru homogenitu povrchu alespoň nevyšlo?

Jednou z dalších možností kudy směřovat, je stanovení koeficientů odběru materiálu, pro různé materiály pouzder, na kterých má být laserová ablace aplikována. Počátek zkoumání v této oblasti položila již tato práce, kdy byly parametry testovány také na součástce Tesla 7400, jejíž pouzdro bylo vyrobeno z jiného materiálu, než pouzdro součástek, na kterých byly prováděny testy kvantifikace parametrů laserové ablace. Výsledky dopadly tak, že pouzdro Tesly 7400, bylo odolnější pro zvolenou recepturu laserové ablace v konečném důsledku o $50 - 70 \mu\text{m}$.

ZÁVĚR

Kvantifikace parametrů laserové ablace je v této práci popisována zejména ve vztahu k padělaným součástkám. Problematika padělaných součástek, jako taková, neustále nabírá na významu s neustále se zvyšující automatizací a snahou o výrobu zařízení, které jsou stále menší, lehčí a výkonnější. Dá se tedy předpokládat další nárůst aplikace obvodů velmi vysoké integrace a dalších komplexních součástek, které budou ve větší míře zapouzdřeny v nehermetických pouzdrech. Právě zvyšující se nároky na nasazení takových součástek spolu s tlakem na cenu, vytváří prostor na trhu pro případné falsifikáty elektronických součástek, popřípadě součástky, jejichž parametry neodpovídají parametrům výrobce. V takových případech se lze setkat se součástkami, které nejenže neodpovídají kvalitě originálních součástek, ale mohly být již použity, nebo vystaveny nepříznivým vlivům prostředí apod.

Některé z nedostatků takových součástek lze odhalit například vnější vizuální kontrolou, pakliže se jedná o méně zdařilé padělky. Pro zdařilejší padělky je nutno použití sofistikovanějších metod vnitřní kontroly, mezi které řadíme mimo jiné rentgenovou a akustickou mikroskopii. Své uplatnění v tomto oboru nalezne také analýza použitých materiálů za přispění Ramanovy spektroskopie, popřípadě rentgenové fluorescenční spektroskopie. Kapitolou samou o sobě ve vztahu k padělaným elektronickým součástkám je série parametrických testů, které by měly odhalit parametry součástky a porovnat je s parametry udávané výrobcem, zda se jedná o originální součástku. Časová a finanční náročnost je u těchto metod však značná spolu s nároky na technické vybavení.

Mezi relativně rychlé a jednoduché metody patří využití laserové ablace, popřípadě kombinace laserové ablace spolu s chemickými metodami, především leptáním. Právě kvůli nasazení laserové ablace, je potřeba kvantifikovat jednotlivé parametry laserového zařízení, tak, aby bylo možné na základě předem stanovených požadavků odebrat tolik materiálu pouzdra, kolik je třeba. Mezi nastavitelné parametry laserového zařízení, tak patří možnost nastavení výkonu laseru, frekvence laseru, rychlosti přeběhu laseru, a rozteč jednotlivých průchodů laseru od sebe, tzv. hatch vzdálenost a její úhel. Všechny tyto parametry byly kvantifikovány na padělaných součástkách stejného typu, a pokud to bylo možné, tak i za konstantních ostatních parametrů. Pouze u parametru rozteče čar laserového paprsku bylo nutné volit nižší výkon, protože vlivem vysokého výkonu docházelo k zapékání odebraného materiálu.

Pro vytvoření receptur odebraného materiálu z pouzdra se nejlépe hodilo využití právě výkonového parametru laserového zařízení. Došlo tak k sestavení několika receptur pro odebrání materiálu z nehermetického pouzdra elektronických součástek. Receptury byly rozděleny dále podle toho, zda jsou předurčeny k následnému leptání do pouzdra součástky nebo je od receptury laserové ablace vyžadována pouze čitelnost typu a výrobce čipu.

Pro pokračování v dané problematice je dále vhodné zaměřit se na přesnou lokalizaci čipu v pouzdře, neboť měřením bylo zjištěno, že se výška uložení čipu v pouzdře může lišit o několik desítek mikrometrů. Dále je vhodné porovnat působení pulzního laseru na drsnost povrchu po ablaci s laserem kontinuálním.

Celá problematika padělaných součástek je velmi obsáhlé téma, které v následujících letech bude jistě vyžadovat další zkoumání a nalézání nových metod detekce padělků elektronických součástek. Tato práce tedy měla přispět k objasnění základů této problematiky, nastínění používaných metod a také doporučení, pro aplikaci metod nových.

CONCLUSION

In this thesis, the quantification of the parameters of laser ablation is described especially in the relation to the counterfeit electronics. The importance of the topic of counterfeit electronics is increasing because of the continuing rise in automation and the effort of producing devices, which are smaller, lighter, and more powerful. Therefore, there is supposed further increase in the application of circuits of high integration and also other complex parts, which would be mainly encapsulated in non-hermetic cases. The increasing requirements for the use of these parts together with the pressure on the prices create the space on the market for falsification of electronic components, or possible also components, which parameters do not correspond to the parameters of the produces. In the cases it is possible to find components, which not only do not correspond to the parameters of the quality of the original components, but also could be also used, exposed to adverse effects of the environment etc.

Some of the drawbacks of these components can be revealed for example by external visual inspection, in case of not so professional counterfeit components. In the case of more professional components it is needed to use more sophisticated methods of internal inspection, such as X-ray and acoustic microscopy. It is also possible to use the analysis of the used materials with the Raman's spectroscopy, or X-ray fluorescence spectroscopy. Moreover, there is also a series of parametric tests, which are supposed to reveal the parameters of the component and compare them with the parameters stated by the producer, in order to reveal whether it is an original component or not. However, these methods are financially and time demanding, together with high requirements on hardware.

One of the relatively fast and easy methods is the laser ablation, eventually the combination of laser ablation with chemical methods, such as etching. Because of the use of laser ablation, it is necessary to quantify each parameter of the laser device to enable to remove the given amount of the material case, based on the pre-given parameters. The adjustable parameters of the laser device are setting of the power of the laser, the frequency, the speed of the overrun of the laser, or the spacing of individual laser passages apart, the so called hatch distance and its angle. All these parameters were quantified on the fake components of the same type, and if possible, also in the case of constant parameters. Only in the case of the parameter of laser beam line spacing, it was

necessary to choose lower performance level, otherwise there was caused baking of the given material.

The best method for creating the recipes of the taken material from the case was the performance parameter of the laser device. Therefore, there were created several recipes for the removing the material from non-hermetic case of electronic components. Consequently, the recipes were distributed on the bases of the possibility of etching into the case of the component, or if only the type readability and the chip maker is needed.

For continuing in this topic, it is suitable to focus on the exact localization of the chip in the case, because it was found that the height of the saving of the chip in the case can differ by tens of micrometers. Moreover, it is suitable to compare the effect of pulse laser on the roughness of the surface after the ablation with continual laser.

The whole topic of fake components is a very wide topic, which will require next analyzing and finding new methods in the consequent years. This thesis was supposed to contribute to the clarification of the basis of this topic, description of the used methods and more recommendations for the application of new methods.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] TEHRANIPOOR, Mark. Counterfeit integrated circuits. ISBN 9783319118239.
- [2] REUTERS. Why Is The Pentagon Finding Counterfeit Chinese Electronics In Critical Military Equipment? In: *International Business Times* [online]. 2012 [cit. 2017-02-27]. Dostupné z: <http://s1.ibtimes.com/sites/www.ibtimes.com/files/styles/lg/public/2012/06/01/278731.png>
- [3] DOSTÁL, Bc. Jan. *Studie možností aplikace detektoru padělků elektronických součástek*. Zlín, 2012. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce Ing. Petr Neumann, Ph.D
- [4] JELÍNEK, Bc. Karel. *Možnosti Ramanovy spektroskopie při analýze padělků elektronických součástek*. Zlín, 2012. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce Ing. Petr Neumann, Ph.D.
- [5] M. Crawford, et al., Defense Industrial Base Assessment. In: Counterfeit Electronics, Report of U.S. Department of Commerce, Bureau of Industry and Security, Office of Technology Evaluation, January 2010.
- [6] SNOPEK, Bc. Josef. *Aplikace laseru pro otevření přístupu k systému na čipu zapouzdřené součástky*. Zlín, 2014. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce Ing. petr Neumann, Ph.D.
- [7] WITZMAN, Sorin a Fred SCHENKELBERG. Failure Analysis, benefits, logistics, and limitations. In: *SlideShare* [online]. IMAPS, 2005 [cit. 2017-03-03]. Dostupné z: <https://www.slideshare.net/fms95032/2005-07-25-ms-presentation1ver-sw>
- [8] Counterfeit Detection: Acoustic Microscopy Imaging. *SMT corporation: A Stocking Distributor of Electronic Components The Industry Leader in Counterfeit Mitigation* [online]. [cit. 2017-03-06]. Dostupné z: <http://www.smtcorp.com/counterfeit-detection?q=acoustic-microscopy-imaging>
- [9] Electronic Component Testing: A Non-Contact Sport: Contact vs. Non-Contact Testing. In: *FLIR: RESEARCH & sCIENCE* [online]. 2015 [cit. 2017-03-11]. Dostupné z: <http://www.flir.com/uploadedImages/Research-Science/Resources/electronic-component-testing-1.png>

- [10] ŘEPKA, M. Nové trendy v Ramanově spektrometrii. *Fakulta chemická, Vysoké učení technické v Brně* [online]. 2014 [cit. 2014-04-26]. Dostupné z: <http://www.chempoint.cz/nove-trendy-v-ramanove-spektrometrii>
- [11] NEUMANN PH.D., Ing. Petr. Opět něco k tématu prevence průniku nepůvodních součástek. *DPS: Elektronika od A do Z* [online]. 2/2012. , 8-9 [cit. 2017-03-16]. Dostupné z: <http://www.dps-az.cz/soucastky/id:9005/opet-neco-k-tematu-prevence-pruniku-nepuvodnich-soucastek>
- [12] NEUMANN, PH.D., Ing. Petr a Ing. Josef HOUSER, PH.D. Nepůvodní elektronické součástky – rok pátý. *DPS: Elektronika od A do Z* [online]. 2015, 2015(6), 2-4 [cit. 2017-03-17]. Dostupné z: <http://www.dps-az.cz/soucastky/id:20881/nepuvodni-elektronicke-soucastky-rok-paty>
- [13] PEČIVA, Pavel. *METODIKA ZPŘÍSTUPNĚNÍ ČIPU ZAPOUZDŘENÝCH SOUČÁSTEK*. Zlín, 2014. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce Ing. Petr Neumann, Ph.D.
- [14] NEUMANN PH.D., Ing. Petr. Zajímavý pomocný nástroj pro analýzu nepůvodních součástek. *DPS: Elektronika od A do Z* [online]. 4/2014. , 2-4 [cit. 2017-03-16]. Dostupné z: <http://www.dps-az.cz/soucastky/id:7938/zajimavy-pomocny-nastroj-pro-analyzu-nepuvodnich-soucastek>
- [15] HARPER, C.A.: *Electronic Materials And Processes Handbook*. McGraw-Hill, 2004.
- [16] NISHI, Y., DOERING, R., *Handbook of Semiconductor Manufacturing Technology*. Second Edition, CRC Press, 2012.
- [17] KRÜGER, M., J. KRINKE, K. RITTER, B. ZIERLE a M. WEBER. Laser-assisted decapsulation of plastic-encapsulated devices. *Microelectronics Reliability* [online]. 2003, vol. 43, 9-11, s. 1827-1831 [cit. 2014-04-24]. DOI: 10.1016/S0026-2714(03)00311-1. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0026271403003111>
- [18] Elektronické součástky. In: *HADEx: TRADICE I BUDOUCNOST* [online]. 2016 [cit. 2017-03-17]. Dostupné z: <http://hadex.cz/img/zbozi/e919.jpg>
- [19] PULEC, Jiří. *Analýza vlivu pouzdření na izolační vlastnosti* [online]. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009 [cit. 2017-03-18]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/12205>. Diplomová práce.

Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav mikroelektroniky. Vedoucí práce Ivan Szendiuch.

- [20] Přehled pouzder součástek - SMD: Základní typy vývodů pouzder. In: *Vyvoj.hw.cz: profesionální elektronika* [online]. 2001 [cit. 2017-03-18]. Dostupné z: <http://vyvoj.hw.cz/teorie-a-praxe/dokumentace/prehled-pouzder-soucastek-smd.html>
- [21] SEMICONDUCTORS, NXP. NXP Introduces LDO with Best-in-Class Performance in a Small Wafer-Level Chip-Scale Package. In: *EDOM TECHNOLOGY CO. LTD.* [online]. 2011 [cit. 2017-03-18]. Dostupné z: <http://www.edom.com.tw/userfiles/Image/NXPP.jpg>
- [22] Ramanova spektroskopie. In: *Lao: Lasery a Optika* [online]. [cit. 2017-04-14]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/aplikace-79/mereni-spektralnich-charakteristik-98/ramanova-spektroskopie-216>
- [23] HALE, Alan. Microscopes. In: *Celestron* [online]. 2007 [cit. 2017-04-15]. Dostupné z: http://www.celestron.com/media/795791/1211246798_microscopesinfo.pdf
- [24] Depth Measuring Microscope: 2034-CIL-300-ZX, 300x. In: *Pepler Optics: Quality magnified* [online]. [cit. 2017-04-15]. Dostupné z: <https://www.pepleroptics.com/depth-measuring-microscope-2034-cil-300-zx-300x.html>
- [25] PASTORIUS, Dr. Walt. TRIANGULATION SENSORS: An Overview. In: *TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN* [online]. [cit. 2017-04-16]. Dostupné z: https://tu-dresden.de/bu/umwelt/geo/ipf/photogrammetrie/ressourcen/dateien/elearning/documents_content/elearn_trianglesensor?lang=en
- [26] VOJÁČEK, Antonín. Princip laserových snímačů vzdálenosti s triangulačním principem měření: Triangulační princip měření. In: *Automatizace.hw.cz: rady a poslední novinky z oboru* [online]. 2015 [cit. 2017-04-16]. Dostupné z: <http://automatizace.hw.cz/mereni-a-regulace/princip-funkce-laserovych-snimacu-vzdalenosti-s-triangulacnim-principem-mereni.html>
- [27] HEITZ, Ramona a Stephan MÄCHERLEIN. SICK AG WHITE PAPER: NON-CONTACT MEASUREMENT WITH DISPLACEMENT MEASURING SENSORS FOR QUALITY INSPECTION. In: *SICK: SENSOR INTELLIGENCE* [online]. 2016 [cit. 2017-04-16]. Dostupné z: <https://www.sick.com/>

- media/dox/4/54/154/Whitepaper_Non_contact_measurement_with_displacement_measuring_sensors_for_quality_inspection_en_IM0065154.PDF
- [28] OC Sharp: Short Range Distance Sensors. In: *SICK: Sensor Intelligence* [online]. Germany, 2014 [cit. 2017-04-16]. Dostupné z: https://www.sick.com/media/dox/5/85/785/Operating_instructins_OC_Sharp_Short_Range_Distance_Sensors_en_IM0056785.PDF
- [29] VOJÁČEK, Antonín. Konfokální princip optického měření vzdáleností: Princip konfokálního měření. In: *Automatizace.hw.cz: rady a poslední novinky z oboru* [online]. 2016 [cit. 2017-04-16]. Dostupné z: <http://automatizace.hw.cz/komponenty-mereni-a-regulace/konfokalni-princip-optickeho-mereni.html>
- [30] OŠŤÁDAL, Bc. Luboš. *Výzkum laserového mikro-obláčení polymerních materiálů* [online]. Zlín, 2010 [cit. 2017-04-16]. Dostupné z: https://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/13852/0/C5%A1%C5%A5%C3%A1dal_2010_dp.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce Ing. Libuše Sýkorová, Ph.D.
- [31] PETERKA, Pavel, Pavel HONZÁTKO a Miroslav KARÁSEK. Vlákňové lasery: jasné světlo ze skleněných nitek. In: *UFE: Ústav fotoniky a elektroniky Akademie věd ČR* [online]. Praha-Kobylisy: Ústav fotoniky a elektroniky AVČR, 2010 [cit. 2017-04-17]. Dostupné z: http://www.ufe.cz/sites/default/files/aktuality/10_peterka_cescasfyz_50_let_laseru-vlaknove_lasery.pdf
- [32] PETERKA, P. Vlákňové lasery dobývají svět. *Ústav fotoniky a elektroniky AV ČR* [online]. 2013 [cit. 2014-04-28]. Dostupné z: http://www.ufe.cz/sites/default/files/Media/12_peterka_21_stoleti-panorama.pdf
- [33] ANONYM. Princip vlákňového - FIBER LASERU. In: *Leonardo technology: Automatizace průmyslového značení* [online]. [cit. 2017-04-17]. Dostupné z: <http://www.lt.cz/e-learning/laser/princip-vlaknoveho-fiber-laseru>
- [34] TER-MIKIRTYCHEV, Valerii. *Fundamentals of Fiber Lasers and Fiber Amplifiers*. Switzerland: Springer, 2014. ISBN 978-3-319-02337-3.
- [35] RAY, Light. CROW: Faserlaser Beschriftungssystem. In: *Light ray: Marking Systems GmbH* [online]. Winkelhaid [cit. 2017-04-16]. Dostupné z: <http://www.light-ray.de/images/PDF/Crow.pdf>

- [36] NEUMANN, Petr a Milan NAVRÁTIL. Rizika a prevence použití nepůvodních polovodičových součástek. *JMO: Jemná mechanika a optika*. 2017, **2017**(3), 87-90. ISSN 04476441.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

WHO	World Health Organization
OCM	Original Component Manufacturers
HW	Hardware
XRF	Rentgenové fluorescenční spektroskopie
RoHS	Restriction of the use of Hazardous Substances
V-A	Volt - ampérová charakteristika
ATE	Automatic test equipment
IO	Integrovaný obvod
DIP/DIL	Dual In-Line Package
SOJ	Small outline “J” leads
QFP	Quad Flat Pack
BGA	Ball grid array
SiP	Small Inline Package
EDFA	Erbium Doped Fiber Amplifier
FBG	Fiber Bragg Grating
PRR	Pulse repetition rate.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Padělané produkty [1]	12
Obrázek 2 Klasifikace padělaných součástek [1]	13
Obrázek 3 Příklad recyklace součástek v Číně [2]	15
Obrázek 4 Demonstrace padělaného CPU [3]	17
Obrázek 5 Princip nadrodukce elektronických součástek [1].....	17
Obrázek 6 Příklad značení součástky [1].....	21
Obrázek 7 Příklad koroze nožiček a pouzdra [7].....	22
Obrázek 8 Příklad součástky (vlevo) před a (vpravo) po použití acetonu [3]	24
Obrázek 9 Chybné vlasy [6]	24
Obrázek 10 Znečištěné a nerovnoměrné vývody.....	25
Obrázek 11 Rentgenová analýza součástky [3]	26
Obrázek 12 Akustická mikroskopie [8]	26
Obrázek 13 Příklad použití infračervené termografie [9].....	27
Obrázek 14 Interakce fotonu [22].....	29
Obrázek 15 Princip Ramanovy spektrografie [10]	29
Obrázek 16 Princip rentgenové spektroskopie [3].....	31
Obrázek 17 Příruční XRF zařízení [3].....	31
Obrázek 18 Příklad základního testování – nepropojený	33
Obrázek 19 Příklad použití kovového	36
Obrázek 20 Průřez PEMs pouzdrem [6]	37
Obrázek 21 Struktura jednotlivých polymerů [6]	38
Obrázek 22 DIP Pouzdro [20]	39
Obrázek 23 SOJ pouzdro [20]	40
Obrázek 24 TSOP a QFP Pouzdro [20]	40
Obrázek 25 BGA Pouzdro [20]	40
Obrázek 26 SIP Pouzdro [20]	41
Obrázek 27 Příklad MCM pouzdra [19]	41
Obrázek 28 Naleptané pouzdro kyselinou [13]	42
Obrázek 29 Pouzdro po laserové ablací [14]	43
Obrázek 30 Princip kombinace	44
Obrázek 31 Složený	46
Obrázek 32 Digitální mikroskop [23].....	47

Obrázek 33 Hloubkový mikroskop [24]	48
Obrázek 34 Princip laserové triangulace [25].....	49
Obrázek 35 Konfokální princip [27].....	50
Obrázek 36 Parametry OC Sharp [28].....	51
Obrázek 37 Chyba vzniklá nerovností povrchu [30]	52
Obrázek 38 Vláknó laseru [31].....	53
Obrázek 39 Tvar používaných průřezů optických vláken [32].....	54
Obrázek 40 Princip vláknového laseru s FBG [33]	55
Obrázek 41 Používaný vláknový laser [35]	57
Obrázek 42 Princip odečítání Z-tové souřadnice.....	59
Obrázek 43 Popis použitých součástí mikroskopu	59
Obrázek 44 Typy šrafování.....	63
Obrázek 45 Porovnání jednotlivých roztečí šrafování.....	64
Obrázek 46 Testování rychlosti přeběhu 10 – 40 mm/sec.....	66
Obrázek 47 Testování rychlosti přeběhu 130 - 160 mm/sec	66
Obrázek 48 Porovnání struktury nejvyšší 200 kHz a nejnižší 20 kHz frekvence.....	70
Obrázek 49 Detail zapečení	73
Obrázek 50 Struktura materiálu po laserové ablaci, 100x zvětšeno	74
Obrázek 51 Zkoumané pouzdro.....	75
Obrázek 52 Odhalení čipu	75
Obrázek 53 Odhalení výrobce čipu (receptura 1.4).....	78
Obrázek 54 Aplikace receptury 2.2	81
Obrázek 55 Nečistoty na čipu.....	83
Obrázek 56 Zničený čip.....	84
Obrázek 57 Očištěný čip.....	84

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Přehled kontaktních měřidel	52
Tabulka 2 Přehled vlnových délek laserů [34]	56
Tabulka 3 Parametry použitého laboratorního laseru [35]	57
Tabulka 4 Parametry testování výkonu	60
Tabulka 5 Naměřené výkonové parametry	60
Tabulka 6 Testování hatch parametru	64
Tabulka 7 Naměřené parametry v závislosti na hodnotě hatch	64
Tabulka 8 Testování parametru rychlosti přeběhu	66
Tabulka 9 Naměřené parametry ablace v závislosti na rychlosti přeběhu	67
Tabulka 10 Testování frekvenčního parametru	70
Tabulka 11 Naměřené parametry ablace v závislosti na frekvenci	71
Tabulka 12 Vzdálenost čipu od horní hrany pouzdra	76
Tabulka 13 Parametry receptury 1.1	76
Tabulka 14 Parametry receptury 1.2	76
Tabulka 15 Parametry receptury 1.3	77
Tabulka 16 Parametry receptury 1.4	77
Tabulka 17 Naměřené parametry pro metodu neodhalující čip	78
Tabulka 18 Průměr spodních a horních mezí ablace	80
Tabulka 19 Parametry receptury 2.1	80
Tabulka 20 Parametry receptury 2.2	81
Tabulka 21 Parametry receptury 2.3	81
Tabulka 22 Parametry receptury 2.4	82
Tabulka 23 Parametry receptury 2.5	82
Tabulka 24 Porovnání účinků receptury na jiný typ pouzdra	82

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1 Zdroje padělků elektronických součástek podle jednotlivých zemí [1]	19
Graf 2 Typy padělaných diskrétních součástek [1]	20
Graf 3 Horní mez laserové ablace při změnách výkonu	61
Graf 4 Dolní mez laserové ablace při změnách výkonu	61
Graf 5 Porovnání horní a dolní meze ablace při změnách výkonu	62
Graf 6 Drsnost povrchu při změnách výkonu	62
Graf 7 Vliv rozteče šrafování na hloubku ablace	65
Graf 8 Vliv rozteče šrafování na drsnost povrchu po ablaci.....	65
Graf 9 Horní mez laserové ablace při změnách rychlosti přeběhu laseru	68
Graf 10 Dolní mez laserové ablace při změnách rychlosti přeběhu laseru.....	68
Graf 11 Porovnání horní a dolní meze ablace při změnách rychlosti přeběhu	69
Graf 12 Vliv hatch parametru na drsnost povrchu po ablaci	69
Graf 13 Horní mez laserové ablace při změnách frekvence	71
Graf 14 Dolní mez laserové ablace při změnách frekvence	71
Graf 15 Porovnání horní a dolní meze ablace při změnách frekvence	72
Graf 16 Vliv frekvenčního parametru na drsnost povrchu po ablaci.....	72
Graf 17 Parametry jednotlivých receptur odhalující čip.....	78
Graf 18 Porovnání jednotlivých receptur neodhalující čip	79
Graf 19 Porovnání účinků receptury na jiný typ pouzdra.....	83