

# Projekt na zlepšení výrobního procesu ve výrobě čipů

Bc. Zbyněk Žilinský

---

Diplomová práce  
2023



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta managementu a ekonomiky

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta managementu a ekonomiky  
Ústav průmyslového inženýrství a informačních systémů

Akademický rok: 2022/2023

# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: Bc. Zbyněk Žilinský  
Osobní číslo: M210248  
Studijní program: N0488P050002 Průmyslové inženýrství  
Forma studia: Kombinovaná  
Téma práce: Projekt na zlepšení výrobního procesu ve výrobě čipů

## Zásady pro vypracování

Úvod

Definujte cíle práce a použité metody zpracování práce.

I. Teoretická část

- Zpracujte literární rešerši v dané oblasti a formulujte teoretická východiska pro zpracování praktické části diplomové práce.

II. Praktická část

- Proveďte analýzu vybraného procesu výroby čipů pro danou technologii.
- Vypracujte projektový návrh pro zlepšení procesu ve výrobě čipů dané technologie.
- Zhodnoťte projektové řešení.

Závěr

**Seznam doporučené literatury:**

- AHMAD, Ishad. *Ion Implantation – Research and Application*. Rijeka: InTechOpen, 2017, 152 s. ISBN 978-953-51-3237-0.
- MALÝ, Martin. *Hradla, volty, jednočipy: úvod do bastlení*. Praha: CZ.NIC, 2017, 512 s. ISBN 978-80-88168-23-2.
- PÁNEK, Petr, Milan LÍBEZNÝ, Michal LORENC, et al. *Základy technologie výroby polovodičů*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2016, 373 s. ISBN 978-80-7204-939-4.
- SVOZILOVÁ, Alena. *Zlepšování podnikových procesů*. Praha: Grada, 2011, 231 s. ISBN 978-80-247-3938-0.
- YOSHIO Nishi and Robert DOERING. *Handbook of Semiconductor Manufacturing Technology: Edition 2*. Boca Raton: CRC Press, 2017, 1720 s. ISBN 978-1-4200-1766-3.

**Vedoucí diplomové práce:**

**Ing. Lucie Hrbáčková, Ph.D.**

Ústav průmyslového inženýrství a informačních systémů

**Datum zadání diplomové práce: 10. února 2023**

**Termín odevzdání diplomové práce: 21. dubna 2023**

L.S.

---

**prof. Ing. David Tuček, Ph.D.**  
děkan

---

**prof. Ing. David Tuček, Ph.D.**  
garant studijního programu

Ve Zlíně dne 10. února 2023

## PROHLÁŠENÍ AUTORA DIPLOMOVÉ PRÁCE

### Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové 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 práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na elektronickém nosiči v příruční knihovně Fakulty managementu a ekonomiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou 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 práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen přípouští-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 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 práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové 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,

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

Ve Zlíně 5.4.2023

Jméno a příjmení: Bc. Zbyněk Žilinský

.....  
podpis diplomanta

## **ABSTRAKT**

Diplomová práce je zaměřena na zlepšení výrobního procesu ve výrobě čipů ve společnosti ONSEMI. Cílem práce je za pomoci projektu a procesních experimentů zlepšit vybraný vyráběný čip a snížit zmetkovitost výrobků z důvodu vyskytující se snížené výtěžnosti. Tato diplomová práce je rozdělená na dvě části. V teoretické části je vypracována literární rešerše zaměřená na problematiku vybraných procesů výroby čipů, používání informačních systému ve výrobě čipů a statistických metod ověřování kvality procesu. Dále je definován projekt a jeho formální náležitosti. V praktické části je podrobněji představena společnost, specifické pracoviště a podnikové procesy výroby čipů. Za pomoci podrobné analýzy po sběru dat je identifikována příčina snížené výtěžnosti. Na základě vypracovaného projektu s výslednými experimenty je navrženo řešení pro zlepšení výrobního procesu vyráběného čipu a jeho implementace do pracovního předpisu.

Klíčová slova: proces, čip, výtěžnost, analýza, projekt, experiment, implementace

## **ABSTRACT**

The diploma thesis is focused on the improvement of the production process in chip production at ONSEMI. The aim of the work is to improve the selected manufactured chip with the help of the project and process experiments and to reduce the scrap rate of the products due to the occurring reduced yield. This thesis is divided into two parts. In the theoretical part, a literature search is prepared, focused on the issues of selected chip production processes, the use of information systems in chip production, and statistical methods of process quality verification. Next, the project and its requirements are defined. In the practical part, the company, specific workplace, and business processes of chip production are presented in more detail. With the help of detailed analysis after data collection, the cause of the reduced yield is identified. Based on the developed project with the resulting experiments, a solution is proposed for improving the production process of the welding chip and its implementation into the work regulations.

Keywords: process, chip, yield, analysis, project, experiment, implementation

Rád bych poděkoval Ing. Lucii Hrbáčkové, Ph.D. za vedení mé diplomové práce, za věcné připomínky, za ochotu i čas při poskytování cenných připomínek při vypracování této diplomové práce.

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

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>CÍLE A METODY ZPRACOVÁNÍ PRÁCE</b> .....	<b>11</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>12</b>
<b>1 VÝROBA ČIPŮ</b> .....	<b>13</b>
1.1 VÝROBA ČIPŮ V ČR .....	13
1.2 VÝROBA KŘEMÍKOVÝCH DESEK V ČR .....	13
<b>2 PROCESY VÝROBY KŘEMÍKOVÝCH DESEK</b> .....	<b>14</b>
2.1 VÝROBA ČISTÉHO KŘEMÍKU .....	14
2.2 VÝROBA MONOKRYSTALU KŘEMÍKŮ .....	14
2.3 METODY VÝROBY KŘEMÍKOVÝCH DESEK .....	14
2.3.1 Czochralského metoda .....	15
2.3.2 Řezání křemíkového monokrystalu.....	15
2.3.3 Broušení křemíkových desek .....	15
2.3.4 Lapování.....	15
2.3.5 Leštění křemíkových desek.....	16
<b>3 PROCESY VÝROBY ČIPŮ</b> .....	<b>18</b>
3.1 FOTOLITOGRAFIE .....	18
3.2 DIFÚZE .....	19
3.3 IONTOVÁ IMPLANTACE .....	20
3.4 EPITAXNÍ PROCES .....	20
3.4.1 Polovodiče, dopanty typu N a P .....	21
3.4.2 Dioda .....	22
3.4.3 Tranzistory NPN a PNP .....	22
3.5 PLAZMATICKÉ LEPTÁNÍ .....	22
3.6 DEPOZICE KOVOVÝCH VRSTEV – NAPRAŠOVÁNÍ.....	23
3.7 BROUŠENÍ ZADNÍ STRANY DESEK .....	24
3.8 TESTOVÁNÍ ČIPU A PC STRUKTUR .....	25
<b>4 INFORMAČNÍ SYSTÉMY PRO ZOBRAZENÍ PROCESU</b> .....	<b>27</b>
4.1 PROCESY .....	27
4.2 INFORMAČNÍ TECHNOLOGIE A SYSTÉMY .....	27
4.3 MES SYSTÉM .....	28
4.3.1 Dispector .....	28
4.3.2 Databázová aplikace incidentů - Korekt .....	28
4.3.3 Tool XX .....	29
4.3.4 Exensio .....	30
4.3.5 Jump .....	30
<b>5 PROJEKTOVÉ ŘÍZENÍ</b> .....	<b>32</b>

5.1	DEFINOVÁNÍ PROJEKTU .....	32
5.2	CHARAKTERIZACE PROJEKTU .....	32
5.3	HARMONOGRAM PROJEKTU .....	32
5.4	FORMULACE CÍLU PROJEKTU – METODA SMART .....	33
5.5	ANALÝZA RIZIKA PROJEKTU .....	33
<b>6</b>	<b>STATISTICKÉ ŘÍZENÍ PROCESU.....</b>	<b>35</b>
6.1	ZÁKLADNÍ STATISTICKÉ POJMY .....	35
6.2	STATISTICKÉ ZOBRAZENÍ DAT .....	35
6.3	STATISTICKÁ REGULACE PROCESU .....	37
6.3.1	Základní charakteristika regulačního diagramu .....	38
6.4	STATISTICKÁ METODA DOE.....	38
<b>II</b>	<b>PRAKTICKÁ ČÁST.....</b>	<b>40</b>
<b>7</b>	<b>PŘEDSTAVENÍ VYBRANÉHO PODNIKU .....</b>	<b>41</b>
7.1	ZÁKLADNÍ CHARAKTERISTIKA FIRMY .....	41
7.2	ORGANIZAČNÍ STRUKTURA .....	41
7.3	HISTORIE SPOLEČNOSTI ONSEMI ČR.....	42
7.4	PRODUKTOVÉ PORTFOLIO.....	42
7.5	VÝROBKY SPOLEČNOSTI.....	43
<b>8</b>	<b>POPIS VÝROBY ČIPŮ .....</b>	<b>44</b>
8.1	ČISTÉ PROSTORY PRO VÝROBU ČIPŮ .....	44
8.2	IDENTIFIKACE VÝROBNÍ SADY S DESKAMI .....	45
8.3	INFORMAČNÍ SYSTÉMY PRO VÝROBU ČIPŮ .....	46
8.3.1	INNA – inf. systém pro výrobní zpracování .....	47
8.3.2	Korekt - databázový systém pro identifikaci pracovního incidentu.....	48
8.3.3	Gramms – zobrazení layoutu pracovišť .....	49
8.3.4	Dokument server – předpisy dle lokací.....	49
8.3.5	Mapový editor desek .....	50
8.4	PRACOVISŤE VÝROBY ČIPŮ – FOTOLITOGRAFIE A DIFÚZE .....	50
8.5	PRACOVISŤE VÝROBY ČIPŮ – IMPLANTACE.....	52
8.6	PRACOVISŤE VÝROBY ČIPŮ – EPITAXNÍ PROCES.....	52
8.7	PRACOVISŤE VÝROBY ČIPŮ – NAPRAŠOVÁNÍ KOVOVÝCH VRSTEV .....	53
8.8	PRACOVISŤE VÝROBY ČIPŮ - BROUŠENÍ ZADNÍ STRANY .....	54
8.9	PRACOVISŤE VÝROBY ČIPŮ – HROTOVÉ MĚŘENÍ PC A UP.....	55
8.9.1	PC testy .....	56
8.9.2	UP testování .....	58
8.9.3	Procentuální výtěžnost čipů .....	60
8.9.4	Kontrola PC a UP testování technologem měření.....	62
8.9.5	Hold a vyřazovací limit .....	63



<b>9</b>	<b>ANALÝZA SOUČASNÉHO STAVU VYBRANÉHO ČIPU .....</b>	<b>65</b>
9.1	ANALÝZA VÝTĚŽNOSTI VYBRANÉ TECHNOLOGIE BH5XX .....	67
9.1.1	Analýza zmetkované desky v programu Exensio .....	70
9.2	ANALÝZA PROCESU VYBRANÉ TECHNOLOGIE BH5XX.....	71
9.3	ANALÝZA PC DAT BH5XX.....	75
9.3.1	Kritické parametry technologie BH5XX .....	75
9.4	OMEZENÍ POUŽÍVÁNÍ EPI REAKTORŮ .....	76
9.5	DLOUHODOBÝ TREND PC PARAMETRŮ.....	77
9.6	DLOUHODOBÝ TREND R_B LAYER .....	78
9.7	SHRnutí ANALYTICKÉ ČÁSTI.....	80
<b>10</b>	<b>CHARAKTERISTIKA PROJEKTU .....</b>	<b>82</b>
10.1	DEFINOVÁNÍ PROJEKTU .....	82
10.2	HARMONOGRAM PROJEKTU .....	84
10.3	RIZIKA PROJEKTU .....	84
<b>11</b>	<b>PROJEKTOVÉ EXPERIMENTY .....</b>	<b>86</b>
11.1	DOE 1 – DĚLENÍ POMOCÍ EPITAXNÍHO PROCESU .....	86
11.2	VÝSLEDKY DOE 1 .....	87
11.3	DOE 2 – ZMĚNA IMPLANTAČNÍ DÁVKY UTOPENÉ VRSTVY .....	90
11.3.1	Plán DOE 2 .....	91
11.3.2	Analýza PC dat pro DOE 2 .....	92
11.3.3	Analýza UP dat pro DOE 2 .....	93
<b>12</b>	<b>IMPLEMENTACE DO PŘEDPISU .....</b>	<b>97</b>
12.1	RIZIKOVÁ PRODUKCE .....	97
12.2	KONTROLA PC A UP DAT .....	98
12.3	SCHVÁLENÍ A INTEGRACE DO PŘEDPISU.....	100
<b>13</b>	<b>ZHODNOCENÍ PROJEKTU .....</b>	<b>101</b>
13.1	NÁKLADY PROJEKTU .....	101
13.2	FINANČNÍ ZHODNOCENÍ PO ZLEPŠENÍ PROCESU .....	101
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>102</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>	<b>103</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>107</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>108</b>
	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>111</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>113</b>

## ÚVOD

V současné době je polovodičový průmysl jedním z nejdynamičtějších a nejkonkurenčnějších odvětví na světě. Výroba čipů je klíčovou součástí tohoto průmyslu, neboť jsou základními stavebními kameny pro širokou škálu elektronických zařízení, jako jsou počítače, mobilní telefony, tablety, automobily, letadla a další. Výroba čipů je však také velmi náročný a složitý proces, který vyžaduje vysokou úroveň technologického know-how, přesnosti a kvality. Jedním z hlavních faktorů ovlivňujících kvalitu a náklady na výrobu čipů je výtěžnost, což je poměr mezi počtem funkčních čipů a celkovým počtem vyrobených čipů. Vysoká výtěžnost znamená nižší výrobní náklady na jednotku a vyšší ziskovost pro výrobce čipů. Výtěžnost je ovlivněna mnoha faktory, jako je variabilita procesu, defekty, design a složitost čipů. V posledních letech se tyto faktory staly ještě více významnými kvůli trendu miniaturizace a zvyšování komplexity čipů podle Mooreova zákona. Mooreův zákon říká, že počet tranzistorů se zdvojnásobuje každé dva roky. To znamená, že se čipy stávají menšími a složitějšími s každou generací. To také znamená, že čipy jsou citlivější na variabilitu procesu a kontaminaci, a že defekty mají větší dopad na funkčnost čipů. Proto je neustále zlepšování výrobního procesu ve výrobě čipů na základě snížené výtěžnosti nezbytné pro udržení konkurenceschopnosti a rentability polovodičového průmyslu.

Cílem této diplomové práce je analyzovat současný stav výrobního procesu ve výrobě čipů na základě snížené výtěžnosti a navrhnout možná řešení pro jeho zlepšení.

Teoretická část této práce je rešerší literárních děl, jenž se zabývají tematikou procesu výroby křemíkových desek a čipů s jednotlivými úkony až k výslednému cíli - funkčnímu čipu. Dále jsou popsány informační systémy pro sledování procesních kroků ve výrobě čipů a jeho kvality. V závěrečné části jsou definovány statistické metody sledování výrobního procesu a je definováno projektové řízení s jeho náležitostmi.

V praktické části je popsána charakteristika a portfolio společnosti, výrobní proces a technologie čipů, které vyrábí. V analýze současného stavu výroby vybraného zkoumaného čipu je cílem identifikovat hlavní příčiny snížené výtěžnosti čipu a navrhnou možná řešení pro jejich odstranění nebo minimalizaci. Dále jsou v práci prezentovány výsledky analýzy dat a návrh na konkrétní opatření za pomoci zpracování projektu s dvěma experimenty. Je popsán postup implementace nového návrhu do procesu a v závěrečné části i finanční zhodnocení projektu.

Některé části diplomové práce jsou upraveny pro zachování know-how společnosti.

## CÍLE A METODY ZPRACOVÁNÍ PRÁCE

Hlavní cíl projektu ve společnosti ONSEMI je zlepšení výrobního procesu ve výrobě čipů u vybraného produktu. Mezi dílčí cíle projektu je zařazeno analyzování hlavních faktorů zvýšené zmetkovitosti vybraného čipů, analyzování dat z procesu pomocí měření funkčnosti čipu, návrh na zlepšení výrobního procesu a implementace nového upraveného výrobního procesu do pracovního předpisu.

V teoretické části této práce je zpracována literární rešerše z oblasti procesu výroby čipů, statistické regulace procesu a projektového řízení za pomoci českých i zahraničních knižních autorů a internetových zdrojů, pocházejících od odborníků v daném oboru. Cílem této rešerše je získat teoretické poznatky, které budou potřebné pro vypracování praktické části.

V analytické části je provedena analýza současného stavu vyráběného čipu za pomoci deskriptivní statistiky, sběru dat, korelační analýzy a statistické regulace procesu, kde výstup analýzy je proveden za pomoci regulačních diagramů. Souhrně byly zanalyzovány data z výroby čipů z let 2019–2021 za pomoci softwaru Jump a Exensio s cílem odhalení hlavních faktorů ovlivňujících nestandardnost a zmetkovitost výrobního procesu.

V projektové části jsou využity metody pro projektové řízení, jako je logický rámec, RIPRAN analýza či návrhy experimentu. Pro dosažení cíle jsou navrženy dva experimenty za pomoci cíleného zpracování čipu ve výrobním procesu. První experiment je zaměřen na laboratorní analýzu a testování různých hodnot faktorů, které mají vliv na sledovanou charakteristiku procesu. Druhý návrh je zaměřen na cílenou změnu výrobního procesu za pomoci úpravy procesních parametrů vyráběného čipu, tak aby optimalizoval parametry procesu a splňoval požadavky zákazníka.

Na základě výsledku druhého experimentu je navržena implementace zlepšení nového výrobního postupu do předpisu vyráběného čipu. Současně je snížena zmetkovitost jakožto měřitelné metriky pro zlepšení výrobního procesu vyráběného čipu za rok 2022.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 VÝROBA ČIPŮ

Výroba čipů je v dnešní době celosvětový fenomén. Čipy jsou potřeba do všech elektronických zařízení od telefonů, praček až automobilů či letadel. Člověk se bez těchto miniaturních sofistikovaných částic prakticky neobejde pro běžný život. V podstatě při kterékoli činnosti, kterou člověk vykonává s elektronickými zařízeními jsou ve svém nitru osazeny malinkatými čipy, které nám již několik desetiletí usnadňují rutinní práci, ať už na zahradě, v domácnosti či v práci.

Výrobu čipů můžeme charakterizovat jako složitý fyzicko - chemický proces na povrchu křemíkových desek. K výrobě integrovaných obvodů (IO) je použito standardních technologií k úpravě a objemu povrchu na křemíkových plátech. Výsledným produktem jsou na konci procesu křemíkové desky s čipy, které se posílají na montáž do plastových pouzder (Onsemi, © 1999 – 2023).

### 1.1 Výroba čipů v ČR

Výrobou čipů v ČR se zabývá společnost ONSEMI se sídlem v Rožnově pod Radhoštěm a dalšími návrhovými centry integrovaných obvodů v Brně. ONSEMI je součástí nadnárodní skupiny firem s více než 35000 zaměstnanci s hlavním sídlem v americkém Phoenixu. V České Republice zaměstnává momentálně okolo 2000 zaměstnanců. Hlavními body výroby jsou návrh IO, výroba křemíkových desek a výroba polovodičových čipů (Onsemi, © 1999 – 2023).

### 1.2 Výroba křemíkových desek v ČR

Výrobou křemíkových desek v ČR se zabývá taktéž společnost ONSEMI se sídlem v Rožnově pod Radhoštěm. Tyto vyrobené základní kruhové plátky z křemíkové slitiny dodává jako přímý dodavatel do jednotlivých dceřiných fabrik společnosti ONSEMI, jež jsou umístěny v Evropě, Asii či Spojených státech amerických. A současně i dalším zákazníkům v polovodičovém průmyslu dle požadavků zákazníka (Onsemi, © 1999 – 2023).

## 2 PROCESY VÝROBY KŘEMÍKOVÝCH DESEK

Jednotlivé metody výroby křemíkových desek jsou svou složitostí a náchylností k čistotě velice náročné na výrobu. Jednotlivé kroky přípravy křemíku, tak aby se daná křemíková deska mohla použít k výrobě integrovaného obvodu si uvedeme níže.

### 2.1 Výroba čistého křemíku

Základním zdrojem pro výrobu křemíkových desek, které se používají pro výrobu IO je křemenný písek oxid křemičitý ( $\text{SiO}_2$ ), což je základní zdroj pro polovodičový průmysl (Pánek et al., 2016, s. 7). Oxid křemičitý dominuje zpracování již několik desetiletí jako izolátor mezi polykřemíkem a víceúrovňovou kovovou vrstvou propojující finální pasivační vrstvu (Yoshio, Doering, 2017). Chemickou reakcí a za vysoké teploty se redukuje křemenný písek na křemík. Tímto procesem vzniká tzv. hutní křemík, který však stále není dostatečně čistý pro výrobu polovodičů. Dalším krokem je přeměněna na trichlorsilan ( $\text{SiHCl}_3$ ), který se následnou destilací a redukcí vodíkem přemění na vysoce čistý křemík. Vznikne sice čistý křemík, avšak ve formě polykrystalu. Vhodný křemík je pro výrobu až tehdy, když je uspořádán do krystalových mřížek (Pánek et al., 2016, s. 7).

### 2.2 Výroba monokrystalu křemíků

Krystalovou mřížku křemíku můžeme definovat jako diamantový vzor. Pokud přidáme příměs určitých chemických prvků, tzv. dopantů, můžeme výrazně zlepšit elektrickou vodivost křemíku. Nejpoužívanějšími prvky pro tyto příměsi jsou antimon (Sb), bór (B), fosfor (P) a arzén (As). U dopantu bóru vzniká materiál, kterým se získává vodivost typu P. Antimon, fosfor a arzén, kterým dopujeme křemík je nazýván materiál s vodivosti typu N, kde se náboj přenáší pomocí elektronů. U bóru přenášíme vodivost pomocí tzv. děr. Jednotlivé elektrické vlastnosti změním pouze nepatrným přidáním dopantů, kterou lze nazvat jako počet atomů dopantů na jednotkové množství křemíku, většinou uváděn v  $\text{cm}^3$  (Pánek et al., 2016, s. 7).

### 2.3 Metody výroby křemíkových desek

Způsob procesu výroby křemíkové desky je velice složitý mechanismus, který na sebe během výroby úzce navazuje. Jednotlivé nejznámější procedury si můžeme probrat níže.

### 2.3.1 Czochralského metoda

Základní a nejpoužívanější metoda pro růst monokrystalu křemíku na monokrystalickém zárodku se nazývá Czochralského a to za pomoci zkrystalované taveniny tažení ze zárodku z monokrystalu a to v zařízení, jež se nazývá tažička. Tímto procesem se přemění výchozí materiál v monokrystal křemíku. Takto ponořený zárodek v tavenině je současně otáčen a postupně vytahován z tažičky. Rychlost vytahování je na počátku nižší, tak aby se zabránilo defektům ze zárodku, a poté se postupně zvětšuje. Tím se začne vytvářet válcovitý tvar monokrystalického materiálu. Celý proces je ukončen opětovným zrychlením tažení a tím vzniká na konci kuželovitý tvar konce. Jednotlivé důležité parametry, které musí být splněny a zkontrolovány jsou rychlost tažení, teplota či rychlost otáčení výrobku (Pánek et al., 2016, s. 8).

### 2.3.2 Řezání křemíkového monokrystalu

První operací, která se používá na výrobu monokrystal křemíku je řezání. Při tomto procesu se krystal rozřezává na jednotlivé tenké desky a to za pomoci pily s diamantovým borem anebo na tzv. drátových řezačkách. Pro řezání pilou je vytažený ingot přidělán ke grafitové podložce a desky jsou poslopně odřezávány. Při řezání drátem je ingot odřezáván drátovou osnovou s brusnými zrny a postupně unášen pohybem po řezu. Důležité je při řezání dodržet co možná nejrovnější řez, poněvadž dochází k porušení povrchu desky a vzniku malinkých defektů v důsledku dotyku mezi brusným zrnem a materiálem (Pánek et al., 2016, s. 10).

### 2.3.3 Broušení křemíkových desek

Po procesu řezání na jednotlivé plátky jsou hrany všech desek ostré, což může mít poté velký vliv na lámavost desek a případnou zmetkovitost. Proto se hrany obroušují a tím se eliminuje zmetkovitost během dalších zpracování. Deska je při broušení připevněna na vakuový stůl a pomalu otáčena proti rychle rotujícímu diamantovému kotouči na ostrou hranu křemíkové desky. Hrana desky kopíruje profil brusného kotouče (Pánek et al., 2016, s. 10).

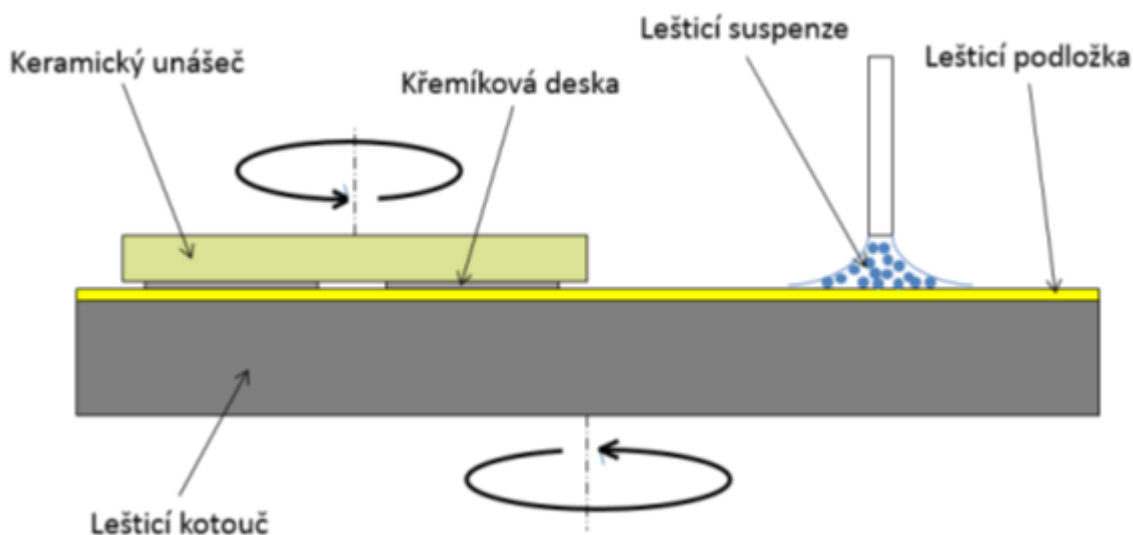
### 2.3.4 Lapování

Proces lapování křemíkových desek můžeme nazvat také jako oboustranné broušení plochy desek, tak aby povrch desek byl co nejvíce hladký, planparalelní (tzv. omezený dvěma rovnoběžnými rovinami) a samozřejmě rovný. Proces lapování je prováděn za pomoci suspenze korundu ( $Al_2O_3$ ) a účinného čisticího prostředku (detergent). Díky tomu se

odstraňuje narušená plocha, která vznikla během procesu řezání. Desky se při tomto procesu umísťují na unašeč, jež má tenčí rozměr než deska a tím je umožněno lapovat desku z obou stran. Současně je během této operace mezi otáčející kotouče přidána brusná suspenze (částice korundu smíchaná ve vodě s detergentem). I přes to, že se během lapování povrch desky zarovná, zůstává stále nerovný. Můžeme tedy stále pozorovat malou, nerovnou a stejnoměrnou vrstvu po lapování. (Pánek et al., 2016, s. 11). K odstranění této vrstvy nám slouží následující krok leštění níže v textu.

### 2.3.5 Leštění křemíkových desek

Posledním krokem výroby křemíkové desky, která se poté může dále použít k výrobě čipů je chemicko mechanický proces leštění. Cílem je tedy vytvořit co nejhladší a nejkvalitnější povrch desky bez dalších defektů. Leštění probíhá na jedné straně desky a to uchycením za pomoci vosku na keramický unašeč (Obrázek 1). Proces probíhá za otáčení a tlaku na leštící podložku a současně za smáčení leštící směsí z oxidu křemičitého v zásaditém prostředí. Leštění probíhá opakovaně na některých leštících pracovištích, které se však liší svým pH prostředím a typu leštící směsí. Je to z důvodu úběru materiálu, kde na začátku procesu se snažíme o větší úběr materiálu, tak aby se dosáhlo co nejrovnějšího povrchu a ke konci již pouze takový úbytek materiálu, aby se dosáhlo naprosto lesklého povrchu desky (Pánek et al., 2016, s. 12).



Obrázek 1 Proces leštění křemíkových desek (Pánek, 2016)

I přesto, že deska je oproti svému původnímu vzhledu již rovná a skleněně lesklá, stále zůstávají viditelné částice a organické zbytky na povrchu, které se musí odstranit. Je proto nutné za pomoci chemického čištění v roztocích se těchto nečistot zbavit. Odstraňování



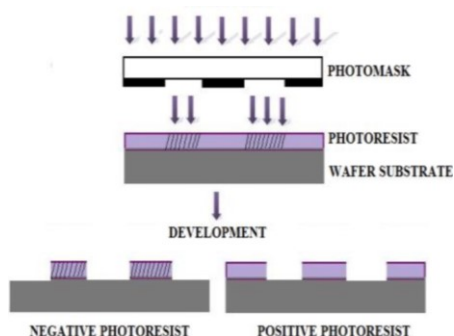
probíhá v několika krocích. Jako první se používá horká směs kyseliny sírové ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) a peroxidu vodíku ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) pro odstranění organických látek z povrchu. Pro vzniklý oxid na povrchu desky se používá zředěná kyselina fluorovodíková (HF). Na eliminaci částic na desce se využívá kombinace amoniaku ( $\text{NH}_3$ ) a peroxidu vodíku s vodou. Díky podleptání částic z povrchu se vylučuje přitažlivost mezi částicemi a povrchem desky. Díky tomu, že peroxid vodíku se chová jako oxidující látka a vytváří na povrchu čistou tenkou vrstvu oxidu, povrch desky je poté hydrofilní a eliminuje zpětnému usazování nečistot na povrchu desky (Pánek et al., 2016, s. 12).

### 3 PROCESY VÝROBY ČIPŮ

Procesem výroby čipů stejně tak jako výrobou křemíkových desek se v České Republice věnuje společnost ONSEMI, jež má jednotlivé části výroby umístěné v těsné blízkosti v areálu bývalého podniku Tesla v Rožnově pod Radhoštěm. Nelze se podrobně věnovat každému procesu výroby, ale níže v podkapitolách se dozvíme o klíčových a kritických procesech během vzniku nových čipů na křemíkové desce.

#### 3.1 Fotolitografie

Proces fotolitografie (Obrázek 2) si můžeme představit jako přenos motivu z vytvořené masky daného čipu na křemíkovou desku. Jako maskovací materiál se nejčastěji používá oxid křemičitý a vrstva fotorezistu (materiál citlivý na světlo). Oxid křemičitý ( $\text{SiO}_2$ ) se nanáší jako homogenní vrstva. Druhou vrstvu nanášíme zmíněný fotorezist a za pomoci masky je poté exponován a vyvolán na desku. Podle zvolené polaroty pro fotorezist dochází k odstranění fotorezistu z dané oblasti, které byly (pozitivní rezist) nebo nebyly (negativní rezist) osvětleny. Vrstva fotorezistu s exponovaným obrazcem je pak využita jako kontaktní maska při následném leptání vlastního maskovacího oxidu (Pánek et al., s. 229). Příprava povrchu probíhá tak, že se musí z povrchu desky odstranit veškerá vlhkost, což probíhá většinou za teploty  $150\text{ }^\circ\text{C}$  v délce 10 minut. Desky musí být zároveň chemicky ošetřeny, tak aby nedocházelo ke kontaminaci a byla zajištěna dokonalá adheze fotorezistu s deskou. Nejčastěji se pro tento krok používá HDMS (hexamethyldisilazan). Při chemické reakci oxidu křemičitého a HDMS vznikne vysoce vodoodpudivá vrstva na povrchu desky. Deska je pokryta fotorezistem rotací na chucku (základně) za 3000 až 6000 otáček za minutu většinou po dobu 1 minuty. Viskózní vrstva fotorezistu se otáčivým pohybem chucku odstředí a vzniká stejnoměrná a silná vrstva (Asu, © 2022).

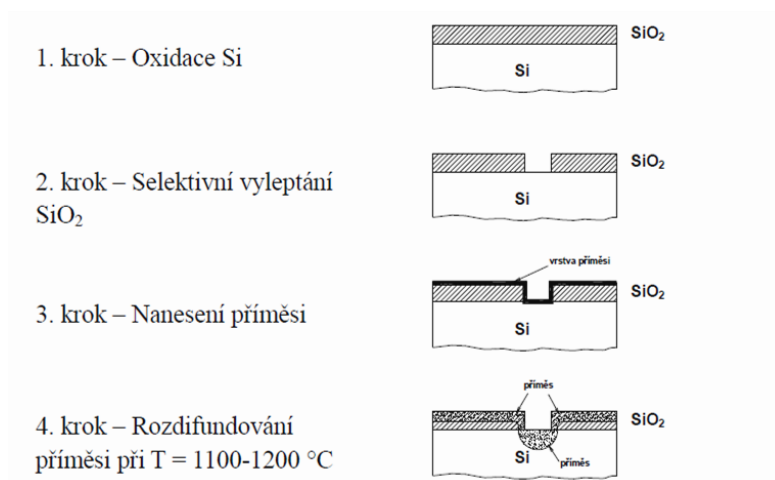


Obrázek 2 Proces fotolitografie (ResearchGate © 2008 – 2023)

### 3.2 Difúze

Dalším významným krokem při výrobě integrovaných obvodů je proces difúze. Při této vysokoteplotní operaci je cílem dostat na vybraná místa křemíkové desky (po fotolitografickém maskování a následném leptání fotorezistu) elektricky aktivní příměsi jako bór (B), fosfor (P), arzén (As) anebo antimon (Sb) do určité a přesně určené hloubky při profilu koncentrace příměsi těchto chemických prvků. Pevné příměsi uvedené výše je potřeba dostat shora do křemíkových desek. Je to z důvodu prakticky nulové difúze křemíku a zmíněných příměsí při pokojové teplotě. Teplota difúze pro výše zmíněné prvky se pohybuje od teplot v rozmezí od 950 °C do cca 1250 °C. Tzn. že křemík je díky nanesené fotolitografické masce na určitých místech obnažen a jinde zase zakryt maskou proti difúzi a nedovolí při těchto vysokoteplotních operacích vstoupit do křemíku. Maskami jsou dva materiály uvedené níže (ONSEMI, © 1999 – 2021).

- Vrstva oxidu křemičitého  $\text{SiO}_2$
- Vrstva nitridu křemíku –  $\text{Si}_3\text{N}_4$



Obrázek 3 Procesní kroky pro difúzi příměsí (Pánek, 2016)

Maska pro difundování se vytváří za pomoci fotolitografického procesu. Po vyleptání požadovaných míst vytvořené maskou následně může proběhnout termická difúze. Rychlost difundace je poté v příměsích 10 až 1000 nižší než v samotném křemíku (Pánek et al., s. 214). Samotný proces probíhá na horizontálních či vertikálních pecích ve várkách, které mohou obsahovat i přes 200 křemíkových desek. Desky jsou vystaveny v pecích plynné atmosféře s teplotou, jež se blíží samotnému tavení (teplota tavení křemíku je při teplotě 1415°C) a to po dobu, dokud dotující plyn nepronikne do požadované hloubky. Zpravidla se jedná o hloubku 1 až 15  $\mu\text{m}$  (mikronu). Difundující atomy si v krystalické struktuře křemíku

hledají místo s nejlepšími energetickými podmínkami. Při difúzi se realizuje větší počet tzv. PN přechodů, na rozdíl od iontové implantace, která bombarduje vždy pouze jeden (ADOC.PUB, © 2023). Iontová implantace má však své jiné přednosti, které uvedu v následující kapitole.

### 3.3 Iontová implantace

Iontová implantace je všestranná technika široce implementovaná v různých oblastech vědy a technologií. Tato metoda je velice spolehlivá díky své přesné kontrole složení dopantu a hloubky pronikání prostřednictvím energií iontů. Jedná se obvykle o vysoce energetický proces za pomoci dopingových atomů do polovodičové destičky za účelem vytvoření integrovaných obvodů (Ahmad, 2017, s. 5). Jedná se tedy o bombardování materiálu ionty s vysokou energií po určitou dobu (Zeman, 2018).

Iontová implantace je velmi přesný a opakovatelný proces dopování příměsí ve formě prvků v nízké hloubce Si desek. Je to proces, při kterém jsou elektricky nabitě atomy příměsí (B<sup>+</sup>, P<sup>+</sup>, As<sup>+</sup>, Sb<sup>+</sup>) vstřelovány do křemíkové desky. Energie uvedených kladných iontů příměsí jsou velmi vysoké, typicky v rozsahu 20 – 180 keV (kiloelektronvolt). 1 eV (elektronvolt) je energie, kterou získá elektron při průchodu spádem napětí 1 voltu (V). Při spádu napětí v zařízení iontové implantace 100 kV (kilovolt) bude energie elektronu 100 keV. Při této energii má elektron rychlost 187000 km/s. Při napěťovém spádu 3 MV (Megavolt) se rychlost elektronu těsně přibližuje rychlosti světla ve vakuu, tj. 300000 km/s (Pánek et al., 2016, s. 219). V tabulce 1 můžeme vidět hloubku vniku iontů nejčastěji používaných dopantů do Si a SiO<sub>2</sub> při energii 100 keV.

Prvek	Průnik do Si (um)	Průnik do SiO <sub>2</sub> (um)
P	0,3	0,3
B	0,13	0,10
As	0,06	0,05

Tabulka 1 Hodnoty vniku iontů v μm do Si a SiO<sub>2</sub> (Pánek, 2016)

### 3.4 Epitaxní proces

Epitaxní růst na křemíkovém substrátu je proces nanášení neboli depozice monokrystalických vrstev Si na monokrystalické Si desky při teplotě okolo 1200 °C. Epitaxní vrstvy Si se používají u všech IO. Na Si deskách se vytvářejí různé struktury IO, polovodičové prvky – tranzistory, diody i pasivní prvky – rezistory, kondenzátory aj.

Tloušťka epitaxních vrstev Si bývá v rozmezí 5 až 15  $\mu\text{m}$  (Drápala, Kursá, 2012, s. 247). Určité typy polovodičů mají nízký odpor na materiálu, a proto je nutné vytvořit ještě další vrstvy materiálu na substrátu. Nová vrstva má vyšší odpor a tato narůstající vrstva získá jiné elektrické vlastnosti než původní základní vrstva křemíkové desky. Epitaxní růst můžeme tedy definovat jako narůstání křemíku na povrchu křemíkové desky. Tato vrstva má stejné krystalografické vlastnosti jako substrátová křemíková podložka. Může se však lišit koncentrací dopantu anebo jiným dopantem. Samotný epitaxní proces probíhá za teploty okolo 1150  $^{\circ}\text{C}$  na tzv. epitaxních reaktorech a to za atmosférického nebo sníženého tlaku (Pánek et al., 2016, s. 14).

Jednotlivé druhy epitaxní technologie si můžeme prohlédnout níže v tabulce 2.

Technologie	Popis
Vapor phase epitaxy (VPE)	epitaxe z plynné fáze neboli plynná epitaxe
Metal organic vapor phase epitaxy (MOVPE)	epitaxe z organokovových sloučenin
Liquid phase epitaxy (LPE)	kapalná epitaxe (GaAs, GaP)
Solid state epitaxy (SSE)	epitaxe z pevné fáze
Laser epitaxy (LE)	laserová epitaxe

Tabulka 2 Druhy epitaxních technologií (Drápala, 2016)

### 3.4.1 Polovodiče, dopanty typu N a P

Polovodiče jsou látky, které se za určitých podmínek chovají jako izolanty, ale při změně těchto podmínek se mohou chovat spíše jako vodiče a elektrický proud jimi může procházet (Rosinová, Vránová, Kolářová, 2021). Polovodiče jsou látky, jejichž elektrické vlastnosti závisí především na vnějších podmínkách a to více než u vodičů. Tzv. měrný elektrický odpor polovodičů (vodivost látky) je větší než u kovů a menší než u izolantů. Vodivost polovodičů závisí zejména na jejich teplotě, osvětlení a druhu různých příměsí (Publi, © 2023).

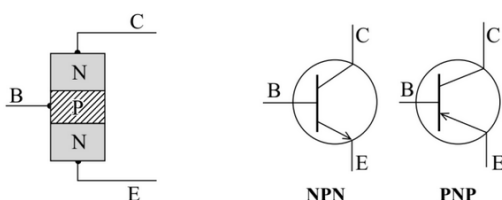
Polovodičová součástka je tvořena dvěma vývody ze dvou polovodičů. Jeden se nazývá typ P a druhý typ N. Fungování je poté zajištěno tzv. PN přechodem. V místě dotyku obou částí dochází k rekombinaci k difúzi obou děr z polovodičů typu N do typu P a současně elektronů z typu N do typu P. Na rozhraní poté vzniká elektrické pole vyvolané nepohyblivými příměsími, kladnými donory v oblasti N a zápornými akceptory v oblasti P. Donory a akceptory brání v pronikání dalších děr a elektronů v blízkosti PN přechodů. Tím vznikne tzv. hradlová vrstva (přechod), ve které již nejsou žádné volné nosiče nábojů. Proto má PN přechod velký elektrický odpor (SlidePlayer.cz, © 2023).

### 3.4.2 Dioda

Polovodičová dioda je součástka, která vede proud pouze jedním směrem a je tvořena polovodičem typu P a N spojeny dohromady tak, že tvoří přechod. K těmto polovodičům jsou připojeny vývody – u P je to anoda a u N je to katoda. Diodou prochází proud tedy pouze jedním směrem, od anody po katodu (Malý, 2017, s. 120).

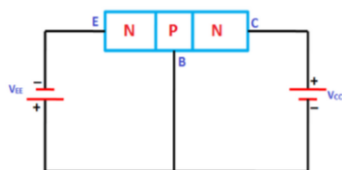
### 3.4.3 Tranzistory NPN a PNP

Tranzistor je polovodičová součástka obsahující tři elektrody, jež se nazývají báze, kolektor a emitor (Sedlák, Štoll, 2018, s. 453). Tranzistor obsahuje dva PN přechody. Jednotlivé tranzistory se můžou lišit dle typu, podle toho jaké polovodičové součástky obsahuje. Tranzistor typu NPN má dvě oblasti typu N a mezi nimi působící oblast typu P. U tranzistoru PNP je tomu přesně naopak. Rozdíl je poté i ve schématické značce (Chajda, 2018, s. 108).



Obrázek 4 Schéma NPN a PNP tranzistoru (Chajda, 2018)

Střední část se nazývá báze a PN přechody ji oddělují od oblastí s opačným typem vodivosti, které označujeme jako kolektor C a emitor E. Tranzistory se využívají především jako zesilovače a využívá přitom tzv. tranzistorového jevu, kde malé napětí vzbuzuje v oblasti báze malý proud  $I_B$ , který je příčinou mnohokrát větším proudem na kolektoru  $I_C$  v kolektorovém obvodu (Sixtová, 2021, s. 127).



Obrázek 5 Vstup a výstup u NPN tranzistoru (Lakshmana, 2022)

## 3.5 Plazmatické leptání

Plazmatické leptání je technologií, který se používá k leptání a k modelování složitých struktur různých materiálů od kovů přes polovodiče, oxidy až po polymery v oblastech, jako jsou mikroelektronika, bio - technologické fotoniky či mikrosenzory (Posseme, 2017, s. 24). U polovodičových technik se využívá k leptání kovových vrstev, dielektrických vrstev a

polovodiivých vrstev. Plazmatické leptání využívající ionizovaný plyn. Jedná se o reakci mezi pevnou látkou a disociovaným plynem, při které vznikají nestabilní produkty. Mezi důležité parametry u plaz. leptání je tzv. leptací rychlost (LR), která se udává v hodnotách nm (nanometrech) za minutu. LR vyjadřuje, jaká tloušťka vrstvy se odleptá za určitý čas. Z důvodu odlišného času odleptání vrstvy je důležitým parametrem selektivita. Selektivita vypovídá o nastavení procesu leptání požadovaného materiálu při minimálním vlivu na ostatní materiál v procesu (Pánek et al., 2016, s. 321).

$$LR = \frac{Tl_1 - Tl_2}{t}$$

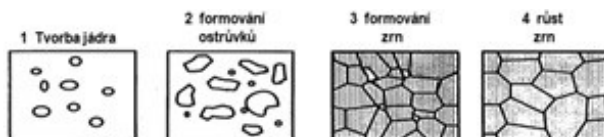
$Tl_1$ ...tloušťka před leptáním vrstvy                       $Tl_2$ ...tloušťka po leptání vrstvy                      t....čas leptání

Obrázek 6 Vzorec výpočtu leptací rychlosti u plaz. leptání (Pánek, 2016)

### 3.6 Depozice kovových vrstev – naprašování

Velice důležitou operací pro vytvoření IO je depozice kovových vrstev, někdy se zkráceně uvádí naprašování. Jedná se o metodu nanášení kovových vrstev či slitin kovových vrstev na křemíkovou desku. Tyto kovové vrstvy následně tvoří propojky mezi jednotlivými součástkami IO. Tyto propojky se nazývají tzv. metalizační síti. Mezi základní materiály vodivého propojení se používá hliník (Al), který bývá dopován mědí (Cu) a křemíkem. Dotování hliníku mědí a křemíkem je pro potlačení elektromigrace tvorby hliníkových špiček, které by vznikalo bez této dotace. Nejčatější kombinace směsi je AlSiCu, AlSi či AlCu, kde křemík i měď se přidává do hliníku pouze v nepatrných procentech (cca 0,5 – 1 %). Tento naprašovaný materiál dopadá na vyráběnou křemíkovou desku s maskami čipu na povrch a formuje se do zrn (Obrázek 7, strana 24). Mezi základní parametry depozice kovových vrstev, které ovlivňují formování zrn patří:

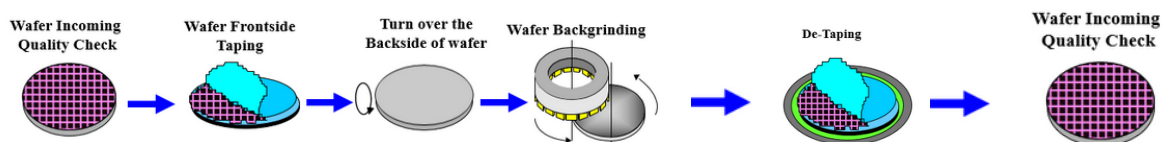
- Kvalita povrchu materiálu, na který se deponuje
- Základní (mezní) tlak – čistota prostředí
- Teplota depozice
- Depoziční rychlost
- Teploty následujících procesů (Pánek et al., 2016, s. 317).



Obrázek 7 Tvorba zrn během depozice (Pánek, 2016)

### 3.7 Broušení zadní strany desek

Proces výroby čipů je velice složitý, zdlouhavý a může se skládat z mnoha kroků k finálnímu vyrobenému čipu. Křemíková deska prochází mnoha sofistikovanými procesy a zařízeními během výroby a je namáhána teplotně, mechanicky či chemicky. Výrobní desky by proto při procesu neměly mít nižší tloušťku čipu, která se preferuje až pro závěrečné montování do plastových pouzder, které požaduje zákazník. Broušení zadní strany (BZS) křemíkové desky tedy probíhá až v závěrečných krocích výroby, většinou před testováním tzv. kritických parametrů čipu, které nám ověřují funkčnost vyrobených čipů. Nezbrošená deska se v procesu výroby pohybuje s optimální tloušťkou mezi 400 až 600 um (mikrony), což je vhodné pro eliminaci vzniku lomu desky. Desky, které se dostanou až na BZS se musí před samotným zákrokem broušení ošetřit. Na přední stranu desky se nalepuje velice jemná fólie zařízením pro nalepování fólie, která zakryje čipy, které by odpadávajícím brusivem či jinou nečistotou mohly být nenávratně poškozeny. Po nalepení fólie se deska vloží do brousícího zařízení s jemným brusným kotoučem ze zadní strany a postupně je snižována tloušťka na desce na požadovanou hodnotu. Vyráběné desky se pro potřeby zákazníka mohou brousit od hodnot 350 um až po 100 um a nižší. Po zbrošení poté může dojít k odstranění jemné fólie na odlepovače fólie a proměření vybraných vzorků desek z várky na digitálním měřáku tloušťky desek, tak ať je ověřena správnost požadovaného rozměru. Vizuálně se makroskopicky kontroluje, zda nejsou desky zbrošené s rýhy či škrábanci. Pokud jsou vybrané vzorky desek v pořádku, posílají se dále na závěrečnou část procesu výroby - testování hrotovým měřením. Proces broušení a přípravy křemíkových desek s čipy si můžeme lépe představit níže na obrázku 8 (ONSEMI, © 1999 – 2021).

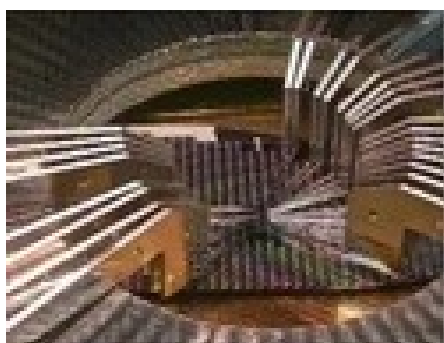


Obrázek 8 Procesní kroky broušení zadní strany (Pánek, 2016)

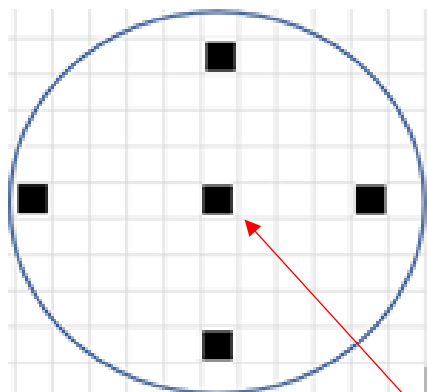


### 3.8 Testování čipu a PC struktur

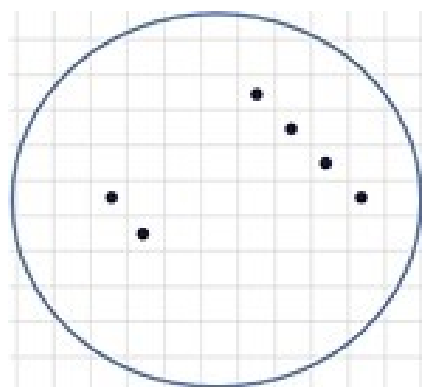
Z jednotlivých procesních úkonů výroby čipů jsou pro průběžnou kontrolu výrobního procesu získávány tzv. inprocesní parametry. Např. u epitaxního reaktoru se jedná o tloušťku či odpor epitaxní vrstvy, u broušení se jedná o správně zbroušenou desku na požadovanou tloušťku. Kromě inprocesních dat se ověřuje i celková funkčnost čipu tzv. PC testováním pomocí hrotové karty s malými jemnými jehličkovými hroty (Obrázek 9). Testuje se elektronicky na vyrobených deskách na speciálních 5 metalových strukturách (Obrázek 10, strana 26) k ověření tzv. kritických parametrů čipů. Tyto parametry musí vykazovat hodnoty v určitých limitech. Hodnoty dat kritických parametrů se získávají měřením na pohyblivém stolku se základnou pro položení desky, která je testována malinkatými jehličkami osazenými na hrotové kartě (Obrázek 9) a propojena počítačovým zařízením pro sběr dat. Měřeními těmito kartami se sbírají hodnoty pro daný vyráběný čip a posléze se vyhodnotí na počítači v programech určené pro zpracování a analýzu dat. Pokud naměřené hodnoty nejsou v limitech, je potřeba zjistit, kde se mohl daný parametr vychýlit od trendu. Desky, které se parametricky nevezou do limitů, musí být vyřazeny a nesmí pokračovat dále v procesu výroby. Pokud projde deska PC měřením, tak může pokračovat dále na tzv. UP (Unit probe) testování. Zde se už deska s čipy testuje celá a ověřuje se už celková funkce obvodu (klíčové vlastnosti integrovaných obvodů). Jednotlivé čipy musí projít zátěžovými testy při určitých napětích, proudech či odporech a tím se definitivně ukáže správnost celého výrobního procesu. Pokud nějaký čip neprojde zátěžovými testy, jsou tyto tzv. vadné čipy zakapány inkoustem (Obrázek 11, strana 26) a tím se zamezí jejich použití pro zákazníka (ONSEMI, © 1999 – 2021).



Obrázek 9 UP testování hrotovou kartou (COPYRIGHTSEMIPROBE2022 © 2022)



Obrázek 10 Speciální rozmístění metal. struktur pro PC testování (Vlastní zpracování)



Obrázek 11 Ilustrativní náčrt zakapání vadných čipů inkoustem (Vlastní zpracování)

## 4 INFORMAČNÍ SYSTÉMY PRO ZOBRAZENÍ PROCESU

Informační systémy se používají pro sběr, udržování, zpracování a poskytování informací dat. Tyto systémy mohou být automatizované za pomoci počítačů, ale mohou být stále i v papírové podobě (Beránek, 2013, s. 287). Podnikové informační systémy vnímáme jako otevřený systém, jehož vstupem a výstupem jsou informace (Gála et al., 2015, s. 20). Každá společnost využívá různé softwarové či hardwarové informační systémy dle svého předmětu podnikání.

### 4.1 Procesy

Pro řízení rutinních změn v podniku jsou v podnicích zaváděny procesy a postupy sloužící běžně se opakujících prací např. na výrobních linkách podniku. Jedná se o aktivity procesního charakteru. Jednotlivá procesní aktivita vyjadřuje stabilitu ve společnosti. Umožňuje stabilně, opakovatelně dosahovat výkonu (výstupu) definovaným způsobem, který je současně měřen a optimalizován (Jurová, 2016, s. 67).

### 4.2 Informační technologie a systémy

Informační a komunikační technologie i informační systémy jsou v podnicích přítomny již řadu let. V podnicích se mnohém rychleji mění samotné technologie, naproti tomu informační systémy tak rychlým tempem nepodléhají. Informační systémy závisí na pěti komponentech – účel, lidé, procedury, informace a informační technologie, což jenom utvrzuje, že informační systémy vyžadují podstatnější zásah než technologie samotné. Takovéto chápání informačních systému je velice široké, a jehož jen malou součástí jsou inf. systémy v podobě softwarových programů a hardwaru (Klapalová, 2016, s. 85).

Mezi nejznámější typy informačních systému můžeme uvést následující v tabulce 3.

Informační systémy	Popis inf. systému
<b>ERP (Enterprise Resource Planning)</b>	Plánování podnikových zdrojů
<b>CRM (Customer Relationship Management)</b>	Systém pro řízení vztahů se zákazníky
<b>BPM (Business Process Management)</b>	Systém pro popis a analýzu procesů
<b>MES (Manufacturing Execution system)</b>	Systémy pro podporu operativního řízení výroby

Tabulka 3 Typy informačních systému (Chlebovský, 2017)

### 4.3 MES systém

MES (Manufacturing Execution system) můžeme definovat jako systém pro podporu operativního řízení výroby. Může se jednat o podporu jednotlivých výrobních zařízení, monitoring a sběr dat z výroby (Chlebovský, 2017, s. 81). Společnost ONSEMI používá několik desítek MES systému pro efektivní řízení výroby a kvality. Jednotlivé klíčové interní či externí systémy MES si uvedeme níže.

#### 4.3.1 Dispector

Dispector (název je pozměněn) je interní informační systém společnosti ONSEMI, který se používá pro kontrolu procesu a sběr dat. Tento MES systém může využívat výroba, technologové, průmysloví inženýři či oddělení kvality v podniku. Tento systém dokáže nalistovat vyrobenou sadu (sada obsahuje 25 křemíkových desek s čipy) s přiřazeným unikátním číslem výrobku, která je v danou chvíli v tzv. WIP (work in progress), neboli rozpracované výroby v lince a zobrazit, kterými kroky již byl zpracován vyráběný čip a jaké budou dále následovat (Obrázek 12). K jednotlivým výrobním procesům eviduje měřené inprocesní a kritické parametry či hodnoty, které se poté mohou použít pro kontrolu. Zároveň na konci procesu sbírá data při testování výše zmíněných PC struktur či UP testování jednotlivých čipů. Dispector slouží jako rychlý systém pro náhled a ověření správnosti výrobního procesu (ONSEMI, © 1999 – 2021).

Číslo sady	Procesní kroky	Zadej krit. hodnoty pro proces	Číslo zařízení pro výrobní proces
RTXXX	...	...	...
	5.FOTOLITOGRAFIE	XXX	XXX
	6.KONTROLA PO FOTOLIT.	ANO	XXX
	...		
	10.DIFÚZE	XXX	XXX
	11.LAKOVÁNÍ PŘED FOT. PROCESEM	ANO	XXX

Obrázek 12 Ilustrativní náčrt Dispectoru pro výrobní proces (Vlastní zpracování)

#### 4.3.2 Databázová aplikace incidentů - Korekt

Dalším interním systémem, který využívá společnost ONSEMI je databázová aplikace pro zapsání či zobrazení incidentů na vyráběných křemíkových deskách s čipy – Korekt (název je pozměněn). V Korektu se evidují všechny incidenty, které nastanou při výrobě čipů. Pokud nastane problém při kontrole např. meziprocesních dat, které jsou mimo toleranci, tak se daná výrobní sada automaticky pozastaví a nemůže dále pokračovat. Daný problém si přebírá a vyhodnotí technolog či mistr výrobní linky. Incident se po pozastavení musí navést

(zapsat) operátorem či mistrem do databáze Korektu, kde se popíše, o jaký problém se jedná, na jakém pracovišti nastal, o jakou sadu a kolik výrobních desek z várky bylo postiženo, datum incidentu a na jakém stroji byla zpracována sada. Všechny tyto údaje Korekt eviduje a tím se poté lépe identifikuje problém a jeho řešení pro technologa daného pracoviště či technologa měření, který již odpovídá za celkovou správnost celého procesu dané technologie. Pokud je možno vyráběné desky opravit na daném pracovišti či jinde dle postupu, mohou být po opravě poslány dále k dalšímu zpracování. Všechny tyto informace musí být však v databázi doplněny (ONSEMI, © 1999 – 2021).

Obrázek 13 Pracovní prostředí Korektu (ONSEMI, © 1999 – 2021)

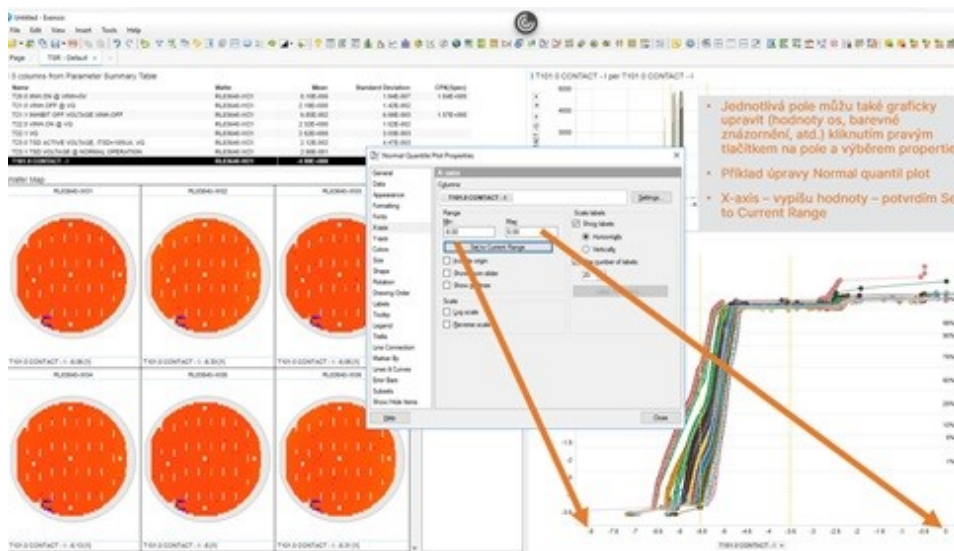
### 4.3.3 Tool XX

Tool XX (název je pozměněn) je informační systém, jež slouží především pro technologa UP měření, jež zodpovídá za celkové ověření výroby dané technologie čipů. Systém eviduje čísla výrobních desek a naměřené hodnoty z PC testů a UP testování. Každou desku, která projde hrotovým měřením si můžeme zobrazit vizuálně na monitoru u tohoto systému. Důležité informace jsou především z důvodu měřených a vypadlých testů, tzv. výtěžnosti čipů (poměr dobrých čipů na desce k celkovému počtu čipů na desce) či jaké testovací zařízení desku měřilo. V tool XX lze chronologicky či dle požadavku srovnat více desek s kritickými parametry z PC testování. Každá vizuální vada či škrábanec se nesprávným zacházením objeví také vizuálně na monitoru po změření a lze tak zpětně dohledávat, kde mohlo dojít k incidentu. Pokud je deska celá vypadlá v kritických testech, znamená to, že

daný proces výroby neproběhl v pořádku a musí se daný problém nahlásit do výrobní linky (ONSEMI, © 1999 – 2021).

#### 4.3.4 Exensio

Platforma Exensio byla vytvořena pro potřeby polovodičového průmyslu. Prostředí Exensia spravuje velké množství dat, které se musí ukládat na serverech společnosti a je potřeba soubory zpracovat pro výstup a potřeby společnosti či zákazníku (PDF Solutions © 2023). Výstupem zpracovaných a upravených dat mohou být poté grafické či statistické údaje. V grafech lze nasimulovat jednotlivé měřené testy a analyzovat si tak výpadky měření, jež nastaly. Na deskách si poté za pomoci distribučních grafů můžeme zobrazovat po desce hodnoty, jež byly změřeny mimo limity daných testů. Lze tak velmi rychle najít kořenovou příčinu problému díky integraci dat (ONSEMI, © 1999 – 2021).

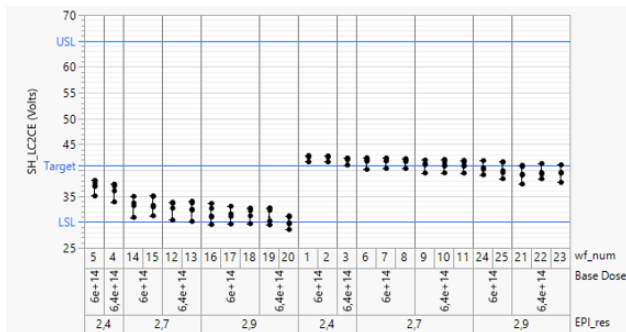


Obrázek 14 Prostředí Exensia (ONSEMI, © 1999 – 2021)

#### 4.3.5 Jump

Jump (JMP) je statistický software, který není přímo spojen s datovým uložištěm. Tento program lze použít převážně pro všechny možné statistické metody. Vše je technicky i graficky přehledné na vysoké úrovni. Grafy jsou při výstupu interaktivní a propojené. Souborům se musí u vstupních dat dodat limity parametrů, jež se sledují. Umožňuje plnou manipulaci s daty, libovolné spojování či dělení datových souborů a jejich individuální zpracování. Největší výhoda je především při hodnocení rozdělených výrobních desek z várek či pro experimenty ve výrobě, ale i současně pro vyhodnocování rozsáhlých datových souborů. Má výborný skriptovací jazyk JSL (Jump Scripting Language) a každá platforma podporuje skriptování tím, že sama generuje skripty. Stažená surová data lze

upravit tak, že lze dělit desky dle procesu výroby, strojů, na kterých se zpracovaly či dle výtěžností čipů. Na x a y osách lze nastavit horní či dolní meze a požadovaný target (cíl) pro ladění procesu (ONSEMI, © 1999 – 2021).



Obrázek 15 JMP výstup dat (ONSEMI, © 1999 – 2021)

## 5 PROJEKTOVÉ ŘÍZENÍ

V následující kapitole si blíže seznámíme s definicemi a členěním projektového řízení a jeho charakterizaci.

### 5.1 Definování projektu

Projekt je jedinečný sled aktivit a úkolů, který má svůj specifický cíl, jenž má být jeho realizací splněn. Je definován datem začátku a konce projektu a stanovením zdrojů potřebných pro čerpání při jeho realizaci. Projekt je tedy dočasné úsilí vynaložené k unikátnímu produktu, službě nebo určitého výsledku. Dočasnost a unikátnost projektu je důvod, proč projekt považujeme za jedinečný a ve své podstatě za neopakovatelný (Svozilová, 2016, s. 20)

### 5.2 Charakterizace projektu

Při tvorbě projektu je dobré si vytvořit tzv. kategorizaci projektů. Členit je můžeme dle různých skupin. Jednotlivé skupiny poté mohou vykazovat dle dělení určitou homogenitu a jsou tak lépe srovnatelné. Jako určitý obecný základ kategorizace projektů může sloužit členění projektů do následujících skupin.

- Rozvojové projekty strategického charakteru – zpravidla orientované na expanzi. A ty lze ještě členit na tři podskupiny, a to projekty na rozšíření výrobní kapacity, výzkum a vývoj a nové technologie.
- Obnovovací projekty – jedná se o modernizaci výrobního zařízení, jež je vynucena jeho opotřebením, resp. koncem fyzické životnosti.
- Racionalizační projekty – projekty orientované na úspory nákladů.
- Mandatorní projekty – zaměřené na ochranu životního prostředí, zvýšení bezpečnosti práce aj. (Fotr, Souček, 2015, s. 26).

### 5.3 Harmonogram projektu

Pomocí harmonogramu můžeme popsat a definovat úkoly, které by měly během projektu probíhat a kdo by je měl vykonávat. Je tedy potřeba definovat i lidské zdroje u projektu, včetně vlastníka jako hlavního manažera projektu a jeho podřízené, které můžeme nazvat jako řešitelé. Projekt by měl v čase směřovat k cíli, proto je dobré sledovat, zda se daný cíl



plní. Bez projektového harmonogramu nelze v podstatě hovořit o hospodaření s lidskými či jinými zdroji (Doležal, Krátký, Cingl, 2013, s. 111).

#### 5.4 Formulace cílu projektu – METODA SMART

Při formulování dílčích cílů projektu je možné aplikovat SMART metodu (Tabulka 4). SMART představuje souhrn pravidel, která pomáhají v rámci projektového managementu definovat rámec či cíl projektu navrhovaného projektu (Šafrová, Drážilová, 2019, s. 11).

S	SPECIFIC	Cíle mají být specifické a konkrétní.
M	MEASURABLE	Měli by mít měřitelné hodnoty, tak aby se dalo rozpoznat, zda bylo dosaženo cíle.
A	ASSIGNABLE	Cíle mají být přidělitelné jedinému subjektu s odpovědností a autoritou k výkonu rozhodnutí.
R	REALISTIC	Cíle mají být dosažitelné s použitím disponibilních zdrojů a realistické.
T	TIME - BOUND	Cíl by měl být časově vymezený.

Tabulka 4 Smart metoda (Šafrová Drážilová, 2019)

#### 5.5 Analýza rizika projektu

Moderní projektové řízení interpretuje pojem riziko jako nejistou negativní událost, neboli ohrožení. Všechna rizika, která se rozhodneme v projektovém řízení podstoupit, by měla mít i svou opačnou stranu – nějakou příležitost nebo odměnu, která nám zdůvodní podstoupené riziko. Absolvování rizika, které projektu nic nepřináší v projektovém řízení nemá co dělat (Doležal, 2016, s. 199). Proces řízení rizik a příležitostí se vyskytuje ve všech fázích projektu. Pro hodnocení rizika projektu se používají dva druhy metod – kvantitativní (používají číselnou hodnotu) a kvalitativní pomocí slovních hodnot (Máchal, Kopečková, Presová, 2015, s. 42 - 43). Jako jeden z nástrojů pro hodnocení rizika se používá matice hodnocení rizik. Jedná se o expertní posuzování významnosti rizik na základě dvou aspektů. Prvním je pravděpodobnost výskytu rizik a druhým intenzita jeho negativního dopadu (Fotr et al., 2017, s. 280). Mezi další doporučené metody analýzy rizik patří metoda RIPRAN (Risk Project Analysis). Tato metoda se skládá se 4 základních kroků – identifikace nebezpečí projektu, kvantifikace rizik projektu, reakce na rizika projektu a celkové

posouzení rizik projektu. Identifikace nebezpečí rizik provádí projektový tým nejlépe pomocí tabulkové formy (Máchal, Kopečková, Presová, 2015, s. 43).

## 6 STATISTICKÉ ŘÍZENÍ PROCESU

Statistické řízení procesu se v průmyslových oblastech využívá poměrně často. Sledováním malých vzorků odebíraných v průběhu procesu lze předcházet problémům s kvalitou. Běžným standardem se stalo hodnotit způsobilost či výkonnost procesu za pomoci různých ukazatelů. Hodnocení způsobilosti procesu souvisí především se statistickou regulací procesu a díky tomu se objevovali i nové způsoby výpočtů ukazatelů, resp. výkonnosti (Jarošová, Noskiewičová, 2015, s. 12 - 13).

### 6.1 Základní statistické pojmy

Mezi nejčastější statistické pojmy, které se používají při statistickém řízení procesu si můžeme uvést.

- Aritmetický průměr – je charakteristika, kterou nejčastěji používáme při odhadu

$$\bar{x} = \frac{\sum x}{n}$$

střední hodnoty. Označujeme písmenem  $x$ . Počítá se součtem všech hodnot k počtu všech sledovaných jevů (Hendl, 2022, s. 321).

- Rozptyl ( $s^2$ ) – rozptyl  $s^2$  nejužívanější míra variability, která informuje jak jsou rozptýleny odchylky kolem aritmetického průměru (Rabušic, Soukup, Mareš, 2019, s. 107).

- Směrodatná odchylka – můžeme definovat jako odmocninu z rozptylu. Narozdíl od

$$s = \sqrt{s^2}$$

rozptylu je vyjádřena ve stejných jednotkách jako sledovaný znak (Sedlašík, Neubauer, Kříž, s. 51).

### 6.2 Statistické zobrazení dat

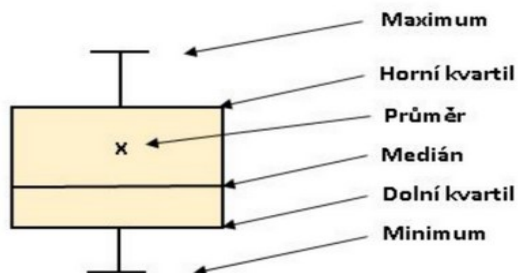
Pro statistické zobrazení dat se používají různé typy grafů podle potřeby k hodnocení statistického procesu. Mezi základní typy grafů si můžeme uvést:

- Sloupcový graf – svislá osa  $y$  je číselná a vodorovná osa  $x$  kategorizovaná a hodnoty jsou zobrazeny pomocí sloupců.
- Spojnicový graf – svislá osa  $y$  je číselná a vodorovná osa kategorizovaná. Graf je v podstatě shodný se sloupcovým s tím rozdílem, že zobrazení

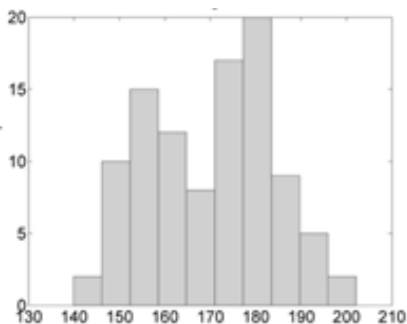
není pomocí sloupců, ale lomenými čáry.

- Koláčový graf – kruhový nebo také koláčový graf má pouze jednu číselnou osu, která není v pravouhlych souřadnicích, ale v polárních. Hodnoty jsou vynášeny na osu pomocí výsečí v kruhu. Graf je vhodný především pokud je součet zobrazených dat 100%.
- Krabicový graf – také nazývaný jako box plot zobrazuje číselné rozložení proměnných pro každou pozici na ose x. Vhodný pro velké množství dat, jehož princip je v rozdělení hodnot na určitý stejný počet obsazených částí – kvartil. Kvartily dělí soubor na čtyři stejné části, z nichž každá představuje 25% podíl (Řehák, Brom, s. 235 – 242).
- Paretův graf – je to kombin. graf, jež propojuje sloupcový graf na hlavní ose y se spojnicovým na vedlejší ose x. Paretův graf je založen na pravidlu, že 80% problému v procesu může pouze 20% příčin. Patří mezi základní nástroje především v oblastech kvality (Pour et al, 2018, s. 71 – 73).
- Histogram – používá se k přehlednému grafickému zobrazení četností. Skládá se s osy x s intervaly a na osu y se vynáší četnost hodnot v daných intervalech (Janáček, 2022, s. 24).
- Q-Q plot – jsou speciálním analytickým prostředkem pro ověření statistické shody empirického a teoretického rozložení dat. Na vodorovné číselné jsou vynášeny empirické hodnoty a na svislé teoretické. Q-Q plot pracuje s kvantily (Brom, Řehák, 2015, s. 246).

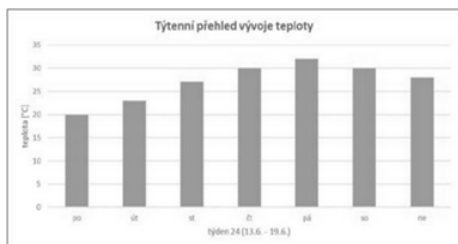
Některé typy grafů si můžeme zobrazit vizuálně na obrázcích 16 – 19 na straně 37.



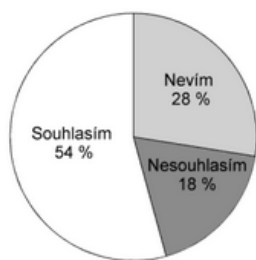
Obrázek 16 Krabicový graf (Laurenčík, 2016)



Obrázek 17 Histogramový graf (Neubauer, 2021)



Obrázek 18 Sloupcový graf (Barilla, 2016)



Obrázek 19 Koláčový graf (Sixtová, 2019)

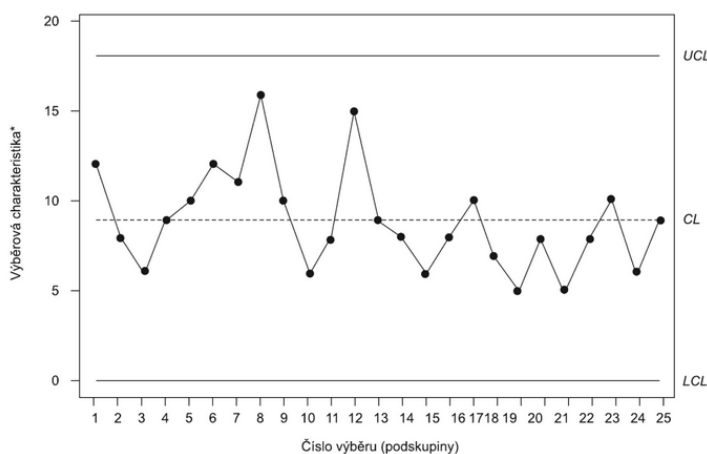
### 6.3 Statistická regulace procesu

Statistická regulace procesu, častěji používaná anglická zkratka SPC (Statistical Process Control) se používá v souvislosti analýzy způsobilosti procesu. Mezi klasický přístup SPC můžeme považovat opakující se výběr hodnot, které spočívá ve zjišťování, zda nový výběr odpovídá stejnému pravděpodobnostnímu modelu se známými či odhadnutými parametry. Zamítnutí této hypotézy znamená, že proběhla změna v procesu. Hlavním nástrojem SPC je

tzv. regulační diagram, což je vlastně grafickým znázorněním testu hypotézy o případném neznámém parametru uvažovaného modelu pravděpodobnostního rozdělení. Grafické znázornění SPC je potřebné především pro svou lepší názornost a srozumitelnost (Jarošová, Noskievičová, 2015, s. 17).

### 6.3.1 Základní charakteristika regulačního diagramu

Regulační diagram (obrázek 20) můžeme považovat jako základní nástroj SPC. Jedná se o grafický prostředek vývoje variability procesu v čase, které využívá testování statistických hypotéz. Zobrazuje testované statistiky pomocí funkce času. Na ose x se vynášejí pořadová čísla jednotlivých časových okamžiků realizovaných jednotlivých výběrů. Na ose y se pak vyskytuje stupnice pro zvolené hodnoty testované statistiky (např. výběrového průměru, směrodatné odchylky, počtu neshod,...). Mezi hlavní funkcí regulačního diagramu je poskytnout statistický signál, zda je či není proces statisticky zvládnutý. Mezi tři základní kritéria zvládnutí procesu můžeme uvést centrální přímkou (ang. CL), dolní regulační mez (ang. LCL) a horní regulační mez (ang. UCL). CL odpovídá tzv. referenční hodnotě použité znázorněné charakteristiky. Regulační meze UCL a LCL můžeme také nazvat akčními mezemi. Vymežující pásmo působení náhodných příčin jsou základním rozhodovacím měřítkem, zda zasahovat či nezasahovat do procesu (Jarošová, Noskievičová, 2015, s. 18).



Obrázek 20 Základní struktura regulačního diagramu (Jarošová, 2015)

## 6.4 Statistická metoda DOE

Statistická metoda DOE (design of experiment) je metodou pro identifikaci faktorů, které nám v procesu může ovlivňovat vlastnosti vyráběného produktu či procesu, jež je vykonáván či vyvíjen. Ve své podstatě jde o návrh různých experimentů či pokusů, které by nám poté měly dát potřebné informace, jež požadujeme. Cílem DOE je snižovat citlivost na produkt

z odchylek způsobené změnou prostředí nebo odlišnosti výroby (Doležal, 2023, s. 161.). Pokud je experiment vhodně navržen, umožňuje nám zjišťovat, jakým způsobem fungují v procesu kauzální vztahy mezi vstupy a výstupy procesu. Díky vhodnému experimentu pak můžeme lépe optimalizovat úroveň vstupů tak, aby byl podle předem daných kritérií optimalizován i výstup procesu. Je to jedna ze základních cest zlepšování procesů a současně zvyšování kvality ve výrobních organizacích. Jedna z kombinací při provádění experimentů je si zvolit libovolnou kombinaci hodnot potenciálních ovlivňujících faktorů a zjistit, zda v procesu výroby vede k výstupu, který je poté dostačující. Samotná kombinace faktorů a pokusů by však neměla trvat moc dlouho, tak ať se optimalizace procesu neprodrazí, poněvadž každý další pokus něco stojí organizace (Nenadál, 2018, s. 102 – 103).

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**



## 7 PŘEDSTAVENÍ VYBRANÉHO PODNIKU

Společnost ONSEMI nabízí ucelené portfolio polovodičových součástek a řešení, která mají široké využití v automobilovém průmyslu, komunikačních technologiích, počítačové technice, spotřební elektronice, průmyslové technice, LED osvětlení, lékařské elektronice, vojenství a letectví i v aplikacích pro napájení.

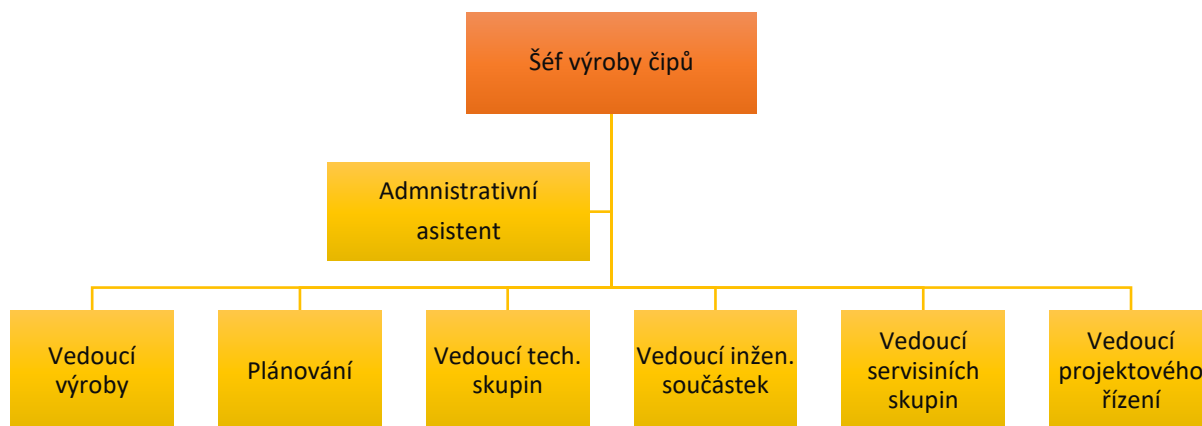
### 7.1 Základní charakteristika firmy

Společnost ONSEMI Česká Republika je součástí nadnárodní skupiny firem s více než 35 000 zaměstnanci. Tři společnosti jsou se sídlem v České republice (Rožnov pod Radhoštěm a Brno) a zaměstnávají přes 2 200 zaměstnanců a zabývají se návrhem integrovaných obvodů, výrobou křemíkových desek a výrobou polovodičových čipů. V posledních letech se v České republice podařilo zrealizovat řadu rozvojových projektů. Společnost je silným a stabilním zaměstnavatelem s nadstandardní nabídkou benefitů. Podnikání společnosti je postavené na inovacích, které přináší do současné elektroniky i do technologií budoucnosti (ONSEMI, © 1999 – 2021).

### 7.2 Organizační struktura

Organizační struktura je představena níže v jednotlivých odrážkách společně s odděleními, jež k nim patří. V diagramu na obrázku 21 na straně 42 se můžeme poté podívat na výrobní organizační strukturu společnosti ONSEMI.

- Výroba křemíku (výroba křemíkových desek z křemičitého substrátu)
- Výroba čipů (výroba čipů, výroba diskretních součástek)
- Výzkum a vývoj (Vývoj nových produktů a součástek)
- Služby (Logistika mezi budovy, Catering)
- EHS (Ochrana životního prostředí a bezpečnost)
- Úsek kvality (Technologie, Inženýrství součástek, Servis)
- Obchodní úsek
- Finanční úsek
- Personální úsek



Obrázek 21 Organizační struktura výroby čipů (Vlastní zpracování)

### 7.3 Historie společnosti ONSEMI ČR

Výrobní společnost ONSEMI Česká Republika vznikla v roce 2003 fúzí společností TESLA SEZAM (výroba čipů) a TEROSIL (výroba křemíkových desek). Uvedené organizace jsou nástupnické organizace bývalého státního podniku TESLA, jež navazuje na tradici polovodičové výroby. Společnost nyní zaměstnává přes 2200 zaměstnanců a jejich počet stále narůstá. Společnost každým rokem zdokonaluje a modernizuje své portfolio výrobku a tím se stává jedním z lídrů na trhu ve výrobě křemíkových desek i ve výrobě čipů (ONSEMI, © 1999 – 2021)

### 7.4 Produktové portfolio

Produktové portfolio ONSEMI se v posledních deseti letech (2013 - 2023) částečně změnilo. Z převažujících bipolárních technologií (klasický PN přechod), jež převažovaly v objemu výroby řadu let a byly svým designem a výrobou jednoduché na rychlou výrobu pro zákazníka se společnost v posledních letech začala více orientovat na výrobu diskrétních součástek typu diod s vysokými napěťovými verzemi. Tyto diskrétní součástky jsou náročnější na výrobu, vysokými požadavky zákazníku na vizuální defekty a funkční parametry, ale zároveň přinášejí společnosti vyšší příjmy z prodeje než výše zmíněné starší bipolární technologie. Tento trend by měl v následujících letech pokračovat. Jednotlivé technologie si můžeme prohlédnout v jednoduché tabulce 5 níže na straně 43.

Název technologie	Stručná charakteristika
<b>Standard linear</b>	Izolace mezi funkčními prvky vytvořeny pomocí PN přechodu. Jednoúrovňová, případně dvojúrovňová metalizace Čistě bipolární technologie Rozsah pracovních napětí: 12-50 V
<b>Soubor technologií typu TMOS</b>	Výkonové spínače. Středně složitý výrobní postup využívající některé velmi nákladné procesy/zařízení. Stále rostoucí poptávka u zákazníků,
<b>Metal gate</b>	Čistě unipolární technologie Typické produkty: číslicové integrované obvody (hradla, čítače apod.)
<b>Diskrétní součástky</b>	Diody

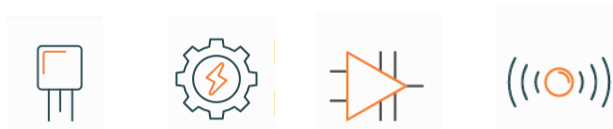
Tabulka 5 Produktové portfolio společnosti ONSEMI (ONSEMI, © 1999 – 2021)

## 7.5 Výrobky společnosti

Jednotlivé výrobky společnosti si můžeme blíže představit a charakterizovat níže v přehledu.

Výrobky si můžeme rozdělit do dvou kategorií dle technologií:

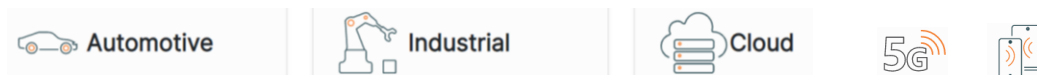
- Diskrétní a výkonové moduly, silové napájení, úprava a ovládání signálu, senzory, bezdrátové připojení (obrázek 22), ovládání motorů, logika a paměť.



Obrázek 22 Náčrty výrobků ONSEMI (Onsemi, © 1999 – 2023)

Dle řešení:

- Automotive výrobky, průmyslové výrobky, cloudové výrobky, 5G sítě, mobily (obrázek 23), internet of things.



Obrázek 23 Náčrty použití výrobků ONSEMI dle řešení (Onsemi, © 1999 – 2023)

## 8 POPIS VÝROBY ČIPŮ

Vzhledem k tomu, že je výroba čipů velmi složitý proces, bylo vhodné vysvětlit tuto problematiku velmi detailně v této kapitole. Výroba čipů je zdlouhavý proces výroby, kde je velice důležité dodržovat vybraná pravidla chování na pracovišti a pracovního postupu. Jakákoli nestandardnost se může projevit na celkovém výsledku, kde cílem je dodat zákazníkovi čipy v očekávané kvalitě a včas. Za jakých pracovních podmínek a sledu nejdůležitějších pracovních operací ve společnosti ONSEMI si můžeme probrat v následujícím textu.

### 8.1 Čisté prostory pro výrobu čipů

Výroba čipů ve společnosti ONSEMI probíhá v tzv. čistých prostorech, které si můžeme charakterizovat jako pracoviště, kde jsou přísně dodržovány hodnoty teploty, vlhkosti a prašnosti. V případě odchylky od požadovaných parametrů se musí výroba okamžitě zastavit a rozpracovanou výrobu přemístit do prostor, kde jsou limity všech parametrů v normálním stavu. Operátoři linky, technologové či servisní pracovníci se musejí pohybovat v těchto prostorech navíc ve speciálních neprašných oblecích (Obrázek 24), plastových rukavicích a s ochrannými brýlemi, tak aby nedošlo k dotyku vyráběných čipů s lidskou pokožkou či kontaminaci potem. I zde je toto nařízení přísně kontrolováno a dodržováno z důvodu potencionálního znehodnocení výroby.



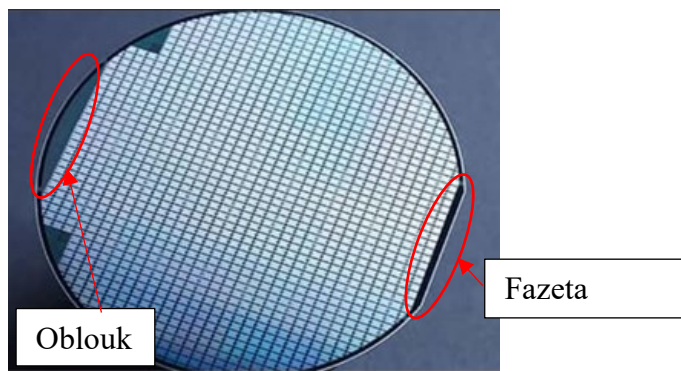
Obrázek 24 Ochranný oblek do čistých prostor (ONSEMI, © 1999 – 2021)



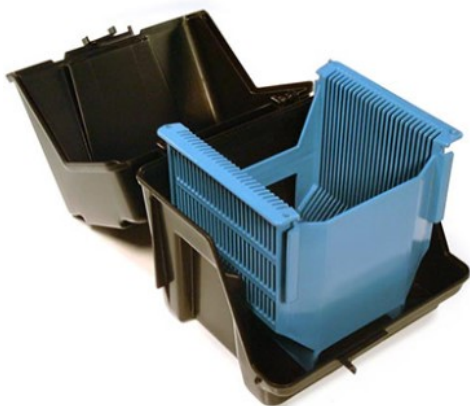
Obrázek 25 Ukázka čistých prostor (Vlastní zpracování)

## 8.2 Identifikace výrobní sady s deskami

Každý pracovník výroby čipů pracuje v čistých prostorech dle svého zaměření a zaučení. Ve výrobní lince ONSEMI se čipy vyrábějí na tzv. desky (obrázek 26, strana 46) o velikosti 150 mm (6 palcové) nebo 200 mm (8 palcové). Na jedné desce se může dle velikosti čipu vyrobit několik stovek, ale také desetitisíce čipů podle složitosti technologie. Čipy mohou mít velikost od několik desetin mm do cca 2 cm. Pracovníci tyto desky přenášejí v tzv. krabicích se zásobníky (obrázek 27, strana 46) mezi jednotlivá pracoviště. Zásobníky mají přesně 25 drážek pro 25 desek. Pro standardní výrobu se používají krabice v černé barvě a pro prioritní výrobu mají žlutou barvu. Operátor musí tyto krabice s deskami v zásobnících přenášet oběma rukama za okraj, pomalou chůzí a bez prudkých pohybů, tak aby nedošlo k potenciálnímu vysypání či vizuálním defektům. Vyráběné desky jsou na jakékoli otřesy či nedodržení kázně v nošení krabice velice háklivé. Krabice se zásobníkem s deskami se označuje lepícím štítkem s unikátním číslem sady, čárovým kódem a stručným popisem o výrobku (např. název čipu, typ technologie) na přední straně zásobníku. Takto označenou krabici nazýváme výrobní sadou (obrázek 28, strana 46). Výrobní sada obsahuje 25 desek. Každá deska z výrobní sady, která se vloží do zásobníku, musí mít také svoji unikátní identitu, tak aby nemohlo dojít k záměně. Popis desek nám zajišťuje laserová popisovačka hned při založení sady do výroby a popisuje desky na tzv. oblouk desky nebo fazetu desky (Obrázek 26, strana 46). Sady pro technologické zkoušky či experimenty mohou mít založeny i méně než 25 desek a nazýváme je inženýrskými.



Obrázek 26 6 palcová deska s čipy (ONSEMI, © 1999 – 2021)



Obrázek 27 Krabice se zásobníkem s 25 sloty pro desky (ONSEMI, © 1999 – 2021)



Obrázek 28 Výrobní sada s desky a unik. ident. štítkem (ONSEMI, © 1999 – 2021)

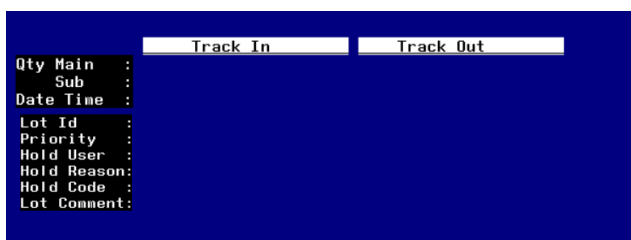
### 8.3 Informační systémy pro výrobu čipů

Operátoři či technologové musejí při zpracování výrobní nebo inženýrské sady používat informační systémy, poněvadž už se nepoužívá klasická papírová forma a evidence v klasických papírových oběžnících s postupem výroby. Informační systémy jsou k dispozici na každém pracovišti v čistých prostorech na mnoha počítačích buď přímo na ploše jako ikonky pro spuštění nebo na tzv. intranetových stránkách společnosti, kde si může pracovník najít veškeré potřebné informace (např. svůj příchod do práce až po pracovní postupy). Papírové oběžníky jsou sice u krabice se sadou vždy vytisknuté ihned na začátku

výroby čipů, ale pouze pro informační charakter. Primární inf. systémy pro zpracování a identifikaci výrob. sad a výrob. postupu si můžeme lépe zobrazit níže v podkapitolách.

### 8.3.1 INNA – inf. systém pro výrobní zpracování

Každý pracovník, který manipuluje s výrobní sadou v čistých prostorech má na každém pracovišti k dispozici počítače s několika informačními systémy podle potřeby. Každá sada se na pracovištích, kde se zpracovává na výrobních zařízeních, musí přihlásit do tzv. systému INNA (obrázek 29). Systém INNA používá operátor za pomoci počítače a obyčejné čárové čtečky. Primární účel je v přihlašování, odhlásování sady a informaci o pracovním kroku. Čárové kódy si díky čtečce může nakliknout na unikátním štítku s číslem sady na krabici. Druhou variantou je ruční vypsání čísla sady na klávesnici do INNY. Operátor používá většinou klíčové zkratky na klávesnici (F6, F8, F9, F10 a další), které mají svoje funkce v této aplikaci. Díky tomu najde informace, na kterém výrobním pracovišti se nachází, číslo výrobní sady, počet desek, název vyráběného čipu, prioritu pro výrobek a jakým pracovním receptem se má zpracovat. Recept pro zpracování je dán podle vydaného předpisu technologem.



Obrázek 29 Prac. prostředí INNA pro přihlášení sady (Interní materiály společnosti)

INNA nám může sloužit i pro další účely než jen přihlášení či odhlášení sady na zařízení. Důležitou funkcí je tzv. dispečer, kde se pomocí vypsání zkratky %D a napsání zkratky vybraného pracoviště může každý pracovník podívat, kolik sad je před zpracováním a na jaké zařízení jej může přihlásit. Jednotlivé základní jednoduché operátorské funkce v INNĚ pomocí klávesnice a čtečky pro načtení sady si můžeme zobrazit níže v tabulce 6.

Tlačítko na klávesnici + klik čtečkou na čárový kód	Popis funkce
<b>F1</b>	Přihlášení do systému operátorem
<b>F4</b>	Odhlášení ze systému operátorem
<b>F6</b>	Přihlášení výrobní sady
<b>F8</b>	Odhlášení výrobní sady
<b>F9</b>	Zobrazení pracoviště a čísla sady
<b>F10</b>	Zobrazení pracovního receptu

Tabulka 6 Klávesové zkratky pro INNU (Vlastní zpracování)

Ještě je určitě potřeba zmínit funkci tzv. holdu sady, což je českým synonymem pro pozastavení výrobní sady z důvodu nestandardního zpracování či manipulačního incidentu. Hold sady se zadává do INNY písmenovou zkratkou s mezerami L S H + číslo pozastavené sady a většinou jej používá nadřízená osoba nad operátorem výroby (např. mistr výroby či technolog). Po nastavení holdu se sada již nezobrazuje operátorovi pro zpracování.

### 8.3.2 Korekt - databázový systém pro identifikaci pracovního incidentu

Databázový inf. systém Korekt (Obrázek 30) se ve společnosti ONSEMI používá pro vypsání pracovního incidentu, který byl zpozorován během výroby čipů. Může se jednat o pracovní úraz, zlomení desky, chyby zařízení, vizuální vady na desce či jiné. Každé pracoviště má svou specifikaci výroby a může přinášet různé problémy s výrobou čipů. Jak bylo výše u systému INNA zmíněno tzv. holdování sady z důvodu nestandardnosti provádí nadřízená osoba, která má poté i povinnost tuto událost zapsat právě do systému Korekt. Zde se identifikuje vše, co je možné objektivně zpozorovat a popsat o incidentu. Do databáze systému se vyplňuje číslo sady, čas incidentu, název incidentu, kdo incident způsobil a na jakém zařízení se případně udál. Vše se dokumentuje tak, ať je co nejvíce informací zjištěno a dále vyhodnoceno v případě nesrovnalosti. Řádně vypsáný Korekt je poté předán dále pracovníkovi, jež zodpovídá za tzv. dispozici zaholdované sady. Většinou se jedná o technologa daného pracoviště. Dispozice po kontrole či případném pokusu o opravu je, že se výrobní sada posune na další pracoviště nebo se rozhodne v horším případě o zmetcích zpracovaných desk.

The screenshot shows the 'Editace Události' (Edit Incident) form in the Korekt system. The interface is in Czech and includes several sections:

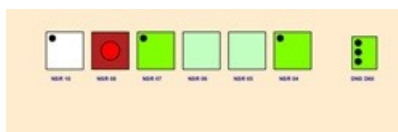
- Form Fields:** Číslo Události, Stav Události, Zařazení (příořazeno), Časť zařazení, Číslo sady, Typ Události, ID Nový, Šablona Události, Materiál, Stage (příořazeno), Datum vzniku, Typ problému, Klasifikace, Odpovědné pracoviště, Sub Klasifikace, Pivovní zachycení, Smlouva, Reportoval(a), Řaditel Události, Typ sady.
- Form Content:** Reportoval(a) Zbynek Zlínky, Datum vzniku 03.03.2023 13:22:56, Typ problému, Klasifikace, Odpovědné pracoviště, Sub Klasifikace, Pivovní zachycení, Smlouva, Reportoval(a), Řaditel Události, Typ sady.
- Form Labels:** Číslo výrobní sady, Popis incidentu, Dispozice technologem.

Obrázek 30 Prostředí datab. inf. systému Korekt (Vlastní zpracování)



### 8.3.3 Gramms – zobrazení layoutu pracovišť

Pracovní prostředí v čistých prostorech společnosti ONSEMI je rozděleno podle prováděných operací na jednotlivá pracoviště, častěji se používá tzv. lokace, což můžeme identifikovat jako místa, kde se zpracovávají výrobní sady podle pracovního postupu na výrobních zařízeních. Jednotlivé lokace si můžeme zobrazit díky internímu inf. systému Gramms (Obrázek 31) v layoutu. Zde (v grammsu) se nachází všechna zařízení, která jsou zkvalifikovaná pro výrobu čipů. Operátor, servis, technologové či vedoucí výroby má díky tomu daleko lepší přehled, zda nějaké zařízení je v provozu, v opravě či v prostoji. Pokud se vyr. sada přihlásí pomocí čtečky do inf. systému INNA, zobrazí se přihlášení také v layoutu v Grammsu na daném zařízení pomocí zelené barvy a černé tečky (Obrázek 31). Gramms slouží i jako informativní zobrazení pro servisní pracovníky výrobních zařízení, a to tak, že se přímo v Grammsu klikne na ikonku zařízení a pomocí překlíku na červenou barvu ikonky se odstaví zařízení pro potřebu servisní opravy. Světle zelená barva v obrázku 31 znamená, že na dané zařízení není aktuálně žádná výrobní sada ke zpracování.



Obrázek 31 Layout pracoviště v systému Gramms (Vlastní zpracování)

### 8.3.4 Dokument server – předpisy dle lokací

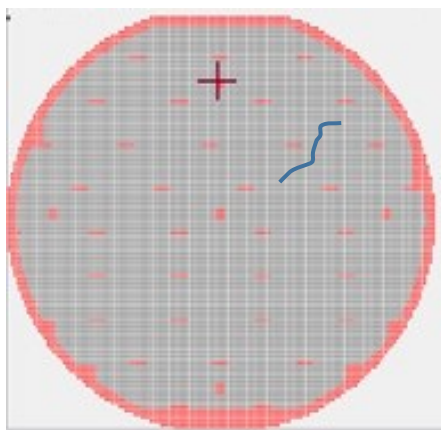
Práci s výrobními sadami a deskami může provádět pouze pracovník, který je tzv. certifikován pomocí absolvovaného testu a je řádně proškolen z předpisu dle svého pracoviště (lokace). Předpisy vydávají pro zpracování technologové výrobních operací nebo vedoucí výroby a každý operátor má většinou několik certifikací dle složitosti pracovní operace a zkušeností. Certifikace mají omezenou platnost a každý pracovník si je musí průběžně obnovovat nebo doplňovat. Všechny předpisy a tréninkové postupy pro své pracoviště najde na tzv. Dokument serveru – předpisy podle lokace na intranetových stránkách. V případě jakékoli nejistoty si dokumenty může na počítači ať už v čistých nebo i mimo čisté pracoviště otevřít a prostudovat.

Příklad cesty pro předpisy na intranetových stránkách:

Intranetové stránky společnosti → Výroba čipů → Tréninkové materiály → Dokument server – předpisy podle lokací → předpis dle lokace

### 8.3.5 Mapový editor desek

Jednotlivá zpracovaná výrobní 6“ (palcová) nebo 8“ deska nám tvoří tzv. mapu desky (Obrázek 32), kterou si operátor může zobrazovat v inf. systémech na počítači po celou dobu procesu přes tzv. Mapový editor. V tomto mapovém editoru může operátor během procesu zpracování zakreslovat jakékoli vizuální vady, které odhalí na kontrolách, jež jsou nastaveny během výroby čipů na vytipovaných pracovištích, kde dochází k rizikové manipulaci s deskami.



Obrázek 32 Mapa desky v map. edit. se zakresleným viz. defektem (Vlastní zpracování)

## 8.4 Pracoviště výroby čipů – fotolitografie a difúze

Pracoviště fotolitografie (Obrázek 33, strana 51) a difúze je ústředním procesním blokem pro výrobu čipů v ONSEMI. Po založení produkční sady do linky a popisu každé desky laserovou popisovačkou pro unikátní identitu je potřeba jako první krok za pomoci vysokoteplotní operace (přes 1000 °C) difúze nanést na desky oxid křemičitý. Poté na řadu přichází operace fotolitografie. Zde je potřeba nanést první masku čipu, což je v podstatě jeho struktura, kde každá nanesená vrstva následující masky v procesu dotváří konečný výsledek, a tím je finální funkční čip (Obrázek 34, strana 51). Samotné provedení maskování se provádí za pomoci nanesení fotorezistu a exponování přes vybranou masku čipu pomocí ultrafialového (UF) světla. Operátor používá zařízení od společnosti XX, které maskují desku za pomoci tzv. obdélníkových polí (Obrázek 35, strana 51). Pole může současně obsahovat masku s několika stovkami čipů a to dle velikosti. První se maskují obdélníky červené v obrázku 35 na straně 51 a poté zbylé zelené, kvůli lepší orientaci na desce. Zařízení se používají podle složitosti výroby a rozměrech čipů. Posledním krokem je vyvolání nanesené masky a kontrola za pomoci mikroskopu, což provádí operátor. Proces fotolitografie se poté ve výrobě opakuje podle toho, o jak složitý čip se jedná. Některé čipy

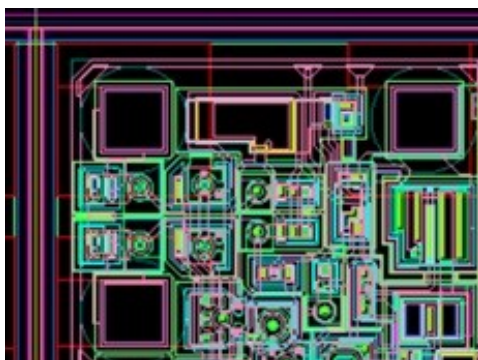
mohou obsahovat okolo deseti masek, ale jsou i také, které jich mají přes dvacet. Díky tomu může výroba čipu trvat i čtvrt roku a déle.

Vysokoteplotní operace difúze probíhá taktéž opakovaně ve výrobě čipů a to na horizontálních pecích (Obrázek 36, strana 52) o teplotách mezi 400 °C až 1000 °C, které s postupem výroby klesají na konečnou finální teplotu okolo 400 °C. Každá pec může současně zpracovat až 12 výrob. sad o 25 deskách. Je to hlavně z důvodu dlouhého času zpracování, kde tyto teplotní operace na začátku výroby trvají až 12 hodin. Pomocí difúze se dostává do povrchu desky požadovaná látka pro lepší vlastnosti a funkčnost čipu.

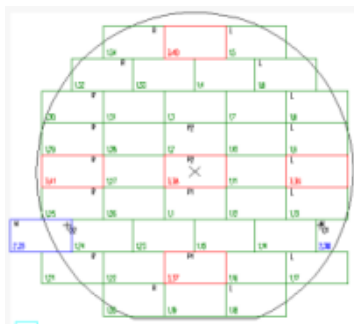
Nejčastěji se difundují dle pracovního postupu do desek látky bór (B), antimon (Sb), fosfor (P) a arsen (As). I po operaci difúze má operátor za úkol zkontrolovat pomocí měření na kontrolních měřicích zařízeních správnost procesu.



Obrázek 33 Pracoviště fotolitografie (Vlastní zpracování)



Obrázek 34 Část layoutu finál. funk. čipu s mask. vrstvy dle barev (Vlastní zpracování)



Obrázek 35 Obdelníková pole na desce pro nanesení masky (Vlastní zpracování)



Obrázek 36 Pracoviště difúze s horizontálními difúz. pecemi (Vlastní zpracování)

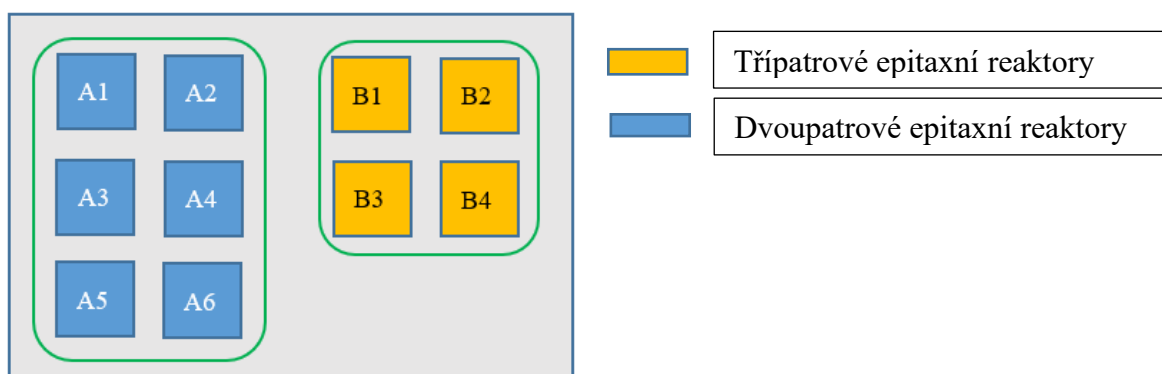
### 8.5 Pracoviště výroby čipů – implantace

Dalším velice důležitým krokem při výrobě čipu v ONSEMI je implantace. Tento proces výroby úzce navazuje na předchozí krok difundace chemických látek B, Sb, P, As. Implantace probíhá na zařízeních, jež se nazývají GXX a operátor dle dat z INNY zadává do zařízení požadované hodnoty implantační dávky (dle předpisu) pro dotaci látek hlouběji do desky podle maskovací vrstvy (úrovně). Jedná se o velice přesný a dobře reprodukovatelný proces za vysoké energie. Je zde ale velice důležité, aby pracovník zadal hodnotu správně a hlavně neopakoval proces dvakrát, poněvadž by se implantované chemické látky mohly dostat dále hlouběji do vyráběné desky a tím ji celou znehodnotit. I zde je tedy důležité dodržovat přesné pokyny v předpisu, které vydal technolog implantace.

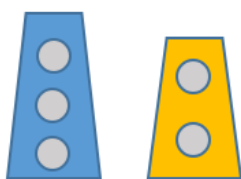
### 8.6 Pracoviště výroby čipů – epitaxní proces

Pracoviště epitaxního procesu je dalším krokem ve výrobě čipů. Operátor manipuluje s deskami na tzv. epitaxních reaktorech označeny písmenem a číslem v layoutu na obrázku 37 na straně 53 podle toho, zda je na daném zařízení zkvalifikovaná technologie. Epitaxní zařízení má tvar kužele a říká se mu karusel, a to dvou nebo třípatrový (Obrázek 38, strana 53). Na něm má kulaté otvory pro vložení desek z výrobní sady. Epitaxní proces nám za pomoci depozice na povrchu desky nechá nanést další (epitaxní) vrstvu, která narůstá bezprostředně na samotném křemíkovém substrátu desky. Tato vrstva má při výrobě funkci zlepšení chemických a fyzikálních vlastností vyráběného čipu. Operátor linky má vždy za úkol naložit všechny patra karuselu. Samotný tří nebo dvou patrový karusel ale nemá dostatek míst pro zpracování všech 25 desek výrobní sady. Sada se proto vždy fyzicky, ale i v inf. systému INNĚ virtuálně musí rozdělit. Pokud se v dispečerovi (%D) pro zpracování na epi. reaktorech potkají stejné technologie vyráběného čipu, může operátor výroby zbylou část desek zpracovat společně s další sadou tzn. že na jednom karuselu jedou najednou např.

dvě poloviny desek ze dvou výrob. sad. Zde si musí operátor dávat dobrý pozor při skládání desek zpět do zásobníku, aby desky nepomíchal. Při samotném zpracování má za úkol operátor zapsat do systému INNA hodnoty času depozice, koncentraci epi. vrstvy a tloušťku epi. vrstvy po změření na měřicích zařízeních na desce v 5 bodech (levá, pravá, horní, prostřední a spodní část desky). Tloušťka epi. vrstvy se většinou pohybuje od 15 do 20  $\mu\text{m} \pm 2 \mu\text{m}$ . Pokud je taková sada v pořádku v mezích stanovené předpisem od technologa, může pokračovat dále procesem.



Obrázek 37 Layout epitaxních reaktorů (Vlastní zpracování)



Obrázek 38 Náčrt třípat. a dvoup. karuselu pro epi. depozici (Vlastní zpracování)

## 8.7 Pracoviště výroby čipů – naprašování kovových vrstev

Na pracovišti depozice kovových vrstev, většinou nazývané jen jednoduše naprašování operátor pracuje s deskami s čipy na zařízeních, jež se nazývají Variany a to z důvodu propojení kovových vrstev na IO. Na Varianech se nanáší tenká vrstva (většinou jen okolo 2  $\mu\text{m}$ ) slitiny hliníku (Al) křemíku (Si) a mědi (Cu) v různých kombinacích (AlSi, AlSiCu, AlCu) podle technologie čipu. Jaká vrstva se má na danou desku s čipy nanést se zjistí opět v systému INNA načtením pomocí tlačítka F10 + čtečkou pro načtení čárového kódu sady. Operátor musí výrobní sadu před samotným naprašováním kovové vrstvy tzv. chemicky připravit. Příprava probíhá v chemickém boxu s lázní chemikálie s ředěnou kyselinou fluorvodíkovou (HF) pro očištění všech nečistot na desce a pro následné lepší přilnavosti při depozici slitin kovů. Sadu pracovník za pomoci manipulátoru ponoří do lázně na několik minut a poté opláchne v připravené lázni v tzv. demineralizované vodě, jež můžeme nazvat jako dokonale čistou (jedná se o vodu, která je chemicky zbavená částic a nečistot).

Po tomto kroku se sada nechá vyschnout. Poté následuje samotné naprašování na Varianu v čase dle zpracování v předpise. Po naprašování sadu pracovník vyjme z Varianu a provádí měřicí a vizuální kontrolu na pomocných měřících a mikroskopických zařízeních. Díky měřením se zjistí, zda požadovaná kov. vrstva byla nanesena v pořádku. Pokud se sada pohybuje v předepsaných limitech předpisu technologa, může pokračovat dále v měření.

## 8.8 Pracoviště výroby čipů - Broušení zadní strany

Založená výrobní sada na začátku výrobního procesu má vždy vyšší tloušťku desky než s jakou nakonec odchází k zákazníkovi. Je to z důvodu mnoha procesních a manipulačních kroků během výroby a tím potencionálního lomu desek. Nově založená sada s deskami může mít tloušťku většinou od 600  $\mu\text{m}$  do 800  $\mu\text{m}$ , což je v přepočtu na mm 0,6 až 0,8 mm. Desky jsou tak pro operátora robustnější a lépe manipulovatelné. Pokud se desky i přes zvýšenou manipulaci při procesu výroby, kdy se fyzicky vyndávají z krabice, a i ze zásobníků dostanou až na lokaci broušení zadní strany (BZS), mohou se začít brousit na požadovanou tloušťku.

Procesní krok broušení je těsně před samotnou elektronickou kontrolou čipů na konci výrobního procesu. Operátor BZS má ke zpracování desek k dispozici zařízení z názvem XY (Obrázek 39, strana 55). XY bruska má svoji základnu (Obrázek 40, strana 55) pro zásobník s desky, kde je operátor umístí. Poté dle systému INNA zjistí na jakou tloušťku má desky z výrobní sady zbrousit a podle toho zadá do dotykového obrazovky u zařízení požadovanou hodnotu. Desky se brousí ze zadní strany desek, tzn. na straně, kde nejsou čipy, ale pouze křemíková substrátová část. Přední část s čipy se musí pomocí speciální lepící fólie zalepit na tzv. nalepovače kvůli ochraně. Špatná adheze fólie způsobena nesprávným nalepením může mít za následek poškození čipů tím, že se při samotném broušení dostávají na čip křemíkové odbroušené nečistoty. Finální desky pro zákazníka se pohybují od tloušťky 100 do 340  $\mu\text{m}$  (tolerance se pohybuje  $\pm 20 \mu\text{m}$ ) a jsou broušeny broušícím kotoučem většinou několik minut u každé desky. Zbroušené desky se poté musí operátor přeměřit na mechanickém měřáku pro ověření správnosti zpracování, a zdali jsou hodnoty v toleranci. Dále má operátor za úkol zkontrolovat vizuální vzhled desky po procesu. Opět se kontrolují jen vybrané desky dle broušené technologie a požadavku v předpise. Celý proces broušení poté končí čistěním v demineralizované vodě a přesunutím na další lokaci.



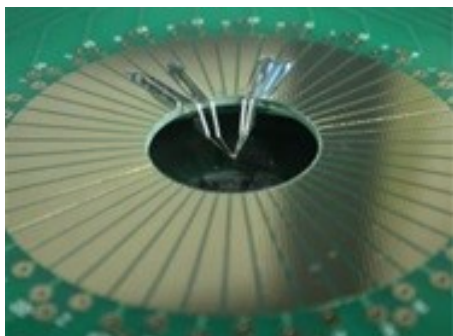
Obrázek 39 XY bruska (Vlastní zpracování)



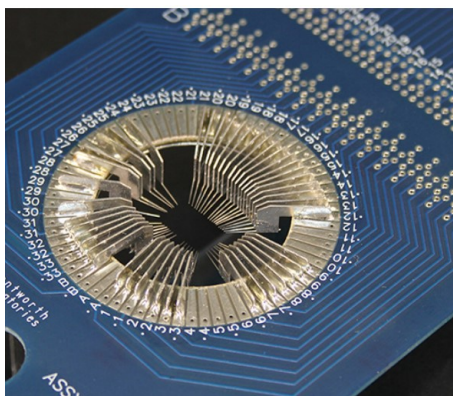
Obrázek 40 Základna pro zásobník s desky (Vlastní zpracování)

## 8.9 Pracoviště výroby čipů – Hrotové měření PC a UP

Pracoviště hrotového měření je posledním klíčovým procesním zastavením před expedici vyr. desek s čipy zákazníkovi. Operátor zde pracuje s měřicími zařízeními pro ověření správnosti celého výrobního procesu při tvorbě čipů. Měření můžeme rozdělit na pracovišti na dvě klíčové operace, které mají svou posloupnost. První krok jsou tzv. PC (parametric critical) testy neboli českým překladem měření ověření parametrů procesu v několika bodech na desce a druhým finálním krokem je tzv. UP (unit probe) testy neboli hrotové měření všech čipů na desce. Testování čipů probíhá u PC i UP za pomoci tzv. hrotových karet, které obsahují malinkaté hrotové jehličky (Obrázek 41 a 42, strana 56). Podrobněji si obě operace probereme níže v textu.



Obrázek 41 Hrotové karty s jemnými hroty uprostřed pro PC testy (Vlastní zpracování)



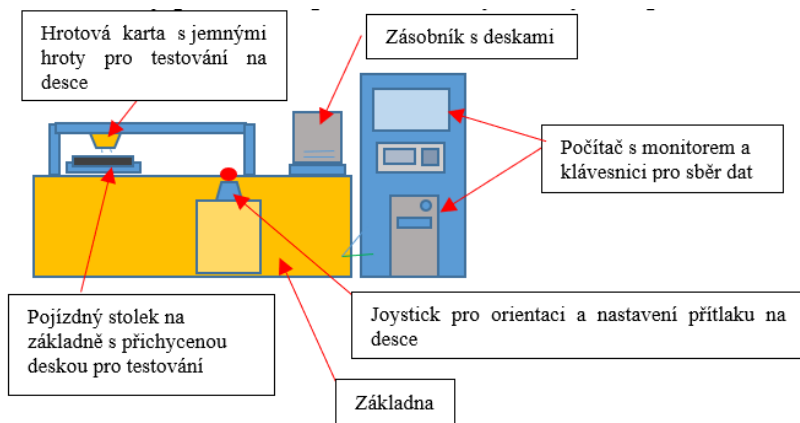
Obrázek 42 Hrotová karta s jemnými hroty pro UP testy (Vlastní zpracování)

### 8.9.1 PC testy

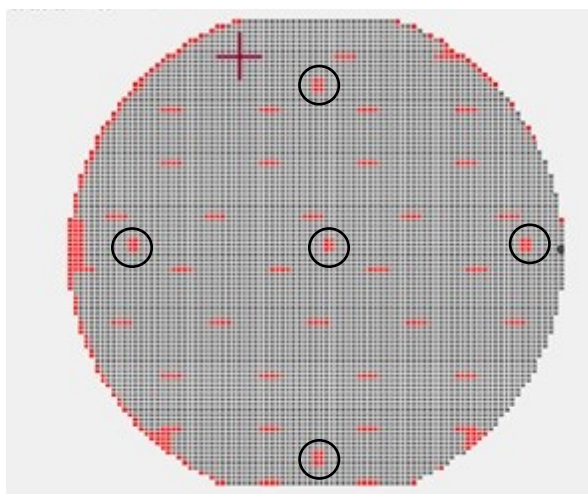
PC testy provádí operátor ve společnosti ONSEMI na měřicím zařízení Hewlett-Packard (HP), který se skládá ze základny s pohybujičím se stolkem, pomocným joystickem a propojený elektronicky počítačem s obrazovkou, jež sbírá a monitoruje měřená data z měřicí karty (Obrázek 43, strana 57). Nad stolkem je pevně připevněná hrotová karta podle měřeného čipu technologie. Karta může obsahovat od několika málo hrotů až po několik desítek. Kartu si mění operátor podle potřeby a informací o kartě v INNĚ v dispečerovi. V inf. systému INNA si výrobní sadu také přihlásí pracovník hrotového měření na volné dostupné zařízení dle layoutu v Grammsu. Na stolek se pomocí podavače dostává vyrobená deska s čipy ze zásobníku, který je posazen od operátora na základnu HP. Operátor musí desku zorientovat na stolku a nastavit joystickem tzv. přítlak jemných hrotů pro testování na desce v tzv. PC metalových strukturách (Obrázek 44, strana 57). Přítlak musí být nastaven tak, aby nedošlo k proražení testované metalové vrstvy či zničení jemných hrotů. PC testy se testují v 5 bodech na desce (Obrázek 44, strana 57) které jsou již na začátku procesu vytvořeny maskami u fotolitografického procesu a poté naprášeny u depozice kovových vrstev slitinami kovů (AlSi, AlSiCu, AlCu). V PC strukturách se měří desítky parametrů (většinou odporů v Ohmech nebo napětí v mA) pro ověření vyrobených čipů podle složitosti



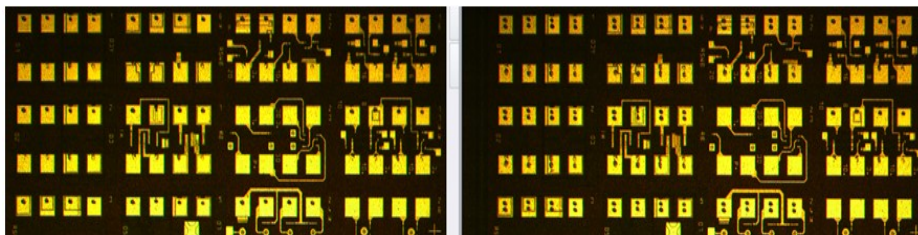
technologie. Měřené hodnoty se nazývají tzv. kritickými parametry procesu, jež mají nastaveny tzv. SPC limity a mají svůj zkrácený název pro PC testování. Jako příklad zkráceného názvu krit. param. můžeme uvést např. kontrolu depozice metalové vrstvy (R\_Alu), kontrola epitaxního procesu (Epires), kontrola fotolitografických vrstev (R\_BLayer, R\_Emitor, R\_Base) což odpovídá odporu utopené vrstvy, odporu emitoru nebo odporu báze a mnohé další. Každá technologie vyráběného čipů má své krit. param. nastaveny SPC limitem s horní a dolní mezí, které musejí být vždy ověřeny na každé desce. Operátor má k dispozici na počítači tzv. hodnocení měřených dat, které mu případný výpadek (hodnoty mimo SPC limit) na změřených deskách zobrazí na monitoru. Tento výpadek musí poté konzultovat se svým nadřízeným (mistr, předák), který poté provede námi známý hold sady tentokrát pro technologa měření, který je zodpovědný za správnost celého nastavení procesních kroků výroby čipů, včetně kontroly hodnot PC testů.



Obrázek 43 Náčrt zařízení HP pro PC testování (Vlastní zpracování)



Obrázek 44 Rozložení PC metalových struktur na mapě desky (Vlastní zpracování)



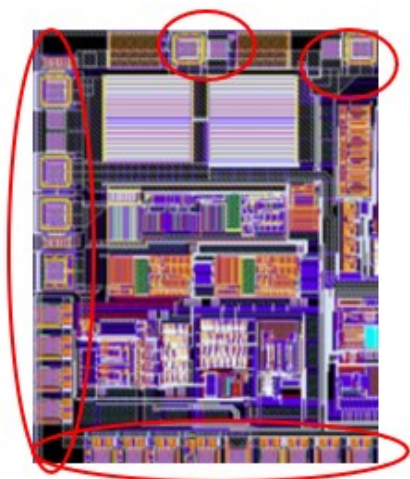
Obrázek 45 PC metal. strukt. na desce s otisky od jemných hrotů (Vlastní zpracování)

Pokud hrotové měření pomocí PC testů dopadne v pořádku bez vzniklých výpadků v hodnocení dat na monitoru u HP, může operátor danou výrobní sadu odhlásit z INNY a poslat dále na další měření. PC testování je jen první krok k ověření správnosti procesních kroků z důvodu měření jen v 5 bodech na deskách. Je to takové prvotní ověření, na které navazuje další velice důležitá verifikace procesu a to UP testování, které si můžeme lépe identifikovat níže v textu.

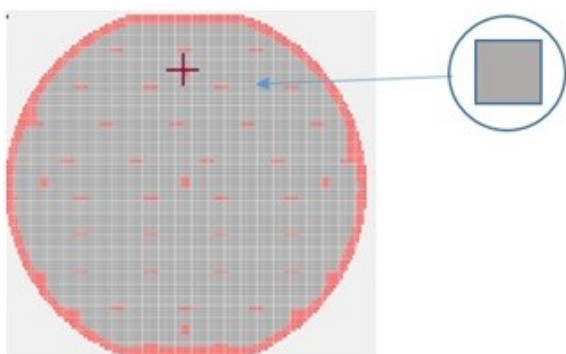
### 8.9.2 UP testování

Důležitým krokem v závěrečné fázi výroby je hrotové měření všech čipů na výrobní desce neboli zkráceně používané označení v ONSEMI jako UP (Unit probe) testování. Pokud je předchozí krok PC testování v pořádku v limitech u všech kritických parametrů, dostává se deska s čipy do závěrečného verifikačního cyklu a to na UP testování. Zde probíhá již měření každého čipu na výrobní desce a to na metalových strukturách čipu (obrázek 46, strana 59) jež jsou metal. vrstvami dle technologie čipu nadeponovány na pracovišti naprašování. Testování probíhá podobně jako u PC měření pomocí jemných hrotů osazených na měřicí kartě. Ve společnosti ONSEMI se vyrábí desítky druhů čipu se svoji unikátní strukturou a rozložením metalové struktury. Každá čip tak může mít svoji unikátní hrotovou kartou, kterou pracovník používá k testování. Sada se může stejně jako u PC testů měřit na zařízení HP s podobným nastavením. Po přihlášení sady od operátora pomocí INNY se výrobní sada položí opět na základnu HP v místě pro zásobník a po naložení desky na pohybuující stůl, orientaci desky a přítlaku hrotů se můžou výrobní desky postupně začít testovat.

Každá vyrobená deska s čipy má tzv. celkový počet čipů na desce. Tento počet je dán rozměry. Čím menší rozměr jednoho čipu, tím je na desce větší celkový počet čipů v šedé části desky (Obrázek 47, strana 59). Červenou část desky můžeme nazvat jako okraj desky a ta se na UP neměří. Je to dané tím, že čipy zde nemusí být díky kulatosti desky celé, ale jen část. Na výrobní desce se tedy může vyskytovat množství čipů v řádech několika stovek po několik desítek tisíc. Od toho se pak také odvíjí délka měření všech čipů na jedné desce, kde se můžeme dostat až na čas okolo 5 hodin.



Obrázek 46 Ilustr. strukt. čipu s metal. body po obvodu pro UP (Vlastní zpracování)



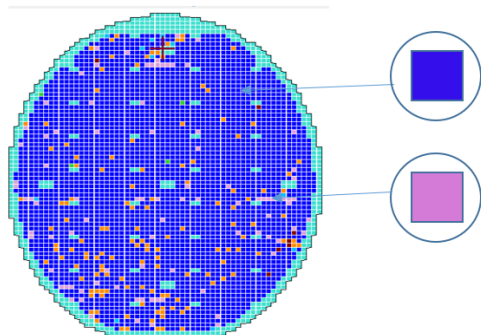
Obrázek 47 Ilustrační mapa desky s čipem v map. editoru před UP (Vlastní zpracování)

UP testování má nastavený tzv. testovací plán, což si můžeme charakterizovat jako soubor testů s horními a dolními limity za určitých nastavených zátěžových podmínek pro testovaný čip. Tento test. plán se může skládat z měření jednotlivého čipu při různých teplotách, napětích či proudech, které požaduje zákazník předtím, než si odebere výsledný vyrobený produkt. Limity jsou většinou v průběhu let různě zpřísněny. Tím je požadován po společnosti velký tlak na zaručenou kvalitu. Jako příklad si můžeme uvést ilustrativní tabulku test. plánu (tabulka 7, strana 60) pro různá napětí či proudy. Každý druh čipů ve výrobě čipů v ONSEMI má nastaveny svůj testovací plán individuálně, kterým se ověřuje, zda čip byl vyroben správně a nedošlo k žádnému procesnímu incidentu.

Test	Dolní mez	Horní mez	Popis testu
TEST 1	-1,4 mA	1,4 mA	Testování čipu při nižších proudech
TEST 2	1 A	5 A	Testování čipu při vyšších proudech
TEST 3	-100 mV	100 mV	Testování čipu při napěťových hladinách
TEST 4	1 V	2 V	Testování čipu při napěťových hladinách

Tabulka 7 Ilustrativní tabulka testovacího plánu (Vlastní zpracování)

Samotné testování probíhá pomocí hrotové karty na desce a současně virtuálním zobrazením mapy měřené desky v mapovém editoru na počítači u HP zařízení na monitoru. Každý dobrý čip, který prošel všemi testy v testovacím plánu je označen modrou barvou (Obrázek 48). Naopak tzv. vypadlý čip (neprošel testovacími limity v test. plánu) má barvu dle testu na který neprošel (např. červenou, růžovou, zelenou a jiné).



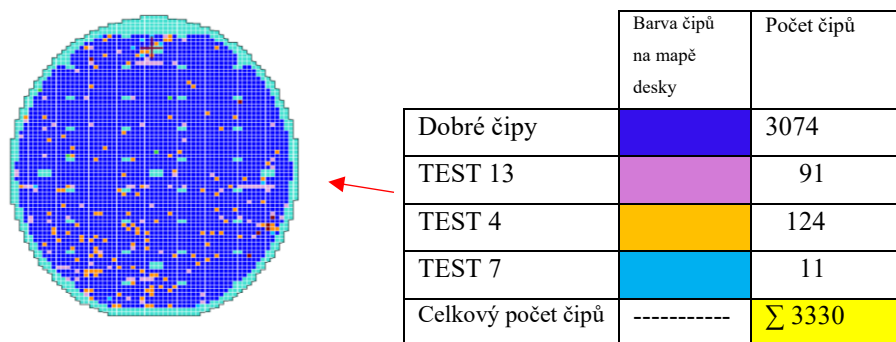
Obrázek 48 Změřená deska v mapovém editoru z UP testování (Vlastní zpracování)

Na obrázku 48 můžeme vidět desku s čipy, která obsahuje přesně 3330 čipů na desce, kde můžeme identifikovat různé výpadky čipů na desce dle testovacího plánu. Např. růžově vypadlý čip, v testovacím plánu pro tuto desku označen jako Test 13 má většinou souvislost se špatně nastaveným přítlakem hrotů na kartě. Tyto čipy se mohou případně opětovným přetestováním dostat do limitů daného testu. Ostatní barevné výpadky mají souvislost s procesem výroby. Důležitým kritériem pro celkový výsledek zpracované desky s čipy je tzv. procentuální výtěžnost čipů, jež si proberem níže v textu.

### 8.9.3 Procentuální výtěžnost čipů

Procentuální výtěžnost čipů po UP testování můžeme identifikovat jako množství dobrých čipů v poměru k celkovému počtu čipů na desce. Pokud se vrátíme k desce na obrázku 48

na straně 60, tak si u změřené desky můžeme v mapovém editoru zobrazit i celkovou statistiku měřených čipů, dobrých čipů a vypadlých čipů na testy (Obrázek 49). Vidíme, že z celkového počtu 3330 čipů, jež obsahuje námi probíráná deska prošlo (modře zbarvené) všemi testy v testovacím plánu 3074 čipů. Zbylé testy 13, 4 a 7 jsou vypadlé čipy (neprošly testy) vždy v nepatrném množství.



Obrázek 49 Statistika dobrých a vypadlých čipů z UP testování (Vlastní zpracování)

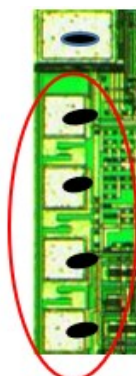
Díky těmto statistikám si poté můžeme v mapovém editoru také vyčíst celkovou procentuální výtěžnost čipů. U námi ukázaného příkladu u mapy a statistik z obrázku 49 nám u této změřené desky vychází procent. výtěžnost dobrých čipů 92,71 %. V tabulce 8 je ukázan podrobný výpočet procentuální výtěžnosti.

	Barva čipů v mapě	Počet čipů	Procento z celkového počtu čipu na desce (3330)
Dobré čipy	Modře zbarvené	3094	92,71%
TEST 13	Fialové	91	2,73 %
TEST 4	Žluté	134	4,02 %
TEST 7	Červené	11	0,33 %
			Σ 100 %

Tabulka 8 Ilustr. výpočet procentuální výtěžnosti z UP měření (Vlastní zpracování)

Operátor má za úkol u UP testování dle předpisu kontrolovat v průběhu měření určitý počet desek. Jedná se většinou o první, druhou a poté každou pátou desku z výrobní sady vždy v 5 bodech na desce a pod mikroskopem. Zde musí operátor kontrolovat, zda správně nastavil jemné hroty na metalových skrukturách, správný přítlak a správné umístění hrotů do metal. struktur. Jako příklad nesprávného přítlaku hrotů (příliš silné) a špatného umístění hrotů mimo metal. struktury si lépe můžeme ukázat na obrázku 50 na straně 62 vlevé části čipu. Takovéto čipy jsou nenávratně poškozeny a zmetkovány po kontrole, poněvadž jemné hroty

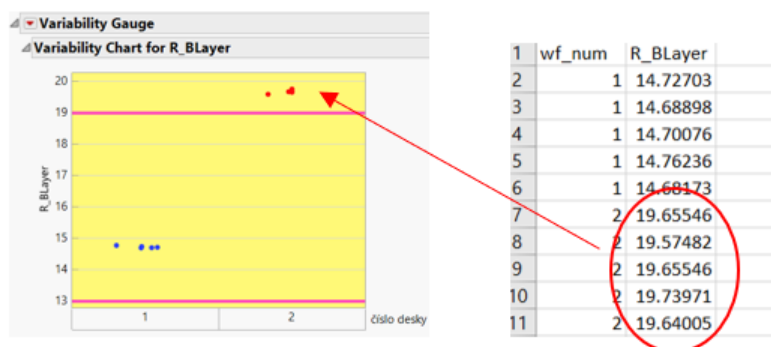
poškodily jeho funkční layout. Většina těchto vad může být způsobená kombinací chyb operátora, zařízení i opotřebením karty.



Obrázek 50 Velký přítlak a nesprávné umístění hrotů v metal. strukt. (Vlastní zpracování)

#### 8.9.4 Kontrola PC a UP testování technologem měření

Operace PC a UP testování kontroluje kromě operátora měření přímo ve výrobě v čistých prostorech i technolog měření. Ten má za úkol hlídat výpadky měření na PC testech (v 5 bodech) u kritických parametrů a současně i následného UP testování. Pokud operátor zjistí, že je některá deska mimo SPC limity u krit. parametrů, danou výrobní sadu musí pozastavit (holdovat) pro technologa měření. Technolog si musí data zpracovat. Většinou v programech Jump či Exensio, kde zpracovává a setřizuje měřené hodnoty z excelových tabulek z HP zařízení. Jako příklad výpadku u PC si můžeme uvést např. špatně nanesenou fotol. masku u utopené vrstvy, jež se měří na PC testování pod názvem R\_BLayer v Ohmech.

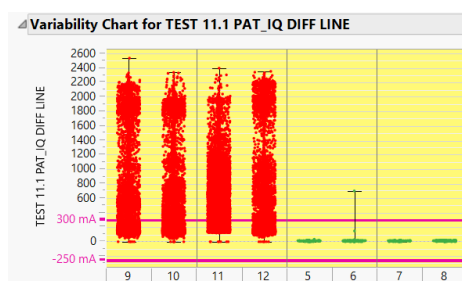


Obrázek 51 Graf utopené vsrtvy R\_Blayer zpracovaný v Jumpu (Vlastní zpracování)

V grafu v obrázku 51 vidíme dvě změřené desky (dle čísla) na HP zařízení během PC testování a stáhnuté z počítače pro technologa měření ke kontrole. Deska č. 2 v grafu je mimo horní hranici 19 Ohmů (růžová čára) ve všech 5 měřených bodech. Technolog tuto desku vyrazuje a předá informaci o nestandardně provedené operaci na fotolitografickém

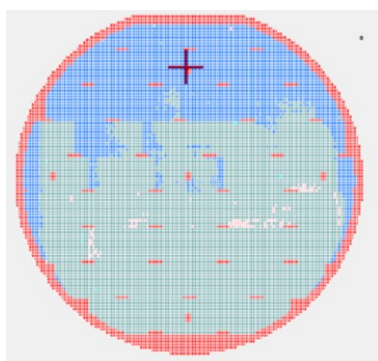
procesu o zpracování u této desky. Technolog fotolit. procesu by měl zpětně prověřit zpracování této desky či celé výrobní sady a případně nastavit nápravné opatření.

Obdobné zpracování a kontrola v grafech se provádí i u UP testování. Technolog si opět stáhne data do excelové tabulky z počítače z HP zařízení a kontroluje námi známe testy z testovacího plánu pro měřené čipy, zdali jsou v limitech. Dat z UP testování je daleko více z důvodu měření všech čipů na desce. Zpracování dat v excelu pro změřené desky, která mají desítky tisíc čipů na desce je velice náročné. Je potřeba data dobře protřídit a očistit od outlieru, tak aby měly vypovídací hodnotu. Kontrola poté také probíhá v programech Jump či Excensio. Ukázkový příklad vypadlého testu (TEST 11.1) a zpracovaného technologem měření v programu Jump si můžeme ukázat v obrázku 52.



Obrázek 52 Hodnoty testu 11.1 v grafu pro desky 5 až 12 v Jumpu (Vlastní zpracování)

V grafu v obrázku 52 lze vidět, že desky 9 – 12 mají většinu hodnot nad horním limitem a tyto čipy se v mapovém editoru (Obrázek 53) ukazují jako vypadlé (zelená barva) mimo nastavené hranice. Tyto čipy zákazník neakceptuje a jsou zmetkovány.

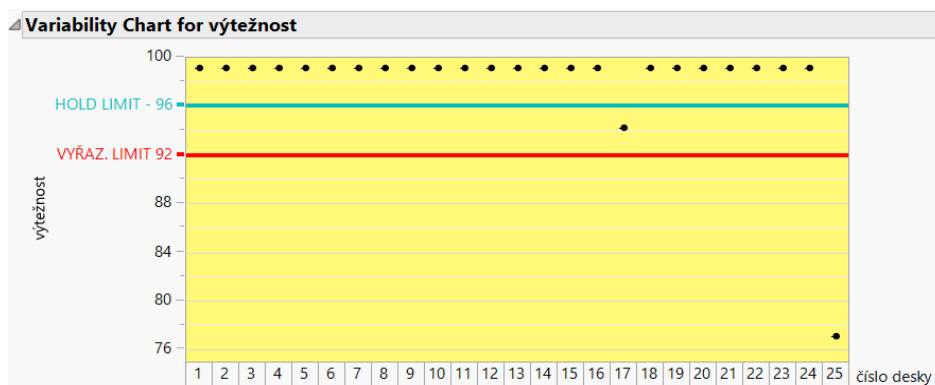


Obrázek 53 Výpadek testu 11.1 (zelená barva) z UP v map. editoru (Vlastní zpracování)

### 8.9.5 Hold a vyřazovací limit

Mimo sledovanou procentuální výtežnost jsou u každého vyráběného čipů nastaveny tzv. hold a vyřazovací limity (Obrázek 54, strana 64). Hold limit je procentní hranice z výtěžnosti čipů, kterou má nastaven technolog měření. V případě, že se tato hodnota dostane pod tuto

hranici je potřeba ve výrobě od nadřízeného pracovníka měření sadu zaholdovat v INNĚ (pozastavit) pro posouzení a následnou dispozici. Pokud je důvod snížené výtěžnosti pod hranici hold limitu jasný, např. špatným nastavením hrotů, je potřeba vypsát i v inf. systému Korekt a tento pracovní incident podrobně identifikovat. Pokud je ověření nastavení měření v pořádku, je potřeba, aby technolog měření hledal příčinu výpadku UP testování a to pomocí grafů jednotlivých testů či kontrolou distribuce v PC datech (více výše v kapitole 8.9.4). Hold limit je hlídaná hranice pro výrobu, ale nemusí znamenat ještě zmetkování vyrobené desky. Vyřazení desky nám určuje až druhý limit a to vyřazovací. Tento limit má hranici o něco nižší, a pokud se s ní v procentuální výtěžnosti dostaneme pod tuto mez jako v obrázku 54 deska č. 25, vyrobené desky se zmetkují. Může ji také nazývat jako hranici, po kterou akceptuje zákazník vyrobený čip. U každého vyráběného čipu to může být nastavené odlišně.



Obrázek 54 Příklad výtěžnosti s hold a vyřaz. limitem (Vlastní zpracování)



## 9 ANALÝZA SOUČASNÉHO STAVU VYBRANÉHO ČIPU

V této kapitole je popsán výběr technologie, čipu, analýza procesu výroby, procentuální výtěžnost daného čipu, včetně průměrné hodnoty jedné vyráběné desky. Cílem této kapitoly je zanalyzovat procesní kroky vyráběného čipu a identifikovat sníženou výtěžnost v letech 2019 – 2022. Pro analýzu současného stavu byl vybrán čip, který představuje stabilní produkt pro společnost a představuje určité nižší procento z prodeje. Jedná se o čip s několika tranzistory tzv. Napěťový regulátor **BH5XX** (název regulátoru je pozměněn pro potřeby mé diplomové práce). Jedná se o spolehlivý a kvalitní čip, ke kterému se zákazníci stále vracejí. Základní charakteristiku čipu u této technologie si můžeme blíže uvést v následující tabulce 9.

		Poznámka
Technologie	Bipolární technologie	-----
Název čipů	<b>BH5XX</b>	Napěťový regulátor
Počet čipů na desce	12375	100 % výtěžnost čipů
Průměrná procentuální výtěžnost	99,1 %	Bez procesních incidentů
Hold limit	95 %	Limit pro výrobní linku
Vyřazovací limit	87 %	Limit pro akceptaci zákazníkem
Prům. hodnota 1 desky	70 \$	---

Tabulka 9 Vybraná charakteristika čipu pro diplomovou práci (Vlastní zpracování)

Vybraná bipolární technologie pro tento typ výrobku je rozdělována ve výrobě čipů na tzn. Front End část (1. etapa výroby čipu) a jeho procesní kroky, které jsou tvořeny vrstvami P a N typu, jež byly zmíněny v teoretické části a z nichž posléze vzniká integrovaný obvod. Pokud se spojí typy P a N, vznikne dioda, což je součástka s usměrňujícími účinky. Poté pokud se spojí vrstvy NPN nebo PNP vznikne bipolární tranzistor – součástka.

Front End součástky BH5XX obsahuje tyto vrstvy:

- Základní deska se substrátem
- Utopená vrstva
- Epitaxní vrstva
- Izolační vrstva
- Vrstva N+

Tyto vrstvy se vytvářejí do povrchu desky za pomoci procesních operací fotolitografie, epitaxního procesu, implantace, difúze či termické oxidace za vysokých teplot a to na začátku výrobního procesu.

Druhá část výrobku BH5XX je tzv. Back end (2. etapa výroby čipů). Tuto část můžeme charakterizovat jako vrchní část povrchu čipu, pokud bychom se na něj dívali z řezu. I zde probíhají na součástce kroky jako fotolitografie, difúze, ale přidává se k nim i depozice metalické vrstvy, nejčastěji jednoúrovňové či i víceúrovňové, která poté vytváří propojenou metalickou síť. Celý tento proces dostane na konci procesu jako ochrannou či izolační vrstvu nitrid křemíku ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ). Součástka je na konci procesu zbrúšená na požadovanou tloušťku dle požadavku zákazníka a celá je ověřená na tzv. kritické parametry čipu. Konkrétní vybraná charakteristika procesních kroků BH5XX napět'ového regulátoru si můžeme blíže ukázat v následující tabulce 10.

Název součástky: Popis procesního toku BH5XX	Procesní kroky	Zařízení
1. Identifikace desky	Popis desky na oblouku – unikátní identifikace desky	Laserová popisovačka
2. Fotolitografický proces	10 maskovacích úrovní v průběhu celého procesu	Krokovací zařízení UTS
3. Implantační proces	Implantování požadované vrstvy	Implantátory
4. Oxidační a žíhací proces	Rozdifúzování požadované implantované vrstvy do povrchu křemíkové desky	Difúzní a žíhací pece s teplotami od 450 °C do cca 1250 °C
5. Epitaxní proces	Depozice epitaxní vrstvy	Epitaxní reaktory
6. Depozice metalu	Depozice metalové vrstvy ALSiCu 2 um	Naprašovací variány
7. Broušení zadní strany	Broušení na finální tloušťku 340 um	Brusky XY
8. Měření PC testů	Měření PC struktur na deskách v 5 bodech	HP měřicí zařízení
9. Měření všech čipů na desce	Měření všech čipů na deskách	UP měřicí zařízení

Tabulka 10 Procesní kroky výroby čipu BH5XX (Vlastní zpracování)

Fotolitografický proces, difúzní a implantační proces se v průběhu výroby čipů BH5XX opakuje dle nanášených požadovaných vrstev. Fotolitografický proces má následujících deset masek dle posloupnosti výroby v tabulce 11.

Maska	Název masky
1.	Utopená vrstva
2.	Izolační vrstva
3.	Báze
4.	Emitor
5.	Dioda
6.	Dioda 2
7.	Maska Předkontaktu
8.	Maska Kontaktu
9.	Maska metalu
10.	Maska pasivace

Tabulka 11 Fotol. vrstvy v procesu pro BH5XX (Vlastní zpracování)

## 9.1 Analýza výtěžnosti vybrané technologie BH5XX

V této kapitole se budeme blíže zabývat analýzou procesu a výtěžnosti vybrané technologie BH5XX. V tabulkách 12 – 17 níže na stranách 67 - 69 se můžeme blíže podívat na výtěžnost čipů v letech 2019 - 2021, kde jsou zobrazeny výpadky, snížená výtěžnost a finální roční ztráta ze zmetkování desek.

Číslo sady BH5XX	Produkční sada	Výtěžnost čipů	počet desek	Hrotové měření	Zařízení	Počet čipu na desce
RL1850	PS	37.28%	25	UP	DTS-144	12375
RL1436	PS	66.48%	25	UP	DTS-157	12375
RL2252	PS	72.35%	25	UP	DTS-157	12375
RK9832	PS	84.55%	25	UP	ATTST12	12375
RL1352	PS	86.57%	25	UP	DTS-143	12375
RK8280	PS	87.78%	25	UP	DTS-143	12375
RK8041	PS	99.51%	25	UP	ATTST12	12375
RK8099	PS	99.68%	25	UP	ATTST12	12375
RL1832	PS	99.75%	25	UP	DTS-105	12375
RK9739	PS	99.89%	25	UP	DTS-055	12375
RK9739	PS	99.91%	25	UP	DTS-055	12375
RK8232	PS	99.92%	25	UP	ATTST10	12375
RK9265	PS	99.92%	25	UP	DTS-112	12375
RK9797	PS	99.92%	25	UP	DTS-143	12375
RK8000	PS	99.92%	25	UP	ATTST12	12375
RK8674	PS	99.94%	25	UP	ATTST18	12375
RK9412	PS	99.95%	25	UP	DTS-123	12375
RL2252	PS	99.96%	25	UP	DTS-143	12375
RL2096	PS	99.96%	25	UP	DTS-143	12375
RK8490	PS	99.97%	25	UP	DTS-113	12375
RK9332	PS	99.98%	25	UP	DTS-112	12375

Tabulka 12 Výtěžnost čipu BH5XX v roce 2019 (Vlastní zpracování)

Průměrná výtěžnost v roce 2019	92,06%	
Počet zmetkovaných desek 2019	150 desek	Hodnota 1 desky = 70 \$
Celkové neuskutečněné výnosy (z důvodu zmetkování)	10500 \$	V dolarech

Tabulka 13 Tabulka zmetkovaných desek za rok 2019 (Vlastní zpracování)

Číslo sady BH5XX	Produkční sada	Výtěžnost čipů	počet desek	Hrotové měření	Zařízení	Počet čipu na desce
RL2570	PS	7.41%	25	UP	DTS-055-EG-18	12375
RL4005	PS	26.72%	25	UP	ATTST18-ATPBR16	12375
RL2570	PS	30.22%	25	UP	DTS-144-EG-75	12375
RL2570	PS	31.75%	25	UP	DTS-055-EG-18	12375
RL3845	PS	42.52%	25	UP	DTS-138-EG-47	12375
RL3565	PS	44.25%	25	UP	DTS-133-EG-03	12375
RL3752	PS	61.25%	25	UP	DTS-133-EG-03	12375
RL3845	PS	84.87%	25	UP	DTS-143-EG-74	12375
RL3845	PS	99.85%	25	UP	DTS-138-EG-47	12375
RL3845	PS	99.86%	25	UP	DTS-138-EG-47	12375
RL4060	PS	99.86%	25	UP	ATTST10-ATPBR21	12375
RL3270	PS	99.91%	25	UP	DTS-055-EG-18	12375
RL2678	PS	99.91%	25	UP	DTS-144-EG-75	12375
RL2910	PS	99.94%	25	UP	DTS-143-EG-74	12375
RL3845	PS	99.94%	25	UP	DTS-138-EG-47	12375
RL3845	PS	99.94%	25	UP	DTS-152-EG-42	12375
RL3846	PS	99.95%	25	UP	DTS-138-EG-47	12375
RL4290	PS	99.95%	25	UP	ATTST10-ATPBR21	12375
RL3955	PS	99.95%	25	UP	ATTST18-ATPBR16	12375
RL4419	PS	99.95%	25	UP	ATTST10-ATPBR21	12375
RL3949	PS	99.96%	25	UP	DTS-152-EG-42	12375
RL4740	PS	99.96%	5	UP	ATTST18-ATPBR16	12375
RL2678	PS	99.96%	25	UP	DTS-144-EG-75	12375
RL4740	PS	99.97%	25	UP	ATTST18-ATPBR16	12375
RL4419	PS	99.97%	25	UP	ATTST10-ATPBR21	12375
RL4290	PS	99.97%	25	UP	ATTST18-ATPBR16	12375
RL3270	PS	99.98%	25	UP	DTS-143-EG-74	12375

Tabulka 14 Výtěžnost čipu BH5XX v roce 2020 (Vlastní zpracování)

Průměrná výtěžnost v roce 2020	82,51 %	
Počet zmetkovaných desek 2020	135 desek	Hodnota 1 desky = 70 \$
Celkové neuskutečněné výnosy (z důvodu zmetkování)	9450 \$	V dolarech

Tabulka 15 Tabulka zmetkovaných desek za rok 2020 (Vlastní zpracování)

Číslo sady BH5XX	Produkční sada	Výtěžnost čipů	Počet desek	Hrotové měření	Zařízení	Počet čipu na desce
RL8062	PS	55.53%	25	UP	DTS-115	12375
RL8220	PS	65.32%	25	UP	ATTST10	12375
RL8488	PS	66.45%	25	UP	DTS-140	12375
RL8446	PS	70.10%	25	UP	ATTST18	12375
RL6973	PS	72.22%	25	UP	DTS-109	12375
RL7091	PS	65.23%	25	UP	DTS-145	12375
RL7092	PS	55.92%	25	UP	DTS-145	12375
RL8310	PS	99.90%	25	UP	DTS-143	12375
RL7872	PS	99.91%	25	UP	DTS-140	12375
RL5849	PS	99.91%	25	UP	ATTST10	12375
RL6900	PS	99.91%	25	UP	DTS-109	12375
RL7803	PS	99.86%	25	UP	DTS-140	12375
RL5468	PS	99.88%	25	UP	ATTST10	12375
RL7714	PS	99.93%	25	UP	DTS-103	12375
RL7206	PS	99.93%	25	UP	DTS-134	12375
RL5849	PS	99.93%	25	UP	ATTST10	12375
RL7803	PS	99.93%	25	UP	DTS-140	12375
RL8062	PS	99.94%	25	UP	DTS-140	12375
RL7206	PS	99.94%	25	UP	DTS-134	12375
RL8310	PS	99.94%	25	UP	DTS-140	12375
RL8184	PS	99.94%	25	UP	ATTST10	12375
RL5468	PS	99.95%	25	UP	ATTST10	12375
RL8418	PS	99.95%	25	UP	DTS-140	12375
RL5468	PS	99.95%	25	UP	DTS-126	12375
RL5468	PS	99.95%	25	UP	ATTST10	12375
RL7650	PS	99.95%	25	UP	DTS-118	12375
RL5468	PS	99.95%	25	UP	DTS-145	12375
RL8176	PS	99.95%	25	UP	DTS-157	12375

Tabulka 16 Výtěžnost čipu BH5XX v roce 2021 (Vlastní zpracování)

Průměrná výtěžnost v roce 2021	91,05 %	
Počet zmetkovaných desek 2021	120 desek	Hodnota 1 desky = 70 \$
Celkové neuskutečněné výnosy (z důvodu zmetkování)	8820 \$	V dolarech

Tabulka 17 Tabulka zmetkovaných desek za rok 2021 (Vlastní zpracování)

Z uvedených tabulek lze vyčíst, že se počet zmetkovaných desek pohyboval v průměru okolo 100 desek za rok 2019, 2020, 2021, což odpovídá neuskutečněným výnosům z tržeb v hodnotě přes 30000 \$ (dolarů). Bylo třeba tedy se podívat na jednotlivé procesní kroky a společně s technologií výrobních technologií a s daty z PC a UP měření zjistit, zda se proces někde nedostal mimo distribuci. Výpadky na deskách si můžeme zobrazit na obrázku 55.



Obrázek 55 Výpadky výtěžnosti na vyr. sadě v map. editoru (Vlastní zpracování)

Na deskách v obrázku 55 na straně 69 je vidět, že výpadky (zelená barva) jsou nepravidelné u jednotlivých čísel desek. Výpadek odpovídá změřenému požadovanému testu každého čipu na měřicích zařízeních HP. V našem případě se jedná o TEST 11 a TEST 11.1, jež si můžeme identifikovat níže v tabulce 18. Jedná se o určité měření napětí v mA v rámci kontroly celkové funkčnosti čipu. Bez této kontroly by tento produkt nemohl být odeslán dále zákazníkovi.

NÁZEV TESTŮ	DOLNÍ SPC LIMIT	HORNÍ SPC LIMIT
TEST 11	0	1300 mA
TEST 11.1	-250 mA	300 mA

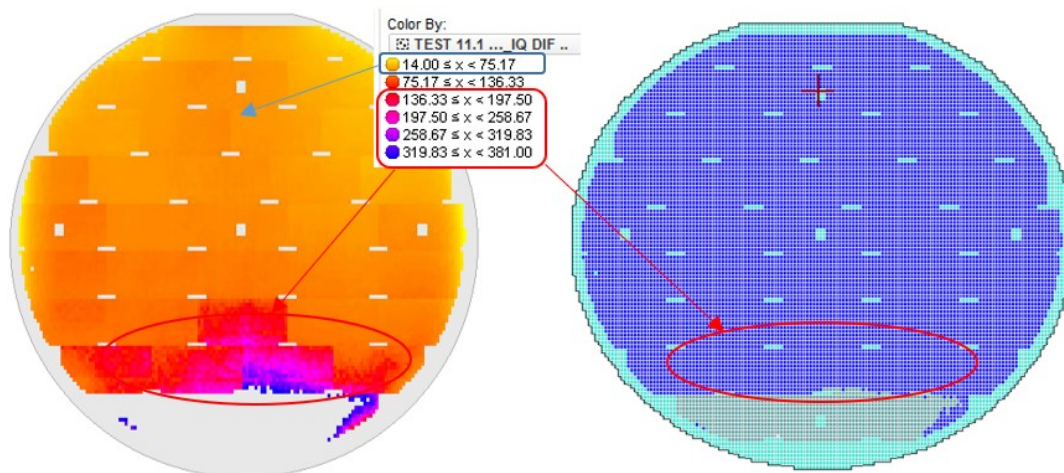
Tabulka 18 Limity testů 11 a 11.1 pro UP čipu BH5XX (Vlastní zpracování)

Počet testů u čipu BH5XX je několik desítek, které je potřeba změřit pro úspěšnou funkčnost a verifikaci čipu. Růžová barva v obrázku 55 na straně 69 značí nekvalitní měření hrotovou kartou, jež může být poničena během dlouhého času měření anebo špatnou manipulací a nastavením od operátora. TEST (4) je však možné přeměřit a původní sníženou procentní výtěžnost opět zvýšit.

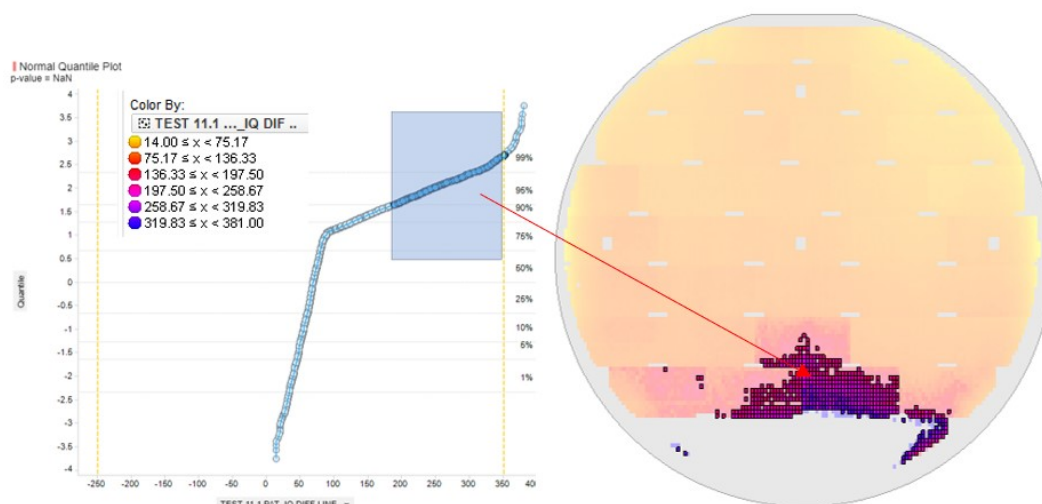
Test 11 je původní jediný test napětí v mA, kde již dle hodnot je zřejmé, že SPC limit byl historicky dostatečně veliký (0 – 1300 mA). V průběhu let a požadavku zákazníka byl u tohoto testu přidán i další zúžený TEST 11.1, kterým musí součástka projít. S tímto zúženým testem se čip měří od roku 2017 a od této doby se začínaly objevovat výpadky, poněvadž začal být problém se distribučně vejít v nových limitech do SPC limitu.

### 9.1.1 Analýza zmetkované desky v programu Exensio

Za pomoci programu Exensio jsem si udělal analýzu desky, která měla dle mapového editoru výpadky testu 11.1 (zelená barva) na obrázku 55 na straně 69. Pomocí dat stáhnutých z HP testeru z UP testování jsem si mohl lépe zanalyzovat desku s čipy, které tímto testem prošly v limitech. Na obrázku 56 na straně 71 vidíme porovnání desky z mapového editoru a mapu datových hodnot, které jsem si pomocí nástroje v Exensiu (Tools → Q - Q plot) vizuálně zpracoval (Obrázek 57, strana 71). Vidíme, že i dobré čipy, které se přibližují vypadlému zelenému vzoru, mají hodnoty vyšší k horní mezi testu 11.1 (300 mA), než hodnoty čipu v horní části desky. Díky tomu se při zmetkování desek musela brát v potaz i tato data a hraniční hodnoty u horní meze (fialová barva) případně zakapat inkoustem, tak ať se dostanou k zákazníkovi pouze čipy s úzkou distribucí, v našem případě škála hodnot mezi 14 – 75 mA (žlutá barva) v obrázku 56 na straně 71.



Obrázek 56 Porovnání výpadku s hodnoty čipu testu 11.1. (Vlastní zpracování)

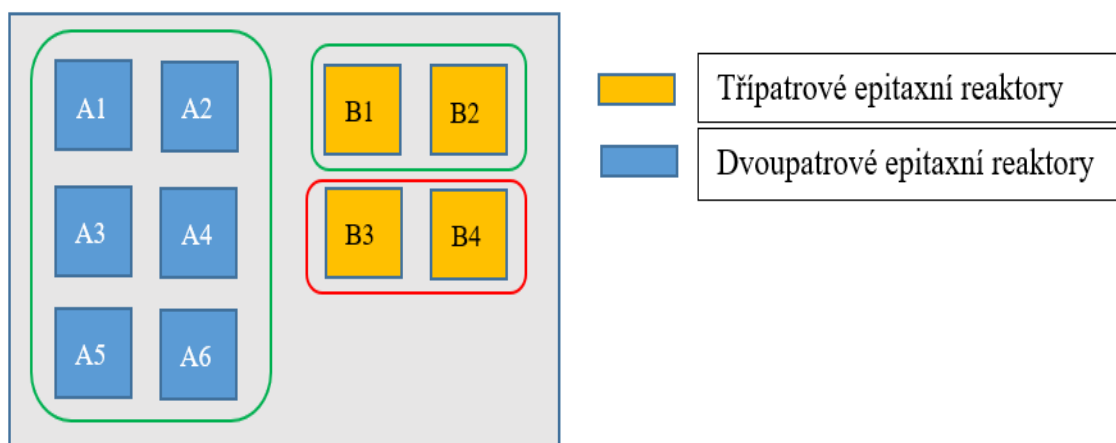


Obrázek 57 Q-Q plot pro analýzu testu 11.1 pro BH5XX (Vlastní zpracování)

## 9.2 Analýza procesu vybrané technologie BH5XX

V procesu výroby čipu BH5XX jsou jedním z nejkritičtějších pracovišť fotolitografie a epitaxní depozice. Fotolitografický proces pro tento typ čipů se krouje na fotol. zařízeních na křemíkové desce dle tzv. polí s požadovanou maskovací úrovní, jež jsem popsal v kapitole 8.4. Určitá část krokovačů je častým používáním nachylné k chybám orientace popř. jsou již zastaralé a je možné, že může dojít k špatné orientaci a tím nesprávnému nanesení masky. Nejkritičtější bývá nanášení první fotol. masky utopené vrstvy, kdy se dá říct, že operátor musí naorientovat desku a krokování nanášencých polí doslova naslepo. U epitaxního procesu je obdobný problém jako při fotolitografickém procesu. Deponuje se na desky na karuselových nosičích vrstva epitaxu na desku. Zařízení jsou dvou nebo třípatrová a může docházet k nesprávnému nadeponování vrstvy. Je to dané starším zařízením a občasné špatné homogenitě depozice na deskách.

Začal jsem tedy hledat určitou případnou korelaci na zařízeních u kritických procesů při výpadech testu 11.1. V následujícím layoutu v obrázku 58 si můžeme podívat, kde se zpracovává čip BH5XX na epitaxních reaktorech a zda snížená výtěžnost nekoreluje na určitý typ zařízení. V zeleném rámečku jsem si zvýraznil, kde se může BH5XX zpracovávat. V červeném rámečku naopak zase kde nelze zpracovávat, poněvadž daná zařízení nejsou zkvalifikována pro epit. depozici čipu BH5XX. Tzv. capability (možnost zpracování) nemají epitaxní reaktory B3 a B4. Zbylé epit. reaktory se mohou použít dle dostupnosti a kapacity zařízení. Pokud bychom se tedy blíže podívali na zpracování sad na epitaxních reaktorech od roku 2019 do začátku roku 2022 a zkusili si v tabulce 19 na straně 73 lépe zanalyzovat, přes které epi. reaktory byly zpracovány všechny sady se sníženou výtěžností, tak by nám již mohlo lépe ukázat, zda nějaké zařízení nepracuje správně.



Obrázek 58 Layout epitaxních reaktorů pro BH5XX (Vlastní zpracování)



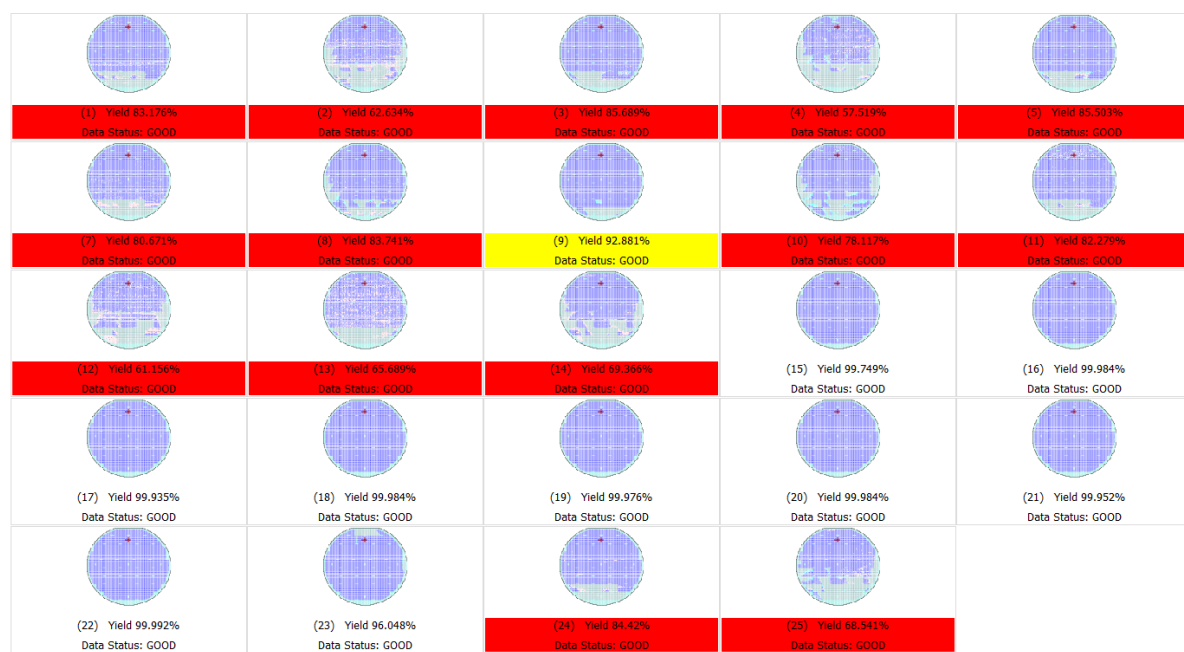
INPROCESNÍ KONTROLA EPITAXU						
Číslo sady	Rok	Odpor epitax	Tloušťka epit.	Teplota depozice	Epi reaktory	Snížená výtežnost
RL1850	2019	Ve SPEC limitu	OK	OK	A1	ANO
RL1436	2019	Ve SPEC limitu	OK	OK	A1	ANO
RL1352	2019	Ve SPEC limitu	OK	OK	A3	ANO
RK8280	2019	Ve SPEC limitu	OK	OK	A3	ANO
RK9832	2019	Ve SPEC limitu	OK	OK	A1	ANO
RL2252	2019	Ve SPEC limitu	OK	OK	A4	ANO
RL2570	2020	Ve SPEC limitu	OK	OK	A1	ANO
RL4005	2020	Ve SPEC limitu	OK	OK	B1	ANO
RL3656	2020	Ve SPEC limitu	OK	OK	A5	ANO
RL3555	2020	Ve SPEC limitu	OK	OK	A5	ANO
RL3845	2020	Ve SPEC limitu	OK	OK	A4	ANO
RL3565	2020	Ve SPEC limitu	OK	OK	A3	ANO
RL3752	2020	Ve SPEC limitu	OK	OK	B1	ANO
RL3845	2020	Ve SPEC limitu	OK	OK	A1	ANO
RL8062	2021	Ve SPEC limitu	OK	OK	A3	ANO
RL8220	2021	Ve SPEC limitu	OK	OK	A3	ANO
RL8488	2021	Ve SPEC limitu	OK	OK	A1 a A2	POUZE ČÁST SADY ANO
RL8446	2021	Ve SPEC limitu	OK	OK	A5	ANO
RL6973	2021	Ve SPEC limitu	OK	OK	A4	ANO
RL7091	2021	Ve SPEC limitu	OK	OK	A5	ANO
RL7092	2021	Ve SPEC limitu	OK	OK	A4	ANO
RL2158	2022	Ve SPEC limitu	OK	OK	A3	ANO
RL7057	2022	Ve SPEC limitu	OK	OK	B1	ANO

Tabulka 19 Analýza epi. reaktorů při sníž. výtež. u čipu BH5XX (Vlastní zpracování)

V tabulce 19 si můžeme prohlédnout, že čip BH5XX, který byl zpracován přes epi. reaktory, a měl poté sníženou výtěžnost, byly A1, A3, A4, A5 a B1. U epi reaktorů A2, A6 a B2 jsem sníženou výtěžnost nevypozoroval v letech 2019 až 2022.

V roce 2021 se částečně prokázalo, že epitaxní reaktor je jeden z faktorů a příčin snížené výtěžnosti čipů BH5XX. U sady RL8444 z roku 2021 (tabulka 19) byl při zpracování sady problém z epi. reaktorem A1 a tak se zbylá část sady musela dodeponovat na jiném reaktoru. Na jednom karuselu se dokáže zpracovat vždy postupně celá sada, i když se musí fyzicky rozdělit ze zásobníků, poněvadž počet desek, které je schopen reaktor zpracovat je omezen. Na obrázku 59 na straně 74 níže vidíme námi známé výpadky na TEST 11.1, ale pouze na

části sady. Desky 1 - 14 a 24-25 byly zpracovány na A1 epitaxním reaktoru a zbylých 9 desek po odstavení zařízení A1 se zpracovalo na A2.



Obrázek 59 Mapy výtěžnosti sady RL8444 (Vlastní zpracování)

Již podle výtěžnosti lze poznat, že epitaxní reaktor A1 není vhodný pro zpracování BH5XX při depozici. V Tabulce 20 si pro lepší přehled můžeme zobrazit jednotlivé výtěžnosti sady RL8444 a zpracování na epitaxním reaktoru. Lze tedy jednoznačně potvrdit, že jedním z faktorů snížené výtěžnosti je epitaxní reaktor.

Číslo sady	Výtežnost	Epi reaktor
1	85,08%	A1
2	68,76%	A1
3	86,42%	A1
4	62,20%	A1
5	85,61%	A1
6	76,91%	A1
7	85,70%	A1
8	85,38%	A1
9	92,88%	A1
10	78,41%	A1
11	84,41%	A1
12	71,26%	A1
13	80,02%	A1
14	71,54%	A1
15	99,75%	A2
16	99,98%	A2
17	99,94%	A2
18	99,98%	A2
19	99,98%	A2
20	99,98%	A2
21	99,95%	A2
22	99,99%	A2
23	96,05%	A2
24	85,12%	A1
25	68,54%	A1

Tabulka 20 Výtežnost desek a epi. rektory pro sadu RL8444 (Vlastní zpracování)

### 9.3 Analýza PC dat BH5XX

Jako další krok jsem zvolil analýzu PC dat. PC testování se provádí vždy na konci výroby procesu čipů a to v 5 oblastech na deskách tzv. testovacích strukturách (TS). Testují se vždy všechny desky na zařízeních HP. Zařízení si desku musí zidentifikovat, naorientovat a následně změřit ve všech TS. Každá technologie má nastaveny tzv. kritické parametry procesu, které se na daných TS musí změřit. Jsou určeny většinou horním a dolním limitem (tzv. SPC limity) a jsou charakterizovány tzv. trendem hodnot, ve kterých by se měly pohybovat. Pokud se hodnoty vyskytují mimo SPC limit, tak jsou desky většinou zkoumány dále (např. námi zmíněný Korekt, jež shromažďuje incidenty, které se vyskytují během výroby). U výpadku pro čip BH5XX z posledních třech letech bylo tedy potřeba udělat analýzu PC dat pro lepší představu a hledání příčiny.

#### 9.3.1 Kritické parametry technologie BH5XX

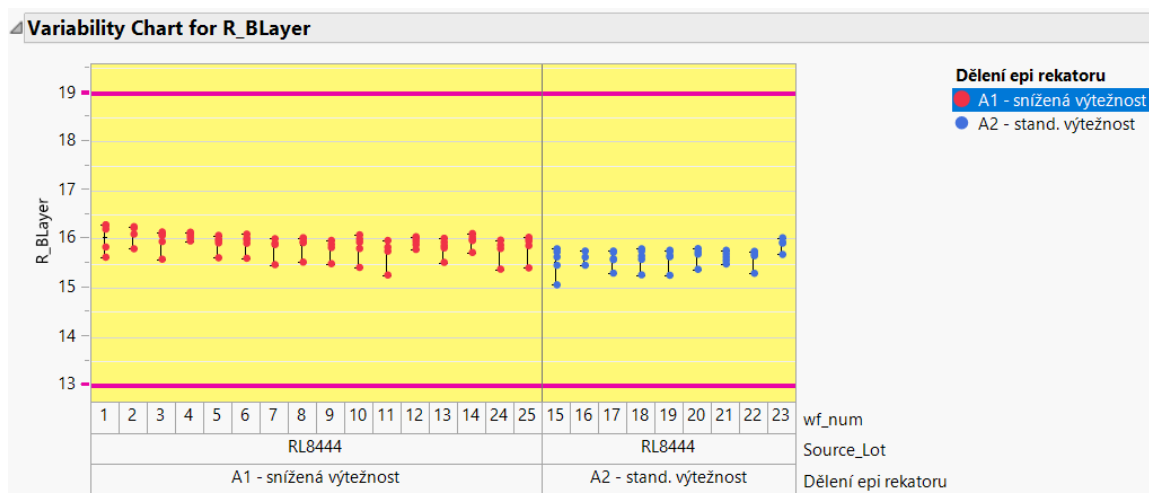
I námi probíraná součástka BH5XX má svoje kritické param. se SPC limity. Ty bylo potřeba u změřených sad se sníženou výživeností vždy důkladně zanalyzovat. Jednotlivé kritické parametry si můžeme lépe zobrazit v tabulce 21 níže.

Název krit. testu	Popis krit. testu	Dolní limit	Horní limit	Jednotky
R_Alú	Hliníkový kontakt	2	5	Ohm
Base	NPN tranzistor	150	450	
Epires	Epitaxní proces	35	65	V
R_BLayer	Odpor Utopené vrstvy	13	19	Ohm
R_Emitor	Odpor emitoru	4,3	6,7	Ohm
R_Base	Odpor báze	10	80	Ohm
R_P+	Odpor P+ vrstvy	12	26	Ohm
U_BE	Propustné napětí(báze, emitor)	0.85	0.95	V
U_PRAH	Prahové napětí	29	50	V

Tabulka 21 Kritické parametry pro čip BH5XX (Vlastní zpracování)

Kritické param. jsem si tedy stáhl z historických dat na zařízeních HP, kde byly sady měřeny. Data jsem si musel setřídít a upravit v excelu za pomoci jeho nástrojů a poté si zobrazit upravené v programu Jump. Poté jsem graficky zanalyzoval námi ukázkovou výrobní sadu RL8444 z roku 2021 pro všechny jeho kritické parametry. Tak jsem si chtěl ověřit, zda sada má všechny hodnoty řádně ve SPC limitech. Pokud se podíváme v grafu v obrázku 60 na straně 76 krit. par. R\_BLayer (odpor utopené vrstvy), můžeme vidět, že jsem si dobré a

špatné desky rozdělil v Jumpu na sníženou a standardní výtěžnost a barevně odlišil. Stejně tak jsem to provedl i pro další krit. parametry (viz. Příloha P I).

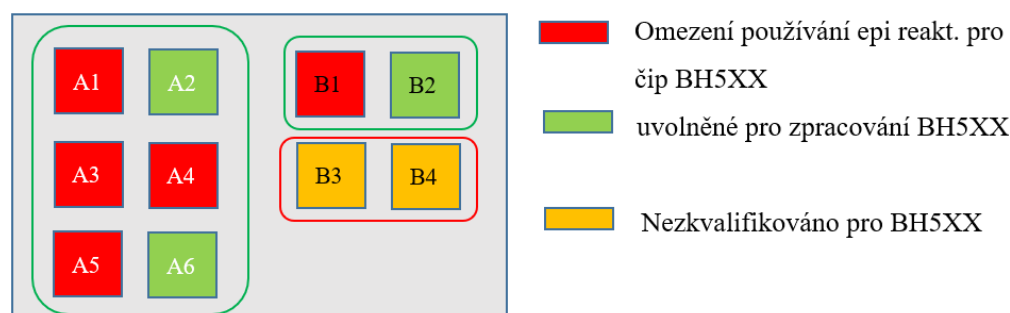


Obrázek 60 Graf Utopené vrtstvy(R\_Blayer) u sady RL8444

Již z jednotlivých grafů kritických parametrů dělení sady RL8444 se sníženou výtěžností a standardní výtěžností jsem zjistil, že jednotlivé hodnoty jsou totožné včetně námi důležitého parametru Epipes (hodnota epitaxního procesu). Z této analýzy lze tedy říct, že nám musí výtěžnost čipů ovlivňovat ještě další faktory (nejenom epitaxní proces) v procesu výroby, které však nemusí být patrné v grafu jednotlivé sady, ale například v dlouhodobém trendu parametrů.

### 9.4 Omezení používání epi reaktorů

Na základě analyzované sady PC krit. parametrů u sady RL8444 z roku 2021, kde se ukázalo, že daná sada byla dělená a zpracována na různých epi reaktorech jsem se rozhodl v průběhu roku 2022 podle zjištění o výpadcích, že se v procesu výroby čipu BH5XX omezí používání epi. reaktorů u kterých se objevovala snížená výtěžnost čipů. V následujících layoutu v obrázku 61 si můžeme prohlédnout, které reaktory jsem zakázal používat zpracovat pro tuto technologii s daným čipem BH5XX.



Obrázek 61 Layout omezen. a uvolněných epi. reaktorů pro BH5XX (Vlastní zpracování)

Bylo to prvotní a rychle řešení o nevyužívání reaktorů A1, A3, A4, A5, B1 v reakci na jeden z faktorů, jež nám ovlivňuje sníženou výtěžnost. Zbylé tři reaktory A2, B2 a A6 byly ponechány pro zpracování, poněvadž u těchto zařízení jsem výpadky v analýze nevypozoroval. Takovéto omezení bylo pouze dočasnou akcí pro zabránění dalších zmetkovaných desek, nikoli vyřešením problému. V procesu se tedy do této doby (první polovina roku 2022) s úpravou procesu nijak nepohybovalo. Bylo však jen otázkou času, zda se podobné problémy u zbylých zařízeních neobjeví také, z důvodu častějšího používání.

## 9.5 Dlouhodobý trend PC parametrů

Hledat další faktor snížené výtěžnosti bylo potřeba nasbíráním dat krit. param. pro čip BH5XX za několik posledních let a porovnat se sady, které byly standardní ve zpracování procesem výroby, tak také ve výtěžnosti. Opět jsem si stahoval data z HP zařízení pro účely následného zpracování dat v grafických nástrojích v Jumpu.

Pro trend sad jsem si vybral sady od roku 2019 do začátku roku 2022, u kterých se výpadky na finálním měření vyskytovaly a současně u kterých byly v pořádku. Vybral jsem 4 sady z každého roku, kde 2 měly vždy standardní výtěžnost a 2 sady se sníženou výtěžností. Pro lepší přehled jsem vytvořil tabulky 22 a 23 s čísly sad.

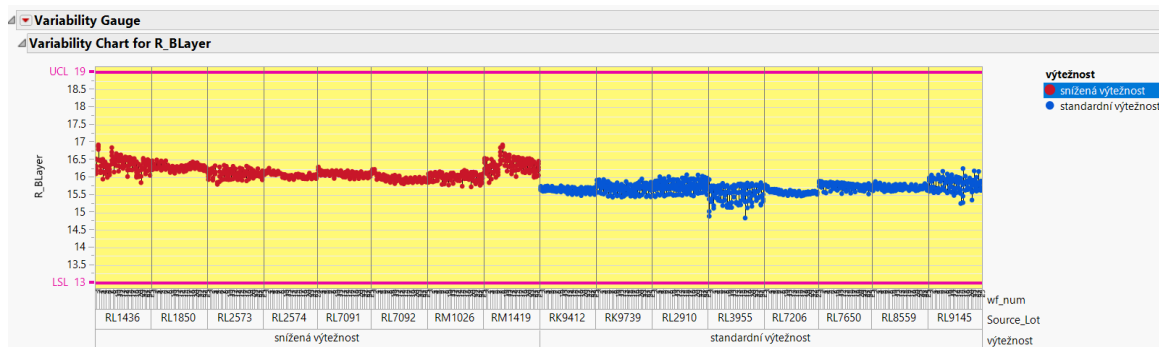
Rok	2019	2019	2019	2019	2020	2020	2020	2020
Číslo sady	RL1850	RL1436	RK9739	RK9412	RL2573	RL2574	RL2910	RL3955
Výtěžnost	37.28 %	66.48 %	99.91 %	99.95 %	31.75 %	7.41 %	99.85 %	99.95 %

Tabulka 22 Vybrané sady z roku 2019 – 2020 pro analýzu PC dat (Vlastní zpracování)

Rok	2021	2021	2021	2021	2022	2022	2022	2022
Číslo sady	RL7091	RL7092	RL7650	RL7206	RM1419	RM1026	RL8559	RL9145
Výtěžnost	65.23%	55.92 %	99.95%	99.93 %	41.41%	57.59%	99.95%	99.97 %

Tabulka 23 Vybrané sady z roku 2021 – 2022 pro analýzu PC dat (Vlastní zpracování)

Z následujících 16 sad jsem si vytvořil trend PC parametrů v Jumpu v letech 2019 až po první polovinu roku 2022 se sady s dobrou a špatnou výtěžností. Opět jako ukázkový příklad můžeme ukázat utopenou vrstvu R\_BLayer (Obrázek 62, strana 78) z fotolitografického procesu. Zbylé srovnání dalších kritických param. jsou uvedeny v příloze P II.

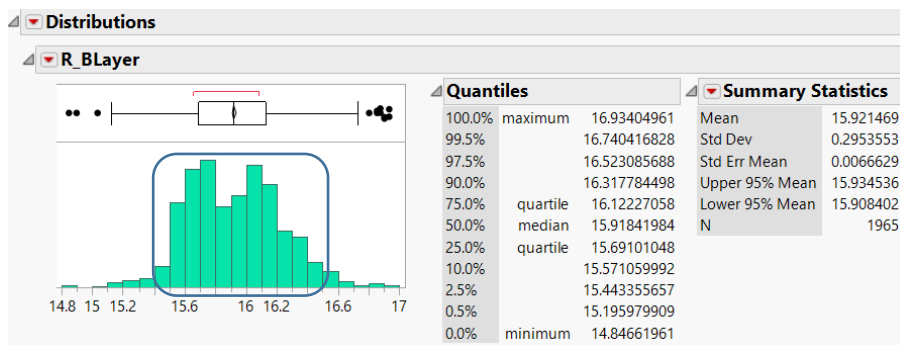


Obrázek 62 Graf R\_BLayer – trend sad 2019 - 2022 (Vlastní zpracování)

Porovnáním sad jsem zjistil, že všechny sady se pohybují ve SPC limitech, i když u některých parametrů s vyšším rozptylem, což mohlo být způsobené výrobním procesem či špatným měřením. Velice dobře jde tento trend zpozorovat u prahového napětí U\_PRAH, kde hodnoty ve SPC limitu odpovídají aktuální kondici měřícího zařízení. Stejný případ lze uvést i u propustného napětí (báze, emitor) U\_BE. Kritické parametry epitaxního procesu Epires jsou také v pořádku a graficky nám neukázaly žádnou anomálii v trendu sad. Asi nejzajímavější v hodnocení trendu dopadl krit. par. R\_BLayer (Obrázek 62), kde již určité dělení sady na špatné vs. dobré lze mírně zpozorovat. Masku utopené vrstvy se nanáší v procesu jako vůbec první a je velice důležité tuto masku dobře naorietovat a poté naimplantovat v procesu výroby čipů. Jakýkoli incident, jež není vyzpozorován na kontrole fotolitografického procesu a projde až na konec procesu znamená veliké problémy s měřením PC testů či měření všech čipů na desce a celkovou funkčností čipů. Parametr R\_BLayer tedy na základě dat z grafu v obrázku 62 jsem tedy podezřívá jako další faktor snížené výtěžnosti.

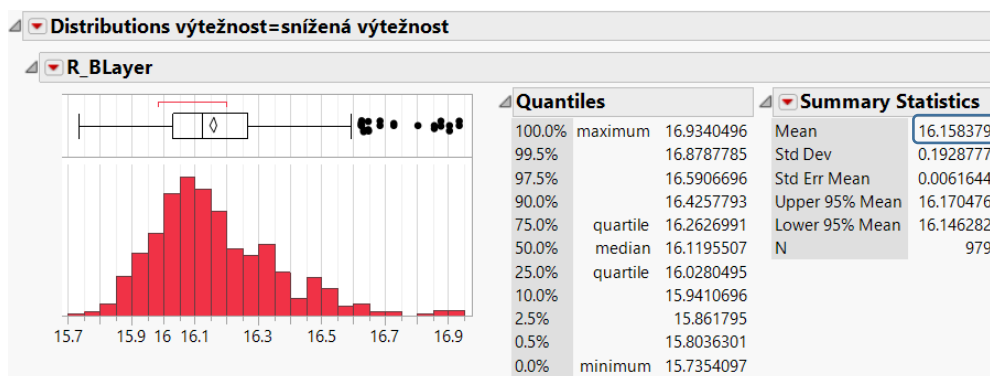
## 9.6 Dlouhodobý trend R\_BLayer

Jako další krok jsem tedy zvolil kontrolu PC par. R\_BLayer. Již v trendu 16 sad v obrázku 62 lze vidět, že určitý posun parametru lze vyzpozorovat u sad se sníženou výtěžností. Pokud bychom se podívali podrobněji do distribuce s podrobnými statistikami, kterou jsem zpracoval u těchto 16 sad v programu Jump, tak lze zřetelně zpozorovat dvojitou distribuci v obrázku 63 na straně 79.

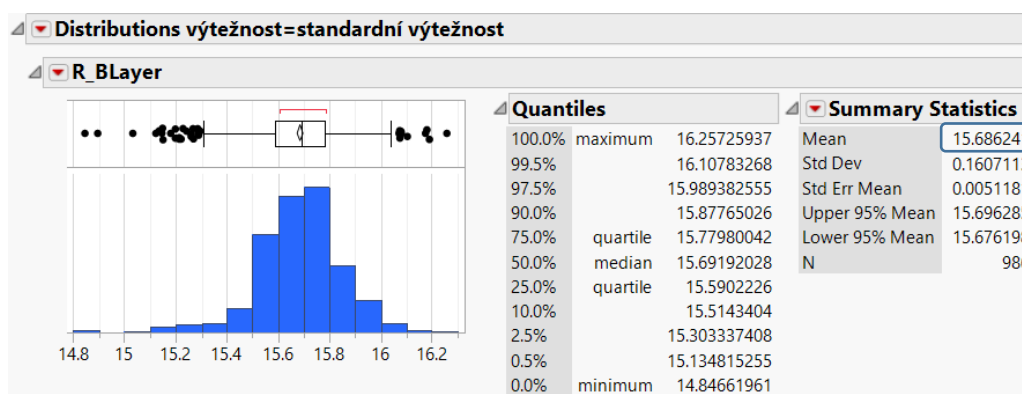


Obrázek 63 Dvojitý distrib. R\_BLayer v letech 2019 - 2022 (Vlastní zpracování)

Pokud bychom distribuci rozdělili na standardní výtěžnost a sníženou výtěžnost, lze zřetelně poznat, že kritický parametr R\_BLayer má kritickou hranici od 16 Ohmů. Pokud si distribuci rozdělíme na dobrou vs. špatnou, lze tyto hodnoty zřetelně vyčíst v obrázku 64 a 65 v Summary Statistics v meanu (průměru).



Obrázek 64 Distrib. R\_BLayer u sníž. výtěžnosti (Vlastní zpracování)



Obrázek 65 Distrib. R\_BLayer u stand. výtěžnosti (Vlastní zpracování)

V grafech distribuce u obrázku 64 a 65 sad lze vysledovat určitý náznak, že pokud se pohybujeme pod hranici 16 Ohmů u měřené utopené vrstvy při PC testech a přibližujeme se k hranici 15 Ohmů, tak sady prochází v pořádku bez vzniklých výpadků u závěrečného měření. Díky této analýze dat a procesních kroků jsem došel k závěru, že kritickými faktory,

jež ovlivňují celkový dobrý výsledek z měření jsou epitaxní reaktory s epitaxní depozicí a současně odpor utopené vrstvy R\_BLayer, jež se pohybuje na konci procesu po PC testech ve dvojí distribuci. Proto jsem požádal společnost o vytvoření projektu na zlepšení výrobního procesu u součástky BH5XX za pomoci založení dvou inženýrských sad pro cílené zpracování procesu.

## 9.7 Shrnutí analytické části

V analytické části byly představeny základní nejdůležitější procesní kroky výroby čipů ve společnosti ONSEMI. Bylo popsáno pracovní prostředí, chování v čistých prostorech, názvy materiálu a pomůcek pro výrobu čipů. Byly představeny informační systémy, které se používají k práci s výrobními sadami. U jednotlivých pracovišť bylo objasněno zpracování a kontroly výrobních sad, až po konečné testování čipu. Identifikovali jsme PC a UP testování, které nám na konci linky ověří funkčnost čipů a případné výpadky testů, které následně ověřuje technolog měření. Byla definována procentuální výtěžnost čipů, a jak se počítá. Byla představena průměrná výtěžnost čipu BH5XX za roky 2019 – 2021, jež poklesla ze standardní výtěžnosti 99 % k hranici 90 % a nižší, což neodpovídá požadavkům zákazníka. Jako poslední věc byly uvedeny limity pro vyřazování desek s čipy z UP testování, jež neakceptuje zákazník.

V další části analytické části bylo cílem zjistit pomocí statistických analýz za pomoci metody statistické regulace procesu a dílčích identifikovaných informací z výrobních procesů faktory snížené výtěžnosti vybraného čipu BH5XX v letech 2019 – 2022. Podrobně jsem si zanalyzoval kritické pracoviště fotolitografie a epitaxní depozice, které jsou klíčové pro výrobu čipu BH5XX. U epitaxního procesu bylo zjištěno pomocí dat z oficiálních statistik z informačního systému, že určitá část epi. reaktorů kvalifikovaných pro danou technologii sledovaného čipu koreluje s výslednou sníženou výtěžností. Byly provedeny první dílčí kroky v podobě omezení zpracování čipu BH5XX na identifikovaných reaktorech. Pomocí analýzy získaných statistických dat z PC testů kritických parametrů z let 2019 - 2022 vyráběného čipu bylo zjištěno, že všechny limity jsou v pořádku ve SPC limitech. U fotolitografického procesu u maskovací úrovně utopené vrstvy, která se testuje na PC testech pod názvem R\_BLayer byla však pomocí trendu dat za pomoci statistického regulačního diagramu v programu Jump zjištěna dvojí distribuce. Pomocí histogramu získaných dat z PC testů bylo zjištěno, že pokud se hodnoty měřené utopené vrstvy R\_BLayer pohybují nad 16 Ohmů v grafu, tak se objevovala snížená výtěžnost na výrobních sadách. Díky těmto podrobným statistickým analýzám byly identifikovaný dva faktory, které ovlivňují



v zájemné kombinaci v procesu výslednou výtěžnost BH5XX čipu a to fotolitografická vrstva utopené a epitaxní depozice na určitých identifikovaných zařízeních.

Analýza současného stavu tak byla podkladem ke zhotovení projektu ke zlepšení výrobního procesu čipu BH5XX.

## 10 CHARAKTERISTIKA PROJEKTU

V této kapitole je vymezen projekt a jeho charakteristika. Díky podrobné analýze bylo zjištěno, že výtěžnost procesu výroby čipu u bipolární součástky BH5XX není dle vedení společnosti dostačující. V rámci nastavené metriky sledování výtěžnosti ve vztahu k interní nekvalitě a spokojenosti zákazníka bylo navrženo, aby byl stanoven projektový tým, který se bude věnovat zvýšení výtěžnosti vybraného čipu. K zlepšení procesu byl definován projekt, který se zaměřuje na zvýšení průměrné výtěžnosti v procesu ve výrobě čipů u součástky BH5XX. Důvodem pro tento projekt je zamezení výpadku testu 11 a 11.1 při finálním testování za využití metody pomocí experimentů (DOE 1, DOE 2). Hlavním cílem realizovaného projektu bylo zlepšit proces výroby a měřitelnou metrikou je hodnota současné průměrné výtěžnosti, která se snížila na průměr 88 % v letech 2019 – 2021 a v rámci realizovaného projektu se očekává zvýšení výtěžnosti nad 99 %.

### 10.1 Definování projektu

Projekt lze definovat jako zlepšení výrobního procesu ve výrobě čipů u čipu BH5XX. Hlavním důvodem byla vyskytující se snížená výtěžnost. Zadavatelem projektu byl vedoucí oddělení inženýrství součástek, který zodpovídá za celkové výtěžnosti všech vyráběných čipů společnosti. Mezi dílčí cíle bylo ověřit pomocí laboratorní analýzy epitaxní proces u DOE 1 a u DOE 2 naladit proces utopené vrstvy pomocí implantačního procesu tak, aby se hodnota odporu pohybovala pod analyzovanou kritickou hodnotu 16 Ohmů u PC testování. Pro účely projektu byl složen tým pro obě DOE z členů technologie, kvality a laboratoře, jež si můžeme uvést níže v tabulce 24 na straně 83.

Členové projektové týmu	Popis pracovní funkce v projektu
Manažer inženýrství součástek	vedoucí projektu, odborný dozor, konzultant
Bc. Zbyněk Žilinský - diplomant, projektový manažer	člen skupiny inženýrství součástek, technolog automatického balení, koordinace DOE 1 a DOE 2, kontrola PC a UP dat pro DOE 1 a 2
Technolog epitaxního procesu	zpracování inženýrské sady na DOE 1
Technolog implantačního procesu	zpracování inženýrské sady na DOE 2
Technik laboratoře	kontrola vrstev epitaxního procesu na základě řezu přes vybrané desky u DOE 1
Kvalitativní komise podniku	člen oddělení kvality, vedoucí výroby, člen oddělení inženýrství součástek, člen oddělení technologie pro schválení změn v procesu

Tabulka 24 Členové projektového týmu (Vlastní zpracování)

Pro lepší přehlednost byl vypracován logický rámec, který je v tabulce 25.

Přínosy	Všeobecné cíle	Objektivně ověřitelné ukazatele	Zdroje ověření
<b>Cíl</b>	Zlepšení procesu ve výrobě čipů u bipolární součástky BH5XX	Zvýšená průměrná výtěžnost	PC a UP data
<b>Účel</b>	Snížení zmetkovitosti desek v kalendářním roce 2022	Nevyřazená deska v druhé půlce roku 2022 na test 11.1	Nástroj pro kontrolu výtěžnosti Tool XX
<b>Výsledky</b>	Výtěžnost nad 99 %	Finální testy 11 a 11.1 v limitech	Mapový editor s finálními mapami a výtěžnostmi
<b>Aktivity</b>	DOE 1 – dělení pomocí epitaxního reaktoru  DOE 2 – úprava implantační dávky	Řez v testovacích obrazcích u epitaxní vrstvy a utopené vrstvy  Změna implantační dávky pro utopenou vrstvu	Kontrola epitaxní vrstvy, utop. vrstvy v laboratoři, kontrola PC a UP dat  Kontrola PC a UP dat po úpravě dávky u prvních 6 sad

Tabulka 25 Logický rámec projektu (Vlastní zpracování)

## 10.2 Harmonogram projektu

Projekt byl zahájen v červenci 2022 a ukončen v září 2022 (tabulka 26), kdy bylo k dispozici dostatek změřených sad pro vyhodnocení DOE 2 a akceptaci kvalitativní komise podniku.

Analytická část projektu	Zodpovědná osoba	Plán plnění	Červenec 2022	Červenec 2022	Srpen 2022	Září 2022	Říjen 2022
Analýza současného stavu	Zbyněk Žilinský	100%	■				
Logický rámec projektu	Zbyněk Žilinský	100%	■				
Složení týmu projektu	Zbyněk Žilinský	100%	■				
Identifikace rizik projektu	Zbyněk Žilinský	100%	■				
Harmonogram projektu	Zbyněk Žilinský	100%	■				
<b>Praktická část projektu</b>							
Založení inženýrské sady pro DOE 1	Zbyněk Žilinský	100%		■			
Zpracování sady pro DOE 1 na epitaxních reatech	Technolog epitaxu	100%		■			
Odebrání 2 desek u DOE 1 po epitaxním procesu	Zbyněk Žilinský	100%		■			
Analýza odebraných desek a jejich vyhodnocení	Technik laboratoře	100%		■			
Odebrání 2 desek u DOE 1 po PC testech	Zbyněk Žilinský	100%		■			
Analýza odebraných desek a jejich vyhodnocení	Technik laboratoře	100%		■			
Založení inženýrské sady pro DOE 2	Zbyněk Žilinský	100%			■		
Zpracování sady pro DOE 2 na implantačních zařízeních	Technolog implantace	100%			■		
Kontrola a vyhodnocení PC a UP dat pro DOE 2	Zbyněk Žilinský	100%			■		
<b>Návrhy pro změnu procesu</b>							
Uvolnění sad pro risk produkci s novou dávkou implantace	Kvalitativní komise	100%				■	
Vyhodnocení risk produkce a schválení kval. komisí	Zbyněk Žilinský	100%				■	
<b>Implementace změn</b>							
Implementace do předpisu	Zbyněk Žilinský	100%					■
Ukončení projektu	Zbyněk Žilinský	100%					■

Tabulka 26 Harmonogram projektu (Vlastní zpracování)

## 10.3 Rizika projektu

Rizika projektu jsem definoval jako proces hrozeb, možného scénáře a jejich pravděpodobnosti zdali nastanou. Použil jsem přitom matici pravděpodobnosti rizik a dopadu dle tabulky 27. Jednotlivé rizikové scénáře a hrozby jsem popsal v příloze P III, které jsem zároveň slovně ohodnotil ve sloupcích pravděpodobností rizika a významnosti dopadu podle matice v tabulce 27, jež jsem si rozdělil na tři kategorie – nízké riziko (NR), střední riziko (SR) a vysoké riziko (VR) u pravděpod. rizika a u významnosti dopadu na vysoký dopad (VD), střední dopad (SD) a nízký dopad (ND). Ve sloupci hodnota rizika je poté průsečík těchto kategorií s následujícím hodnotícím popisem – nízká hodnota rizika (NHR), střední hodnota rizika (SHR) nebo vysoká hodnota rizika (VHR).

Pravděpodobnost rizika	Nastalo a může nastat	Střední riziko 3	Závažné riziko 6	Závažné riziko 9
	Může nastat	Nízké riziko 2	Střední riziko 4	Závažné riziko 6
	Nenastane	Nízké riziko 1	Nízké riziko 1	Střední riziko 4
		1	2	3
		Nízká	Střední	Vysoká
		Významnost rizika (dopad)		

Tabulka 27 Matice pravděpodobnosti a dopadu rizika projektu (Vlastní zpracování)

Kromě vypracované analýzy rizik pro projekt je potřeba uvést i kvantitativní riziko projektu zmetkování inženýrských desek. U DOE 1 se počítalo s 4 inženýrskými deskami na analýzu do laboratoře a u DOE 2 s potenciálním zmetkováním poloviny desek z důvodu experimentálního dělení mezi epitaxní proces a nastavovanou impl. dávku. U druhého DOE 2 se riziko zmenšilo tím, že se zakládalo pouze 12 desek v inženýrské sadě. Pokud by se ani jeden projekt nepovedl a desky by byly všechny na zmetkování, můžeme si vyjadřenou pravděpodobnou hodnotu neuskutečněných výnosů z neproběhnuté tržby ukázat níže v tabulce 28. Kvalitativní komisí bylo v rámci projektu po konzultaci rozhodnuto, že v případě standardní výtěžnosti a distribuce dat u inženýrských desek z DOE 1 či DOE 2 mohou být převedeny na standardní produkční desky.

Projektové experimenty	Počet desek pro experiment	Případné neuskutečněné výnosy z tržeb (z důvodu zmetkování)
DOE 1	25 desek	25 desek x 70 \$ = 1750 \$
DOE 2	12 desek	12 desek x 70 \$ = 840 \$

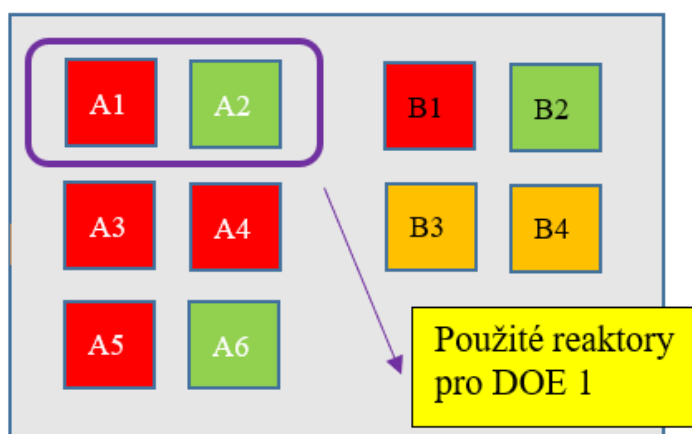
Tabulka 28 Vyčíslení případného neuskutečněného finančního výnosu (Vlastní zpracování)

## 11 PROJEKTOVÉ EXPERIMENTY

Pro zlepšení procesu ve výrobě čipů u bipolární technologie součástky BH5XX bylo v týmu odsouhlaseno, že budou provedeny dva experimenty DOE 1 a DOE 2, které jsou detailně popsány v následujících podkapitolách.

### 11.1 DOE 1 – Dělení pomocí epitaxního procesu

Jako první si budeme definovat DOE 1. Pro tento experiment bylo potřeba založit 25 inženýrskou sadu, se kterou se poté dále pracovalo v procesu. Sada měla identifikační číslo RL9486. Experiment spočíval v tom, že se sada zpracovala na začátku procesu přes kritické úrovně utopené vrstvy fotolitografie, difúzi antimonu utopené vrstvy, rozimplantováním této vrstvy a končila epitaxní depozicí, kde jedna polovina byla zpracována na dedikovaném zakázaném reaktoru A1 a druhá na povoleném A2 (Obrázek 66). Následně byly z každé poloviny sady odebrány desky na analýzu do laboratoře, kde se přes tyto zpracované úrovně udělal řez, a byly zkoumané nanesené vrstvy. Cílem bylo zjistit, zda se zpracování přes tyto reaktory nějak liší, pokud se udělá analýza nanesených vrstev.



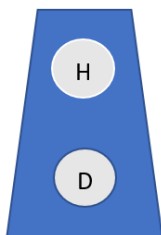
Obrázek 66 Použité epi. reaktory pro DOE 1 (Vlastní zpracování)

Na obrázku 67 můžeme vidět cílené rozdělení desek podle zpracování. Na zařízení A1 jsem požádal zpracovat technologa epitax. procesu desky 1 – 12 a na A2 zbytek 13 – 25. Poté jsem fyzicky i systémově v INNĚ odebral desky 12 a 25 (černé okénka) v obrázku 67.

reaktory u sady	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	
RL9486_A1 reaktor	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■												
RL9486_A2 reaktor														■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

Obrázek 67 Dělení sady dle epi reak. a odebrané desky (Vlastní zpracování)

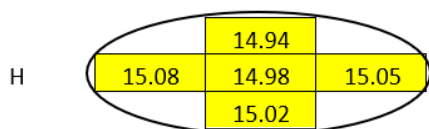
S technologem epitaxního procesu jsem se domluvil na adresném uložení desek na susceptoru pro všechny desky a proměření kritických hodnot odporu, které jsou pro tuto technologii nastaveny v hodnotách  $15 \mu\text{m} \pm 1,3 \mu\text{m}$  po nanesení epitaxní depozice. Susceptor si můžeme představit jako kuželovity tvar s otvory pro přichycení desek. Většinou se používají dvoupatrové pro tuto bipolární technologii s horním a dolním patrem v obrázku 68.



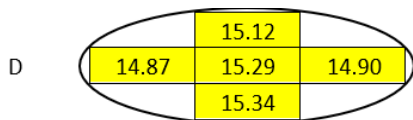
Obrázek 68 Susceptor s horním a dolním patrem (vlastní zpracování)

## 11.2 Výsledky DOE 1

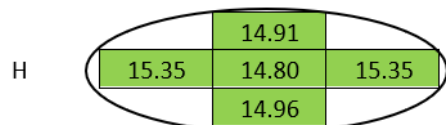
Díky zpracování sady pod dohledem technologa epitaxní depozice jsme se mohli do detailu přesvědčit o změřených hodnotách. I přes to, že reaktor A1 měl historicky nejhorší výsledky, co se týče korelace na snížené výtežnosti, tak při porovnání hodnot zpracování na reaktorech nebyla zpozorována žádná hodnotová anomálie, což se můžeme přesvědčit na průměrných hodnotách naměřených v 5 bodech (levá, pravá, horní a dolní + střední část) na deskách dle předpisu zpracování na obrázcích 69 – 71 na straně 87 a obrázek 72 na straně 88.



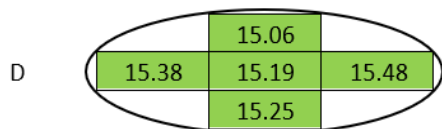
Obrázek 69 Horní patro s průměr. hodnot. na desce u A1 reakt. (Vlastní zpracování)



Obrázek 70 Dolní patro s průměr. hodnot. na desce u A1 reakt. (Vlastní zpracování)



Obrázek 71 Horní patro s průměr. hodnot. na desce u A2 reakt. (Vlastní zpracování)



Obrázek 72 Dolní patro s průměr. hodnot. na desce u A2 reakt. (Vlastní zpracování)

Tolerance depozice epitaxu je  $15 \mu\text{m} \pm 1,3 \mu\text{m}$ , takže prověření hodnot odporu u námi kritického epitaxního reaktoru A1 dopadla v limitu. U povoleného A2 reaktoru se hodnoty také pohybovaly v limitu a nelze vysledovat žádné výrazné rozdíly v nanesené depoziční dávce epitaxu. Prověření od technologa epi. procesu tedy proběhlo v pořádku a tak jako další potvrzení, že depozice je v pořádku či se liší dle použitého zařízení, byly výsledky z laboratoře.

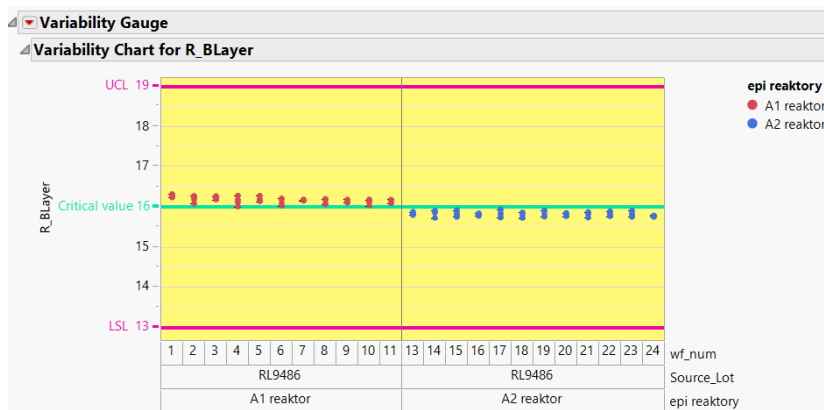
Po laboratoři jsem chtěl zjistit v řezu desky u epitaxní vrstvy, zda se výrazně liší koncentrace, jež byla nadeponovaná a tím si potvrdit, že reaktory pracují odlišně a tím nám vzniká neshoda ve výrobním procesu. Vzhledem k tomu, že v laboratoři pro analýzu s čipy nepracují a odborné analýzy jsou mimo oblast mé diplomové práce, mohu z výsledku analýzy pouze konstatovat zprávu z laboratoře, že ani v řezu odebraných desek 12 a 25 se neliší koncentrace epitaxního reaktoru. Naopak u koncentrace utopené vrstvy, námi známé jako R\_BLayer při závěrečném PC měření se určitá odlišnost mezi deskami 12 a 25 našla, což nám potvrdilo hypotézu, že epitaxní reaktor dokáže ovlivnit naimplantovanou utopenou vrstvu. Inženýrskou sadu jsem poté nechal pokračovat dále procesem až na konec linky, kde jsem opět fyzicky nechal odebrat desky ze sady k analýze v laboratoři. Opět z části zpracované na A1 rektoru (deska 2) a A2 reaktoru (deska 24) na obrázku 73.

reaktory u sady	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	
RL9486_A1 reaktor	red	tan	red	red	red	red	red	red	red	red	red	black														
RL9486_A2 reaktor													green	green	green	green	green	green	green	green	green	green	green	green	tan	black

Obrázek 73 Odebrané desky 12 a 24 pro DOE 1 po PC testech (Vlastní zpracování)

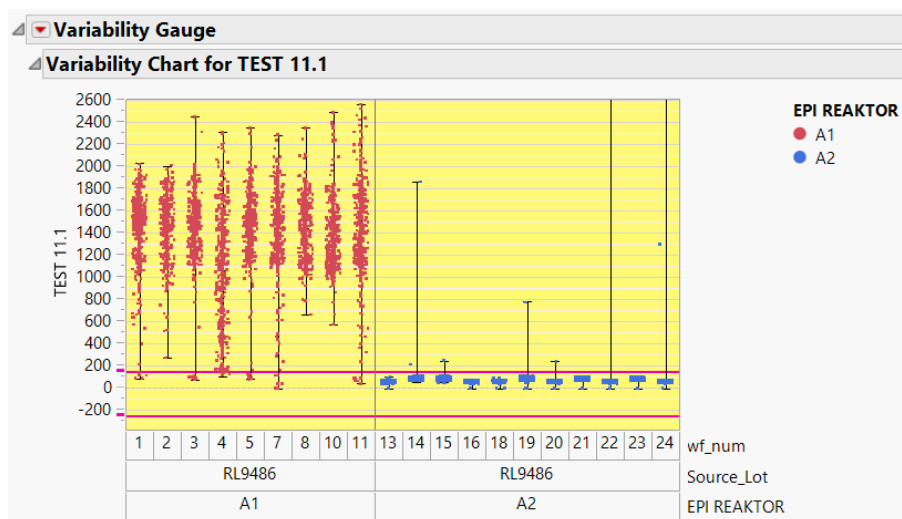
Z analýzy desek 2 a 24 v laboratoři opět vyplynulo, že i po celém procesním zpracování až k PC a UP testům se koncentrace epitaxní depozice nezměnila a obě desky je mají i přes zpracování na odlišném reaktoru stejný. Naopak mírný posun lze vyzorovat u naimplantované utopené vrstvy do inženýrských desek u obou analyzovaných desek. Následně jsem si analýzou dat z PC testování v programu Jump u zbylých desek hypotézu potvrdil u parametru R\_BLayer (Obrázek 74) na straně 89 pomocí stáhnutých dat z HP zařízení.





Obrázek 74 Graf R\_BLayer utopené vrstvy u sady RL9486 z DOE 1 (Vlastní zpracování)

V grafu na obrázku 74 vidíme sice mírně, ale zvýšenou hodnotu utopené vrstvy R\_BLayer opět nad kritickou hodnotou 16 Ohmů. Sadu jsem tedy ze zbylými deskami změřil na HP zařízení pro ověření procentuální výtěžnosti. Z UP závěrečného měření všech čipů na deskách můžeme vidět (Obrázek 75) totální výpadek mimo limity na kritický zúžený test 11.1 u desek 1 – 11 v grafu, které byly zpracovány přes A1 epi. reaktor a naopak standardní distribuci u desek, které byly zpracovány na epi. reaktoru A2.



Obrázek 75 Test 11.1 u sady RL9486 z DOE 1 z UP testování (Vlastní zpracování)

Inženýrskou sadu jsem si na hrotovém měření sám nastavil na HP zařízení, zorientoval a nastavil potřebný přítlak tak, abych měl jistotu ve správné nastavení. Již při měření jsem si na displeji monitoru vedle HP zařízení mohl všimnout, že desky 1 – 11 vypadávají na zúžený kritický test 11.1. Tedy polovina desek, která se zpracovala přes epitaxní reaktor A1. Zbylé desky 13 – 24 tyto výpadky neměly, přesně tak jak jsem predikoval. Sadu jsem kompletně změřil, ať jsem si mohl zanalyzovat data v Jumpu a procentuální výtěžnost desek. V souhrné tabulce výtěžnosti v tabulce 29 na straně 90 vidíme, že všechny desky zpracované na

epitaxním reaktoru A1 byly pod vyřazovacím limitem, jež akceptuje zákazník a desky na konci byly vyzmetkovány. Zbylé desky 13 – 23, které neměly výpadky jsem převedl v inf. systému INNA na produkční výrobní desky a nechal expedovat. Zde nebyla vypořádána žádná nestandardnost během zpracování. Celkovou ztrátu z DOE 1 bylo nakonec 14 zmetkovaných desek. 4 desky byly během procesu odeslány do laboratoře na prozkoumání vrstev, jež byly nadeponovány. Zbýlých deset desek se vyřadily po UP testování. Díky této analýze, která nám potvrdila hypotézu o dvou faktorech ovlivňující výtěžnost čipu jsem se rozhodnul pro další DOE 2, které budu podrobněji vysvětlovat v následující kapitole.

Číslo desky	Výtěžnost	Epi reaktor
1	1.41	A1
2	0	A1
3	0.2	A1
4	10.71	A1
5	1.01	A1
6	0	A1
7	0.2	A1
8	0	A1
9	0.2	A1
10	0	A1
11	0.4	A1
13	99.98	A2
14	99.98	A2
15	99.99	A2
16	99.99	A2
17	99.89	A2
18	99.98	A2
19	99.98	A2
20	99.96	A2
21	99.99	A2
22	99.97	A2
23	99.98	A2
24	99.92	A2

Tabulka 29 Výtěžnost sady RL9486 z DOE 1 (Vlastní zpracování)

### 11.3 DOE 2 – Změna implantační dávky utopené vrstvy

Proces výroby čipu BH5XX prochází na začátku výroby kritickými výrobními operacemi jako je fotolitografický proces, difúzní proces, implantační proces nebo námi stále probíraný epitaxní proces. Fotolitografický proces nám u první úrovně vytvoří na čipu svoji maskou místo pro tzv. okénka, kde chceme následně nadifundovat za vysoké teploty a poté rozimplantovat za pomoci vysoké energie tzv. utopenou vrstvou, což je první krok k zahájení vytvoření čipu na křemíkové desce. V DOE 1 se nám potvrdilo, že při nižší naměřené hodnotě R\_BLayer pod 16 Ohm se výpadky na test TEST 11 a 11.1 nevyskytovaly. Proto jsem se v DOE 2 rozhodl pro cílené zpracování sady tentokrát za pomoci implantačního a epitaxního procesu.

### 11.3.1 Plán DOE 2

Plán pro DOE 2 byl nastavit impl. dávku utopené vrstvy tak, abychom se pohybovali v hodnotách okolo 15 Ohmů při měření na PC testování u krit. param. R\_BLayer. Výsledkem poté měly být srovnatelné výtěžnosti u povoleného a zakázaného epi. reaktoru po ověření na UP testování. Pro DOE 2 jsem navrhnul založit pouze 12 deskovou inženýrskou sadu s ident. číslem RL9701 a zpracovat na dedikovaných epitaxních zařízeních a s různými implantačními dávkami pro utopenou vrstvu. V tomto experimentu jsem využil zpracování pod odborným dohledem technologů epitaxního a implantačního procesu. V tabulce 30 níže se můžeme podívat, jak jsem navrhl rozdělení desek dle zpracování na epi. reaktorech, u nichž jsem vybral opět zakázaný A1 a povolený A2 dle layoutu v obrázku 66 na straně 86.

Skupina desek pro DOE 2 (RL9701)	Epitaxní reaktory
1-2	A1
3-4	A2
5-6	A1
7-8	A2
9-10	A1
11-12	A2

Tabulka 30 Rozdělení desek pro epitaxní reaktory pro DOE 2 (Vlastní zpracování)

U DOE 2 jsem dopředu nepočítal s fyzickým odebráním desek pro analýzu v laboratoři, tak jako u DOE 1 během procesu výroby a tím již předem predikované zmetkování desek. Velice důležitým rozdělením na skupiny desek bylo dle predikce implantované dávky pro utopenou vrstvu, poněvadž cílem druhého DOE 2 bylo nastavit takovou impl. dávku, kdy se budeme pohybovat u kritického parametru R\_BLayer při PC testování v hodnotách cílených na 15 Ohmů.

Standardní impl. dávka u součástky BH5XX je v předpisu v dokument serveru 2.80E+15, což je hodnota, která byly zavedena při kvalifikaci součástky do portfolia ONSEMI v předešlých letech. Následné rozdělení desek a návrh dávek od technologa implantačního procesu si můžeme lépe zobrazit v tabulce v tabulce 31 na straně 92. Klíčové pro DOE 2 byly především výsledky desek 5 – 8, kde měla dle predikce výtěžnost vyjít nad 99 % u všech desek bez rozdílu zpracování na povoleném či zakázaném epi. reaktoru.

Skupina desek pro DOE 2	Zpracování	Implantovaná dávka	Cíl PC par. R_BLayer	Predicke výsledku DOE 2
1-2	standard	2.80 E+15	15.8 ohm	Snížená výt.
3-4	standard	2.80 E+15	15.8 ohm	Standard. výt.
5-6	Nová dávka	3.08 E+15	15 ohm	Standard. výt.
7-8	Nová dávka	3.08 E+15	15 ohm	Standard. výt.
9-10	Nová dávka	2.52 E+15	16.5 ohm a vyšší	Snížená výt.
11-12	Nová dávka	2.52 E+15	16.5 ohm a vyšší	Snížená výt.

Tabulka 31 Návrh implantačních dávek pro DOE 2 (Vlastní zpracování)

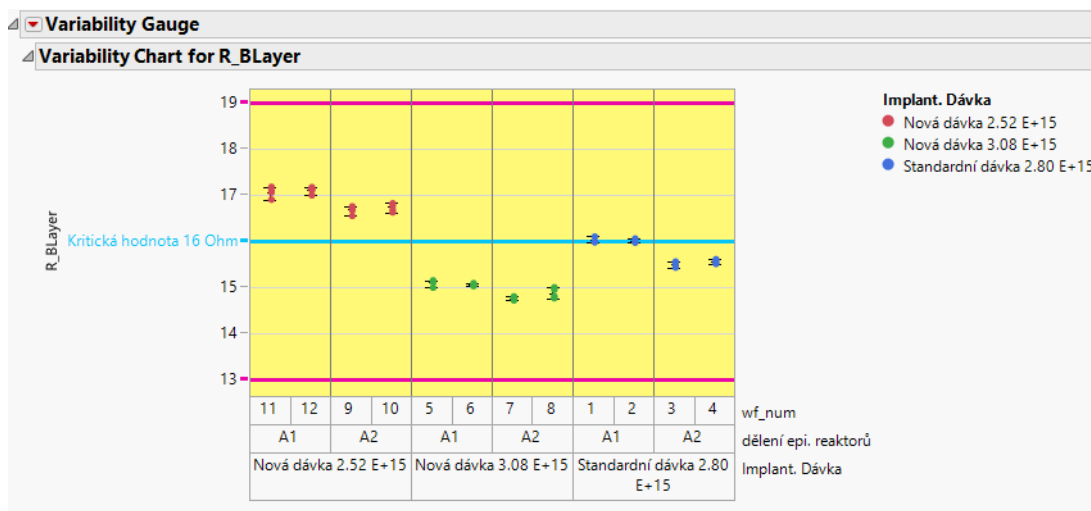
Inženýrskou sadu RL9701 jsem tedy požádal zpracovat pod dohledem u epitaxního i implantačního procesu technologem. Tyto procesní kroky jsou prakticky na začátku zpracování čipu BH5XX. Zde jsem se dohodl, že v případě úspěšného zpracování se může sada poslat na další zpracování, dle výrobního postupu.

Po zpracování u obou procesních kroků jsem následně po konzultaci s technologií dostal kladné vyjádření z navrhovaného a zpracovaného postupu dle tabulek 30 a 31 a sada tak mohla dalšími kroky postupně doputovat až k testování PC a UP.

### 11.3.2 Analýza PC dat pro DOE 2

U analýzy PC dat jsem opět využil dat změřených na zařízení HP. Sadu jsem si opět přichystal a změřil samostatně dle nastavení. Změřené hodnoty jsem si opět poté stáhl a zpracoval v excelu a rozdělil dle implant. dávek pro všechny kritické parametry a epitaxních reaktorů. Poté jsem jako výstup dat využil Jumpu pro zobrazení v grafech a barevně odlišil. U kritického par. R\_Blayer (obrázek 76, strana 93) jsem zjistil, že z predikovaných a cílených hodnot odporu utopené vrstvy u sledovaných desek 5 – 8 pro požadovanou cílenou hodnotu na 15 Ohmů se zpracování úspěšně povedlo. Desky 5 – 6 mají sice nepatrně vyšší hodnoty, ale stále jsou hluboko pod kritickou hodnotou 16 Ohmů, která nám ovlivňovala výtěžnost součástky. U standardní dávky jsem vyzoroval také mírně zvýšené hodnoty u epi. reaktoru A1 u desek 1 – 2. U desek 3 – 4, které se zpracovaly standardně a na povoleném rektoru A2 lze upozorovat hodnoty okolo 15,5 Ohm. U těchto desek se dá predikovat u finálního UP měření dobrá výtěžnost. U desek 9 – 12, kde se impl. dávka nastavila tak, aby odpor L\_Blayer byl co nejvyšší, se dá očekávat výpadky měření a potenciální zmetkování všech 4 desek. Zde se hodnoty pohybovaly okolo 16,5 Ohmů, tedy mimo standardní trend.

Celkově z hodnot v grafu v obrázku 76 u PC dat krit. par. R\_Blayer lze zhodnotit výsledky jako podařené pro projekt k experimentu DOE 2. Následující analýza u UP měření nám hypotézu o zlepšení výrobního procesu po posunutí k hodnotám 15 Ohmů potvrdí nebo vyvrátí. Samozřejmě bylo potřeba ještě zkontrolovat zbylé kritické parametry (viz. Příloha P IV) také v grafech. Pokud by se zde objevil nějaký znatelný posun hodnot, muselo by se hledat další řešení v projektu.



Obrázek 76 Utop. vrstvy u sady RL9701 dle imp. dávek pro DOE 2 (Vlastní zpracování)

U zbylých krit. par., které můžeme zpozorovat v příloze IV lze konstatovat, že změna implantační dávky neměla žádný vliv na posun v kontrolovaných SPC limitech. Díky této kontrole jsem sadu po analyzování PC dat mohl nechat změřit na zařízení HP pro UP data, kde mě zajímaly především výtěžnosti u desek 5 – 8.

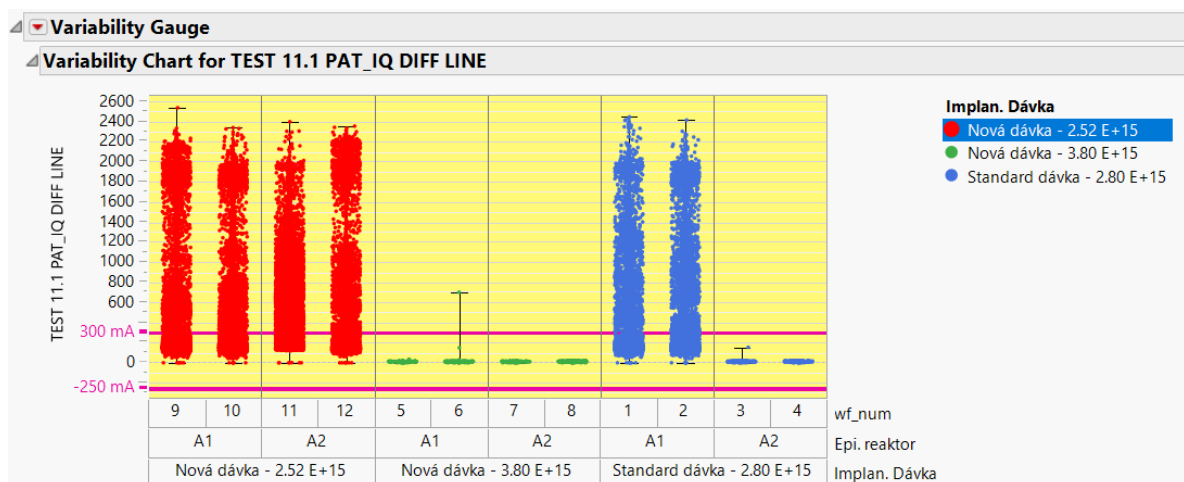
### 11.3.3 Analýza UP dat pro DOE 2

Jako poslední krok pro úspěšné absolvování DOE 2 byla kontrola UP dat z hrotového měření všech čipu na deskách 1 – 12 u sady RL9701. Podle predikce v tabulce 31 na straně 92 měla být polovina desek (1 - 2 a 9 - 12) se sníženou výtěž. a zbylá část (3 - 8) se standardní výtěžností přes 99 %. Pokud by výsledky takto nedopadly, byl by celý projekt neúspěšný a muselo by se hledat jiné řešení či navrhnutí dalšího DOE.

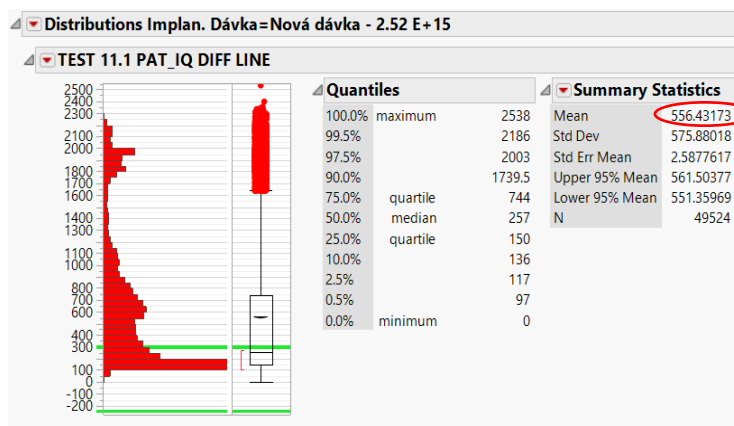
V analyzování jsem se opět zaměřil na kritické testy 11 a 11.1, kde druhý zmíněný test je v podstatě zúžený limit testu 11. Proto jsem využil stáhnutí pouze hodnot testu 11.1, který obsahuje všechny důležité testy pro námi vyráběný čip, jež požaduje zákazník ověřit před převzetím.

Sadu jsem si opět sám změřil na HP zařízení, včetně optimálního nastavení přítlaku otisků hrotů a dalších nezbytných kroků. Poté jsem si stáhl naměřená data z počítače do excelové

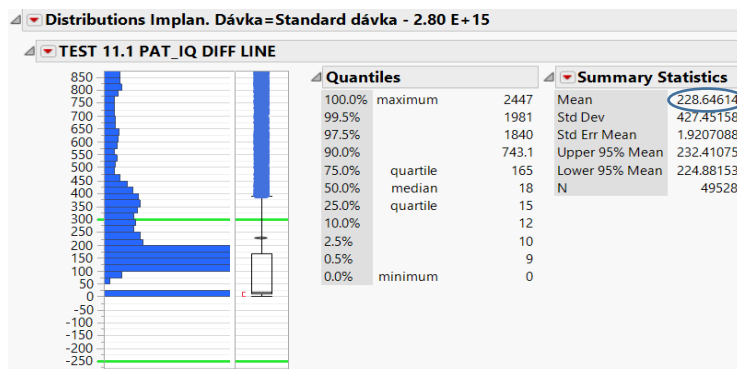
tabulky a začal jsem s úpravou pro výstup grafů v Jumpu. Již během měření od první desky po poslední jsem na monitoru v mapovém editoru mohl sledovat výpadky měření u desek. Dle predikce se vyskytly u desek 1 – 2 a 9 – 12, naopak u desek 3 – 8 jsem tyto výpadky nezpozoroval. V obrázku 77 níže v grafu z Jumpu se můžeme přesvědčit o naměřených hodnotách testu 11.1 pro desky 1 – 12 a v dalších obrázcích 78 – 80 na str. 94 - 95 v histogramech o naměřených průměrných hodnotách pro test 11.1.



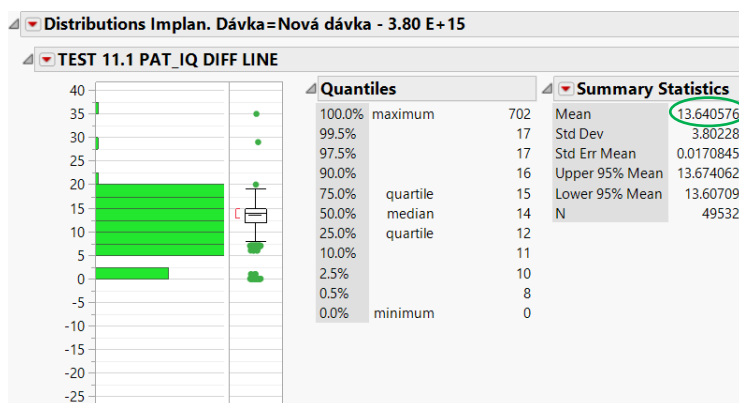
Obrázek 77 Hodnoty testu 11.1 pro sadu RL9701 u DOE 2 dle impl. dávek (Vlastní zpracování)



Obrázek 78 Histog. testu 11.1 pro DOE 2 při impl. dávce 2.52 E+15 (Vlastní zpracování)



Obrázek 79 Histog. testu 11.1 pro DOE 2 při impl. dávce 2.80 E+15 (Vlastní zpracování)



Obrázek 80 Histog. testu 11.1 pro DOE 2 při impl. dávce 3.80 E+15 (Vlastní zpracování)

Z uvedeného grafu v obrázku 77 na straně 94 a níže v histogramech u obrázků 78 – 80 u hodnot pro test 11.1 při jednotlivých impl. dávkách lze zřetelně rozpoznat, že DOE 2 splnilo svůj požadovaný účel. Naměřené hodnoty v grafu pro desky 5 – 8 pro novou impl. dávku 3.80 E+15 jsou v úzkém distribučním pásmu, srovnatelné a ve SPC limitu pro oba epi. reaktory. V histogramu pro novou dávku v obrázku 80 lze vyzorovat, že naměřené hodnoty u desek 5 – 8 se pohybovaly v průměru okolo 13 mA, což je hluboko ve SPC limitech (-250 mA – 300 mA). U standardní dávky implantace utopené vrstvy 2.80 E+15 lze vyzorovat zvýšenou průměrnou hodnotu testu na 228 mA, což značí, že desky 3 a 4 jsou sice dle predikce ve SPC limitech u testu 11.1, naopak desky 1 a 2 v kombinaci se zakázaným epi. reaktorem A2 a standardní dávkou má hodnoty více mimo distribuci. U poslední skupiny desek 9 – 12 (Obrázek 78, strana 94), kde se impl. dávka utopené vrstvy zadala na hodnotu 2.52 E+15 lze jednoznačně vidět, že všechny desky jsou mimo stand. distribuci, ať byly zpracovány přes povolený či zakázaný epi. reaktor. Celkové výtěžnosti jednotlivých desek si můžeme zobrazit níže v tabulce 32 na straně 96.

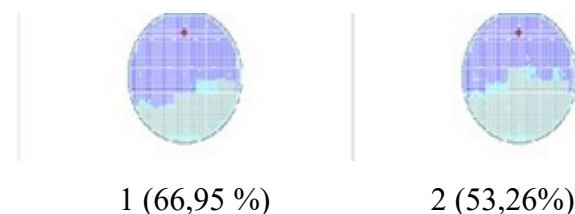
Číslo desky	Zpracování impl. dávky	Implantovaná dávka	Výtěžnost desek	Predicke výsledku DOE 2
1	Standard dávka	2.80 E+15	66,95 %	Snížená výt.
2	Standard dávka	2.80 E+15	53,26 %	Snížená výt.
3	Standard dávka	2.80 E+15	99,97 %	Standard. výt.
4	Standard dávka	2.80 E+15	99,91 %	Standard. výt.
5	Nová dávka	3.08 E+15	99,96 %	Standard. výt.
6	Nová dávka	3.08 E+15	99,98 %	Standard. výt.
7	Nová dávka	3.08 E+15	99,98 %	Standard. výt..
8	Nová dávka	3.08 E+15	99,97 %	Standard. výt.
9	Nová dávka	2.52 E+15	58,23 %	Snížená výt.
10	Nová dávka	2.52 E+15	57,26 %	Snížená výt.
11	Nová dávka	2.52 E+15	8,37 %	Snížená výt.
12	Nová dávka	2.52 E+15	50,31 %	Snížená výt.

Tabulka 32 Dělení impl. dávek pro DOE 2 s výslednými výtěžnostmi (Vlastní zpracování)

Vzhledem k tomu, že desky 3 – 8 měly vynikající výtěžnost přes 99 %, mohl jsem dané desky po požadavku kvalitativní komise ONSEMI nechat převést v inf. systému INNA na výrobní sadu a nechat expedovat zákazníkovi. Ostatní desky jsem nechal zmetkovat. Díky výsledkům z DOE 2 jsem zároveň mohl požádat komisi kvality společnosti o implementaci do předpisu s novou impl. dávkou.



Obrázek 81 Ukázka map změřených desek 5 – 8 s procen. výtěžností přes 99% pro impl. dávku 3.08 E+15 (Vlastní zpracování)



Obrázek 82 Ukázka map změřených desek 1 – 2 s nižší procen. výtěžností pro standardní impl. dávku 2.80 E+15 (Vlastní zpracování)



## 12 IMPLEMENTACE DO PŘEDPISU

Na základě úspěšného DOE 2 v projektu na zlepšení výrobního procesu jsem pro samotné zavedení do výrobního předpisu pro čip BH5XX musel ještě předstoupit s výsledky experimentu před kvalitativní komisí ONSEMI s požadavkem o změně impl. dávky. Tato komise se skládá z vedoucích oddělení technologie, výroby, servisu, inženýrství součástek a kvality, která schvaluje na základě podkladů ze zkoušek či experimentů od technologů, servisu a jiných zaměstnanců změny do výrobních předpisů. Výsledky výtěžností u sady RL9701 jsem zpracoval a předstoupil v Powerpointové prezentaci před komisí. Po vyslechnutí a zobrazení informací a dat v prezentaci jsem komisi požádal o zpracování tzv. rizikové produkce výrobních sad. Riziková produkce je vlastně vytvořený seznam sad, který může být zpracován již s novou navrhovanou změnou v technologickém postupu výroby čipu. Komise na můj návrh přistoupila s podmínkou výstupu výsledků dat v prezentaci po zpracování rizikové produkce po PC a UP testování.

### 12.1 Riziková produkce

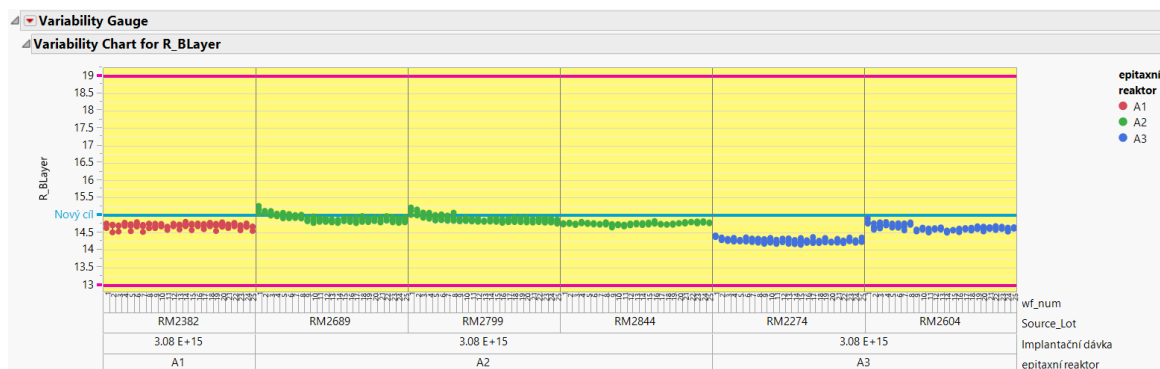
Rizikovou produkci jsem si založil jako seznam sad v tabulce 33 na straně 98 pro daný čip BH5XX, který může být zpracován již s novou změnou v technologickém postupu výroby čipu. Sady jsem si sledoval v dispečerovi v INNĚ a všechny jsem tzv. holdoval před procesním krokem implantace pro cílené zpracování s novou impl. dávkou utopené vrstvy. S technologem epitaxního procesu jsem se zároveň domluvil na uvolnění zakázaných epi. reaktorů do výroby, tak ať přes tyto reaktory můžeme také zpracovat rizikovou produkci výrobních sad. Pokud by byly výsledky u sledovaných sad z tabulky 33 na straně 98 v pořádku dle predikce, může se tato změna definitivně zavést do předpisu. V rizikové produkci v tabulce 33 jsem záměrně zvolil epitaxní reaktory s nejhoršími výsledky procentuální výtěžnosti A2 a A3 (červeně označeny) a u jedné sady jsem ponechal povolený A1 (zeleně označeny).

RIZIKOVÁ PRODUKCE			
Číslo produkční sady pro čip BH5XX pro rizikovou produkci	Implantační dávka	Epitaxní reaktor	Predikce výtěžnosti
RL2844	3.08 E+15	A2	Standard. výt. (přes 99 %)
RL2799	3.08 E+15	A2	Standard. výt. (přes 99 %)
RL2689	3.08 E+15	A2	Standard. výt. (přes 99 %)
RL2604	3.08 E+15	A3	Standard. výt. (přes 99 %)
RL2274	3.08 E+15	A3	Standard. výt. (přes 99 %)
RL2382	3.08 E+15	A1	Standard. výt. (přes 99 %)

Tabulka 33 Tabulka se sadami rizikové produkce (Vlastní zpracování)

## 12.2 Kontrola PC a UP dat

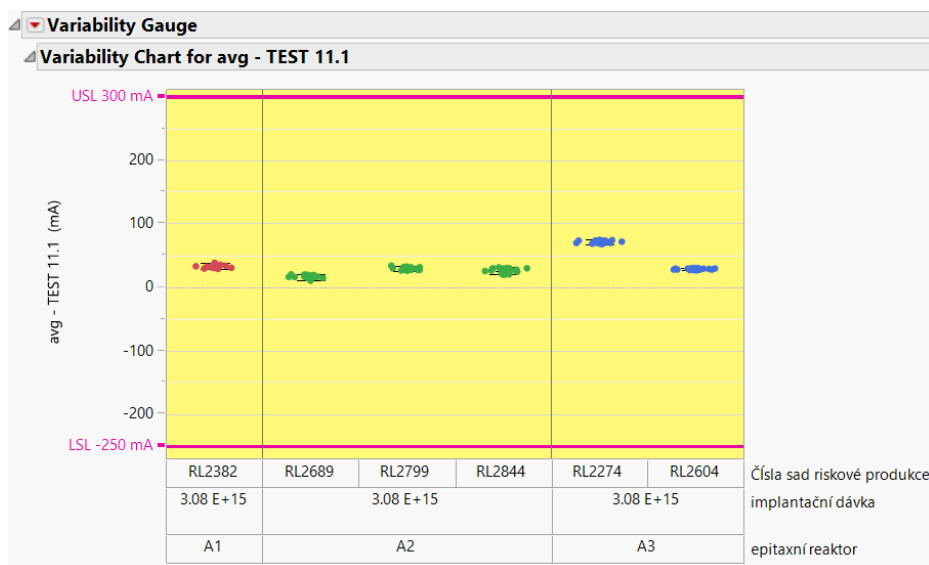
Rizikovou produkci jsem si na základě holdování sad a s přiřazenou zvýšenou prioritou sledoval v dispečerovi dle procesních kroků až k doputování k PC a UP testování. Zde jsem si sady sám nastavil a změřil dle postupu na zařízeních HP a postupně stahoval data. Během testování UP jsem již pouhým pozorováním viděl na monitoru v mapovém editoru měřené čipy a jejich průběžnou výtěžnost. Veškerá výtěžnost u všech šesti sad se pohybovala nad 99 % i u dříve zakázaných epit. reaktorů. Jednotlivou kontrolu sledovaného param. R\_BLayer v PC testování (Obrázek 83) a případných výpadků v testu 11.1 (obrázek 84) na straně 99 si můžeme zobrazit níže.



Obrázek 83 Utopená vrstva R\_BLayer z PC testů z rizikové produkce (Vlastní zpracování)

V grafu v obrázku 83 z PC testování par. R\_BLayer vidíme, že u všech 6 sad z rizikové produkce se pohybujeme na hranici 15 Ohmů, což mělo následně pozitivní dopad na měření

u testu 11.1 z UP testování (Obrázek 84) a celkovou procentuální výtěžnost, což můžeme vypočítat v tabulce 34. U měřených desek se nevyskytly žádné výpadky na test 11.1 a výtěžnost se pohybovala nad 99 % u všech 6 sad rizikové produkce i bez rozdílu zpracování dle epitaxních reaktorů. Test 11.1 jsem zpracoval do grafu v Jampu stáhnutím průměrných hodnot testu 11.1 na 1 výrobní desku z důvodu vysokého množství měřených hodnot na desce (přes 13000 čipů), což by při 6 sadách po 25 deskách znamenalo zpracovat přes statisíce řádků.



Obrázek 84 Průměrné hodnoty testu 11.1 pro rizikovou produkci (Vlastní zpracování)

VÝTĚŽNOST RIZIKOVÉ PRODUKCE		EPITAXNÍ REAKTOR
RL2844	99,72 %	A2
RL2799	99,72 %	A2
RL2689	99,31 %	A2
RL2604	99,75 %	A3
RL2274	99,51 %	A3
RL2382	99,61 %	A1

Tabulka 34 Procentuální výtěžnosti BH5XX pro rizikovou produkci (Vlastní zpracování)

V Tabulce 34 na straně vidíme, že všechny sady z rizikové produkce s novou dávkou impl. dávky utopené vrstvy a zpracované napříč zakazanými či povolenými reaktory se výtěžnost

pohybovala nad 99%, což mi dalo prostor k prezentaci výsledků a schválení od kvalitativní komise ONSEMI.

### **12.3 Schválení a integrace do předpisu**

Data z měření UP a PC jsem zpracoval pro komisi kvality opět do powerpoint. prezentace a okomentoval na začátku září 2022. Na základě pozitivních výsledků jsem následně dostal schválení od všech členů kvalit. komise a mohl jsem požádat o integraci do informačních systému a předpisu zpracování (např. INNY a Dokument serveru) ONSEMI pro změnu výrobního procesu. Integrace proběhla v pořádku v průběhu září 2022.

## 13 ZHODNOCENÍ PROJEKTU

Projekt pro zlepšení procesu výroby čipů dopadl na základě výsledku z DOE 2 s pozitivním výsledkem. Změna implantační dávky utopené vrstvy, která nám měla snížit trend PC krit. parametru R\_Blayer se po změně z hodnot 2.80 E+15 na 3.08 E+15 povedl. Hodnoty se s novou dávkou pohybují při měření na hranici  $\pm 15$  Ohmů, což je pod kritickou hranici 16 Ohmů. Následně se u UP testování potvrdilo, že se i u dělených desek ze sady RL9701 dle epitaxních rektorů na povolený (A2) a zakazány (A1) u obou skupin pohybovala procentuální výtěžnost přes 99 %.

### 13.1 Náklady projektu

V rámci mé pracovní pozice v projektu i kolegů technologů a kvalitativní komise je zlepšování procesu výroby v popisu naší práce.

### 13.2 Finanční zhodnocení po zlepšení procesu

Projekt na zlepšení výrobního procesu byl úspěšně v září 2022 ratifikován do předpisu a od září do prosince 2022 jsem si mohl ještě kontrolovat výtěžnosti sad s novou impl. dávkou, tak ať jsem si mohl finančně analyzovat případné zmetkování desek za celý rok 2022. Pokud bychom se podívali na roky 2019 – 2021, kdy jsem výše v tabulkách uváděl počty zmetkovaných desek za rok při průměrné hodnotě desky cca 70 \$., tak po zavedení změny implantační dávky se nám počet zmetkovaných desek snížil na konečné číslo 46 desek za rok 2022 při celkovém založení 26 vyr. sad. Avšak ze 46 desek bylo 20 inženýrských desek z DOE 1 a DOE 2, což můžeme počítat jako s cíleným zmetkováním. Proto lze z tabulky vyčíst, že neuskutečněné výnosy z tržeb vyráběného čipu BH5XX v roce 2022 se snížily na 1/3 (Tabulka 35) oproti letům 2019 - 2021, takže projekt na zlepšení výrobního procesu měl i z finančního hlediska smysl.

Rok	Počet zmetkovaných desek BH5XX za daný rok (1 deska BH5XX = 70 \$)	Neuskutečněné výnosy z výroby BH5XX
2019	150 desek	10500 \$ (150 desek * 70 \$)
2020	135 desek	9450 \$ (135 desek * 70 \$)
2021	126 desek	8820 \$ (126 desek * 70 \$)
2022	46 desek	3320 \$ (46 desek * 70 \$)

Tabulka 35 Finanční zhodnocení v letech 2019 – 2022 pro čip BH5XX (Vlastní zpracování)

## ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo pomocí projektu zlepšit výrobní proces ve výrobě čipů u produktu BH5XX ve společnosti ONSEMI. Dílčí cíle byla analýza snížené výtěžnosti vybraného čipu, odhalení faktorů snížené výtěžnosti, následný návrh úpravy výrobního procesu a implementaci do výrobního postupu. Práce byla rozdělena na teoretickou a praktickou část.

V teoretické části byla provedena řešerše literárních a elektronických zdrojů z výroby křemíkových desek s čipy a jeho procesních kroků, která se stala následně podkladem pro praktickou část diplomové práce.

V praktické části byla nejdříve analyzována výroba čipu ve společnosti ONSEMI s nejdůležitějšími procesními kroky, specifikami výrobního prostředí a zařízeními na kterých se zpracovávají produkty. Pomocí statistické regulace procesu s pomocí regulačních diagramů byly odhaleny faktory, které ovlivňovaly zpozorovanou sníženou výtěžnost u výrobních sad s čipy – epitaxní proces a hodnota utopené vrstvy po závěrečném testování funkčnosti čipu. Pomocí vypracovaných histogramů z testování čipů byla ukázána kritická hodnota jednoho z faktorů – utopené vrstvy. Na základě statistických dat z procesu a měření funkčnosti čipu bylo rozhodnuto o vytvoření projektu na zlepšení procesu.

V projektové části jsem využil metodu DOE, která umožnila zkoumat vliv více faktorů na výstupní charakteristiky procesu. Projektová část byla rozdělena na dva experimenty (DOE 1 a 2). U prvního DOE 1 byla zpracována celá sada a po epitaxním procesu se analyzovaly odebrané desky v laboratoři. Poté se odebraly k laboratornímu analyzování desky ze sady na konci výrobního procesu. Bylo potvrzeno, že faktory ovlivňující snížené výtěžnosti byly epitaxní proces a hodnota utopené vrstvy s kritickou hranicí nad 16 Ohmů po PC testování. U DOE 2 byla již cíleně zpracována inženýrská sada s upravenou implantační dávkou utopené dávky, jež byla cílena na 15 Ohmů. Po následných procesních krocích a testování se potvrdilo, že nová implantační dávka s hodnotou  $3.08 \text{ E}+15$  je klíčem k zlepšení procesu. Po úspěšných výsledcích DOE 2 bylo rozhodnuto kvalitativní komisi o zpracování rizikové produkce. I zde se potvrdila hypotéza o nové úpravě implantované dávky utopené vrstvy a po pozitivních výsledcích výtěžnosti vyráběného čipu se následně implementovala do výrobního předpisu. Zároveň byl tento projekt na zlepšení výrobního procesu úspěšný i z finálního hlediska, poněvadž se počet zmetkovaných desek snížil za rok 2022 na třetinu oproti minulým rokům.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

AHMAD, Ishad. *Ion Implantation - Research and Application*. Rijeka: InTechOpen, 2017, 152 s. ISBN 978-953-51-3237-0

BARILLA, Jiří, Pavel SIMR a Květuše SÝKOROVÁ. *Microsoft Excel 2016: podrobná uživatelská příručka*. Brno: Computer Press, 2016. Podrobná uživatelská příručka. ISBN 978-80-251-4838-9.

BERÁNEK, Jaromír. *Moderní řízení hotelového provozu*. 5., zcela přeprac. vyd. Praha: MAG Consulting, 2013. ISBN 978-80-271-9360-8.

DOLEŽAL, Jan, Jiří KRÁTKÝ a Ondřej CINGL. *5 kroků k úspěšnému projektu: 22 šablon klíčových dokumentů a 3 kompletní reálné projekty*. Praha: Grada, 2013. Management (Grada). ISBN 978-80-247-4631-9.

DOLEŽAL, Jan. *Projektový management: komplexně, prakticky a podle světových standardů*. Praha: Grada Publishing, 2016. Expert (Grada). ISBN 978-80-247-5620-2.

DOLEŽAL, Jan. *Projektový management*. 2. vydání. Praha: Grada Publishing, 2023. Expert (Grada). ISBN isbn978-80-271-3619-3.

DRÁPALA, Jaromír a Miroslav KURSA. *Elektrotechnické materiály: učební text*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2012. ISBN isbn978-80-248-2570-0.

CHAJDA, Radek. *Velká kniha mladého technika*. V Brně: Edika, 2018. ISBN 978-80-266-1332-9.

CHLEBOVSKÝ, Vít. *Management zákaznických řešení: jak efektivně tvořit a spravovat individualizovaná řešení zákaznických potřeb*. První vydání. Praha: Grada, 2017. Manažer. ISBN 978-80-271-0559-5.

JANÁČEK, Julius. *Statistika jednoduše: průvodce světem statistiky*. Praha: Grada Publishing, 2022. ISBN 978-80-271-1738-3.

JAROŠOVÁ, Eva a Darja NOSKIEVIČOVÁ. *Pokročilejší metody statistické regulace procesu*. Praha: Grada Publishing, 2015. Expert (Grada). ISBN 978-80-247-5355-3.

FOTR, Jiří a Ivan SOUČEK. *Tvorba a řízení portfolia projektů: jak optimalizovat, řídit a implementovat investiční a výzkumný program*. Praha: Grada Publishing, 2015. Expert (Grada). ISBN 978-80-247-5275-4.

FOTR, Jiří, Emil VACÍK, Miroslav ŠPAČEK a Ivan SOUČEK. *Úspěšná realizace strategie a strategického plánu*. Praha: Grada Publishing, 2017. Expert (Grada). ISBN 978-80-271-0434-5.

GÁLA, Libor, Jan POUR a Zuzana ŠEDIVÁ. *Podniková informatika: počítačové aplikace v podnikové a mezipodnikové praxi*. 3., aktualizované vydání. Praha: Grada Publishing, 2015. Management v informační společnosti. ISBN 978-80-247-5457-4.

HENDL, Jan. *Základy matematiky, logiky a statistiky pro sociologii a ostatní společenské vědy v příkladech*. Třetí, doplněné vydání. Praha: Univerzita Karlova, nakladatelství Karolinum, 2022. ISBN 978-80-246-5400-3.

JUROVÁ, Marie. *Výrobní a logistické procesy v podnikání*. Praha: Grada Publishing, 2016. Expert (Grada). ISBN 978-80-247-5717-9.

KLAPALOVÁ, Alena. *Hodnota a e-business*. Brno: Masarykova univerzita, 2016. ISBN 978-80-210-8167-3.

LAKSHMANA, Kumar, V. N., ANJANEYULU, G., RAMA Devi, D., & LAVAYANA, V. (2022). *Analog electronic circuits*. Andhra Pradesh: GCS, 2022. ISBN 978-93-94304-08-8.

LAURENČÍK, Marek. *Excel 2016 a 2019: pokročilé nástroje : funkce, databáze, kontingenční tabulky, prezentace, příklady*. Praha: Grada Publishing, 2020. Průvodce (Grada). ISBN 9788027124718.

MALÝ, Martin. *Hradla, volty, jednočipy: úvod do bastlení*. Praha: CZ.NIC, z.s.p.o., 2017. CZ.NIC. ISBN 978-80-88168-23-2.

MÁCHAL, Pavel, Martina KOPEČKOVÁ a Radmila PRESOVÁ. *Světové standardy projektového řízení: pro malé a střední firmy : IPMA, PMI, PRINCE2*. Praha: Grada, 2015. Manažer. ISBN 978-80-247-5321-8.

NENADÁL, Jaroslav. *Management kvality pro 21. století*. Praha: Management Press, 2018. ISBN isbn978-80-7261-561-2.

NEUBAUER, Jiří, Marek SEDLAČÍK a Oldřich KRŽÍŽ. *Základy statistiky: aplikace v technických a ekonomických oborech*. 2., rozšířené vydání. Praha: Grada, 2016. ISBN 978-80-247-5786-5.



PÁNEK, Petr, Milan LÍBEZNÝ, Michal LORENC, et al. *Základy technologie výroby polovodičů*. Vydání: druhé. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2021. ISBN 978-80-7623-060-6.

POUR, Jan, Miloš MARYŠKA, Iva STANOVSKÁ a Zuzana ŠEDIVÁ. *Self service business intelligence: jak si vytvořit vlastní analytické, plánovací a reportingové aplikace*. Praha: Grada Publishing, 2018. Management v informační společnosti. ISBN 978-80-271-0616-5.

POSSEME, Nicolas. *Plasma Etching Processes for CMOS Devices Realization*. Elsevier, , 2017. ISBN 978-1-78548-096-6.

RABUŠIC, Ladislav, Petr SOUKUP a Petr MAREŠ. *Statistická analýza sociálněvědních dat (prostřednictvím SPSS)*. 2., přepracované vydání. Brno: Masarykova univerzita, 2019. ISBN 978-80-210-9248-8.

ROSINA, Jozef, Jana VRÁNOVÁ a Hana KOLÁŘOVÁ. *Biofyzika: pro zdravotnické a biomedicínské obory*. 2., doplněné vydání. Praha: Grada Publishing, 2021. ISBN 978-80-271-2526-5.

ŘEHÁK, Jan a Ondřej BROM. *SPSS - Praktická analýza dat*. Brno: Computer Press, 2015. ISBN 978-80-251-4609-5.

SEDLÁK, Bedřich, ŠTOLL Ivan. *Elektrina a magnetismus*. Univerzita Karlova, 2017. ISBN 978-80-246-3146-2.

SIXTOVÁ, Helena. *Nová fyzika v kostce pro SŠ*. V Praze: Fragment, 2021. V kostce (Fragment). ISBN 978-80-253-5233-5.

SIXTOVÁ, Helena. *Nová matematika v kostce pro SŠ*. V Praze: Fragment, 2019. V kostce (Fragment). ISBN 978-80-253-4321-0.

SVOZILOVÁ, Alena. *Projektový management: systémový přístup k řízení projektů*. 3., aktualizované a rozšířené vydání. Praha: Grada Publishing, 2016. Expert (Grada). ISBN 978-80-271-0075-0.

ŠAFROVÁ DRÁŠILOVÁ, Alena. *Základy úspěšného podnikání: průvodce začínajícího podnikatele*. Praha: Grada, 2019. ISBN 978-80-271-2182-3.

YOSHIO Nishi and Robert DOERING. *Handbook of Semiconductor Manufacturing Technology*: Edition 2. Boca Raton: CRC Press, 2017, 1720 s. ISBN 978-1-4200-1766-3.

ZEMAN, Lubomír. Vstřikování plastů – teorie a praxe, Praha: Grada Publishing, 2018. ISBN 978-80-247-2819-3.

ASU Search | Arizona State University. ASU Search | Arizona State University [online]. [cit. 04.04.2023]. Dostupné z: <https://cores.research.asu.edu/nanofabrication-and-cleanroom/techniques-lithography>

An Introduction to Probe Cards. *Semiconductor Testing & Prober Technology Insights* [online]. Copyright © CopyrightSemiprobe2022 [cit. 04.04.2023]. Dostupné z: <https://blog.semiprobe.com/probe-card>

Documents Professional Platform - PDF Download Free - ADOC.PUB. Documents Professional Platform - PDF Download Free - ADOC.PUB [online]. Copyright © 2023 ADOC.PUB. All rights reserved. [cit. 04.04.2023]. Dostupné z: [http://Úvod polovodičové čipy - PDF Free Download \(adoc.pub\)](http://Úvod polovodičové čipy - PDF Free Download (adoc.pub))

Elektrotechnologie ppt stáhnout. *SlidePlayer - Nahrávejte a Sdílejte své PowerPoint prezentace* [online]. Copyright © 2023 SlidePlayer.cz Inc. [cit. 04.04.2023]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/2905348/>

Exensio Analytics Platform for Semiconductor Foundries, IDMs, OSATs and Fabless. *PDF Solutions | Semiconductor Manufacturing Advanced Analytics* [online]. Copyright © 2023 PDF Solutions. All rights reserved. [cit. 06.04.2023]. Dostupné z: <https://www.pdf.com/products/exensio-analytics-platform/overview/>

ONSEMI, ©1999-2023. Intelligent Power and Sensing Technologies | onsemi. Intelligent Power and Sensing Technologies | onsemi [online]. Copyright © Development Ecosystem [cit. 04.04.2023]. Dostupné z: <https://www.onsemi.com/>

ONSEMI, ©1999-2021. Výroba čipů. [onsemi.sharepoint.com](https://www.onsemi.sharepoint.com) [online]. [cit. 2023-04-12]. Dostupné z: [www.onsemi.sharepoint.com/vyroba-cipu](https://www.onsemi.sharepoint.com/vyroba-cipu)

Polovodivé materiály. *ePubli webová knihovna* [online]. Copyright © 2016. [cit. 06.04.2023]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/353/05.html>

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

A	Ampér
aj.	A jiné
ang.	Anglicky
apod.	A podobně
BZS	Broušení zadní strany
°C	Stupeň Celsia
CL	Control limit
DOE	Design of experiment
HDMS	Hexamethyldisilazan
HP	Hewlett Packard
IO	Integrovaný obvod
např.	Například
LED	Light emitting diode
LR	Leptací rychlost
LCL	Lower control limit
PC	Parameter critical
Ph	Potential of hydrogen
SPC	Statistical Process Control
Si	Chemická značka křemíku
s.	Strana
tj.	To je
tzv.	Takzvaný
UP	Unit probe
UCL	Upper control limit
V	Volt

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

Obrázek 1	Proces leštění křemíkových desek (Pánek, 2016).....	16
Obrázek 2	Proces fotolitografie (ResearchGate © 2008 – 2023).....	18
Obrázek 3	Procesní kroky pro difúzi příměsi (Pánek, 2016).....	19
Obrázek 4	Schéma NPN a PNP tranzitoru (Chajda, 2018).....	22
Obrázek 5	Vstup a výstup u NPN tranzitoru (Lakshmana, 2022).....	22
Obrázek 6	Vzorec výpočtu leptací rychlosti u plaz. leptání (Pánek, 2016).....	23
Obrázek 7	Tvorba zrn během depozice (Pánek, 2016).....	24
Obrázek 8	Procesní kroky broušení zadní strany (Pánek, 2016).....	24
Obrázek 9	UP testování hrotovou kartou (COPYRIGHTSEMIPROBE2022 © 2022).....	25
Obrázek 10	Speciální rozmístění metal. struktur pro PC testování (Vlastní zpracování) ..	26
Obrázek 11	Ilustrativní náčrt zakapání vadných čipů inkoustem (Vlastní zpracování) .....	26
Obrázek 12	Ilustrativní náčrt Dispectoru pro výrobní proces (Vlastní zpracování).....	28
Obrázek 13	Pracovní prostředí Korektu (Onsemi, © 1999 – 2023b).....	29
Obrázek 14	Prostředí Exensia (ONSEMI, © 1999 – 2021).....	30
Obrázek 15	JMP výstup dat (ONSEMI, © 1999 – 2021).....	31
Obrázek 16	Krabicový graf (Laurenčík, 2016).....	37
Obrázek 17	Histogramový graf (Neubauer, 2021).....	37
Obrázek 18	Sloupcový graf (Barilla, 2016).....	37
Obrázek 19	Koláčový graf (Sixtová, 2019).....	37
Obrázek 20	Základní struktura regulačního diagramu (Jarošová, 2015).....	38
Obrázek 21	Organizační struktura výroby čipů (Vlastní zpracování).....	42
Obrázek 22	Náčrty výrobků ONSEMI (Onsemi, © 1999 – 2023).....	43
Obrázek 23	Náčrty použití výrobků ONSEMI dle řešení (Onsemi, © 1999 – 2023).....	43
Obrázek 24	Ochranný oblek do čistých prostor (ONSEMI, © 1999 – 2021).....	44
Obrázek 25	Ukázka čistých prostor (Vlastní zpracování).....	45
Obrázek 26	6 palcová deska s čipy (ONSEMI, © 1999 – 2021).....	46
Obrázek 27	Krabice se zásobníkem s 25 sloty pro desky (ONSEMI, © 1999 – 2021).....	46
Obrázek 28	Výrobní sada s desky a unik. ident. štítkem (ONSEMI, © 1999 – 2021).....	46
Obrázek 29	Prac. prostředí INNA pro přihlášení sady (Interní materiály společnosti).....	47
Obrázek 30	Prostředí datab. inf. systému Korekt (Vlastní zpracování).....	48
Obrázek 31	Layout pracoviště v systému Gramms (Vlastní zpracování).....	49
Obrázek 32	Mapa desky v map. edit. se zakresleným viz. defektem (Vlastní zpracování).....	50
Obrázek 33	Pracoviště fotolitografie (Vlastní zpracování).....	51
Obrázek 34	Část layoutu finál. funk. čipu s mask. vrstvy dle barev (Vlastní zpracování).....	51

Obrázek 35	Obdelníková pole na desce pro nanesení masky (Vlastní zpracování) .....	51
Obrázek 36	Pracoviště difúze s horizontálními difúz. pecemi (Vlastní zpracování).....	52
Obrázek 37	Layout epitaxních rektorů (Vlastní zpracování).....	53
Obrázek 38	Náčrt třípat. a dvoupat. karuselu pro epi. depozici (Vlastní zpracování).....	53
Obrázek 39	XY bruska (Vlastní zpracování).....	55
Obrázek 40	Základna pro zásobník s desky (Vlastní zpracování).....	55
Obrázek 41	Hrotové karty s jemnými hroty uprostřed pro PC testy (Vlastní zpracování).....	56
Obrázek 42	Hrotová karta s jemnými hroty pro UP testy (Vlastní zpracování).....	56
Obrázek 43	Náčrt zařízení HP pro PC testování (Vlastní zpracování).....	57
Obrázek 44	Rozložení PC metalových struktur na mapě desky (Vlastní zpracování) .....	57
Obrázek 45	PC metal. strukt. na desce s otisky od jemných hrotů (Vlastní zpracování) ...	58
Obrázek 46	Ilustr. strukt. čipu s metal. body po obvodu pro UP (Vlastní zpracování).....	59
Obrázek 47	Ilustrační mapa desky s čipy v map. editoru před UP (Vlastní zpracování) ...	59
Obrázek 48	Změřená deska v mapovém editoru z UP testování (Vlastní zpracování) .....	60
Obrázek 49	Statistika dobrých a vypadlých čipů z UP testování (Vlastní zpracování) .....	61
Obrázek 50	Velký přítlak a nesprávné umístění hrotů v metal. strukt. (Vlastní zpracování) .....	62
Obrázek 51	Graf utopené vsrtvy R_BlLayer zpracovaný v Jumpu (Vlastní zpracování).....	62
Obrázek 52	Hodnoty testu 11.1 v grafu pro desky 5 až 12 v Jumpu (Vlastní zpracování).....	63
Obrázek 53	Výpadek testu 11.1 (zelená barva) z UP v map. editoru (Vlastní zpracování).....	63
Obrázek 54	Příklad výtěžnosti s hold a vyřaz. limitem (Vlastní zpracování) .....	64
Obrázek 55	Výpadky výtěžnosti na vyr. sadě v map. editoru (Vlastní zpracování).....	69
Obrázek 56	Porovnání výpadku s hodnoty čipu testu 11.1. (Vlastní zpracování).....	71
Obrázek 57	Q-Q plot pro analýzu testu 11.1 pro BH5XX (Vlastní zpracování).....	71
Obrázek 58	Layout epitaxních reaktorů pro BH5XX (Vlastní zpracování) .....	72
Obrázek 59	Mapy výtěžnosti sady RL8444 (Vlastní zpracování).....	74
Obrázek 60	Graf Utopené vrtstvy(R_BlLayer) u sady RL8444 .....	76
Obrázek 61	Layout omezen. a uvolněných epi. reaktorů pro BH5XX (Vlastní zpracování) .....	76
Obrázek 62	Graf R_BlLayer – trend sad 2019 - 2022 (Vlastní zpracování) .....	78
Obrázek 63	Dvojitý distrib. R_BlLayer v letech 2019 - 2022 (Vlastní zpracování) .....	79
Obrázek 64	Distrib. R_BlLayer u sníž. výtěžnosti (Vlastní zpracování) .....	79
Obrázek 65	Distrib. R_BlLayer u stand. výtěžnosti (Vlastní zpracování) .....	79
Obrázek 66	Použité epi. reaktory pro DOE 1 (Vlastní zpracování) .....	86
Obrázek 67	Dělení sady dle epi reak. a odebrané desky (Vlastní zpracování).....	86
Obrázek 68	Susceptor s horním a dolním patrem (vlastní zpracování).....	87

Obrázek 69	Horní patro s průměr. hodnot. na desce u A1 reakt. (Vlastní zpracování).....	87
Obrázek 70	Dolní patro s průměr. hodnot. na desce u A1 reakt. (Vlastní zpracování).....	87
Obrázek 71	Horní patro s průměr. hodnot. na desce u A2 reakt. (Vlastní zpracování).....	87
Obrázek 72	Dolní patro s průměr. hodnot. na desce u A2 reakt. (Vlastní zpracování).....	88
Obrázek 73	Odebrané desky 12 a 24 pro DOE 1 po PC testech (Vlastní zpracování).....	88
Obrázek 74	Graf R_BLayer utopené vrstvy u sady RL9486 z DOE 1 (Vlastní zpracování) .....	89
Obrázek 75	Test 11.1 u sady RL9486 z DOE 1 z UP testování (Vlastní zpracování) .....	89
Obrázek 76	Utop. vrstvy u sady RL9701 dle imp. dávek pro DOE 2 (Vlastní zpracování) .....	93
Obrázek 77	Hodnoty testu 11.1 pro sadu RL9701 u DOE 2 dle impl. dávek (Vlastní zpracování).....	94
Obrázek 78	Histog. testu 11.1 pro DOE 2 při impl. dávce 2.52 E+15 (Vlastní zpracování) .....	94
Obrázek 79	Histog. testu 11.1 pro DOE 2 při impl. dávce 2.80 E+15 (Vlastní zpracování) .....	95
Obrázek 80	Histog. testu 11.1 pro DOE 2 při impl. dávce 3.80 E+15 (Vlastní zpracování) .....	95
Obrázek 81	Ukázka map změřených desek 5 – 8 s procen. výtežností přes 99% pro impl. dávku 3.08 E+15 (Vlastní zpracování) .....	96
Obrázek 82	Ukázka map změřených desek 1 – 2 s nižší procen. výtežností pro standardní impl. dávku 2.80 E+15 (Vlastní zpracování).....	96
Obrázek 83	Utopená vrstva R_BLayer z PC testů z rizikové produkce (Vlastní zpracování) .....	98
Obrázek 84	Průměrné hodnoty testu 11.1 pro rizikovou produkci (Vlastní zpracování) ...	99

**SEZNAM TABULEK**

Tabulka 1	Hodnoty vniku iontů v $\mu\text{m}$ do Si a $\text{SiO}_2$ (Pánek, 2016) .....	20
Tabulka 2	Druhy epitaxních techlogií (Drápala, 2016) .....	21
Tabulka 3	Typy informačních systému (Chlebovský, 2017).....	27
Tabulka 4	Smart metoda (Šafrová Drážilová, 2019) .....	33
Tabulka 5	Produktové portfolio společnosti ONSEMI (ONSEMI, © 1999 – 2021).....	43
Tabulka 6	Klávésové zkratky pro INNU (Vlastní zpracování) .....	47
Tabulka 7	Ilustrativní tabulka testovacího plánu (Vlastní zpracování) .....	60
Tabulka 8	Ilustr. výpočet procentuální výtežnosti z UP měření (Vlastní zpracování) .....	61
Tabulka 9	Vybraná charakteristika čipu pro diplomovou práci (Vlastní zpracování).....	65
Tabulka 10	Procesní kroky výroby čipu BH5XX (Vlastní zpracování) .....	66
Tabulka 11	Fotol. vrstvy v procesu pro BH5XX (Vlastní zpracování) .....	67
Tabulka 12	Výtěžnost čipu BH5XX v roce 2019 (Vlastní zpracování) .....	67
Tabulka 13	Tabulka zmetkovaných desek za rok 2019 (Vlastní zpracování) .....	68
Tabulka 14	Výtěžnost čipu BH5XX v roce 2020 (Vlastní zpracování) .....	68
Tabulka 15	Tabulka zmetkovaných desek za rok 2020 (Vlastní zpracování) .....	68
Tabulka 16	Výtěžnost čipu BH5XX v roce 2021 (Vlastní zpracování) .....	69
Tabulka 17	Tabulka zmetkovaných desek za rok 2021 (Vlastní zpracování) .....	69
Tabulka 18	Limity testů 11 a 11.1 pro UP čipu BH5XX (Vlastní zpracování).....	70
Tabulka 19	Analýza epi. reaktorů při sníž. výtež. u čipu BH5XX (Vlastní zpracování) ...	73
Tabulka 20	Výtěžnost desek a epi. reaktory pro sadu RL8444 (Vlastní zpracování) .....	74
Tabulka 21	Kritické parametry pro čip BH5XX (Vlastní zpracování).....	75
Tabulka 22	Vybrané sady z roku 2019 – 2020 pro analýzu PC dat (Vlastní zpracování) ..	77
Tabulka 23	Vybrané sady z roku 2021 – 2022 pro analýzu PC dat (Vlastní zpracování) ..	77
Tabulka 24	Členové projektového týmu (Vlastní zpracování).....	83
Tabulka 25	Logický rámec projektu (Vlastní zpracování) .....	83
Tabulka 26	Harmonogram projektu (Vlastní zpracování).....	84
Tabulka 27	Matice pravděpodobnosti a dopadu rizika projektu (Vlastní zpracování) ..	84
Tabulka 28	Vyčíslení případného neuskutečněného finančního výnosu (Vlastní zpracování) .....	85
Tabulka 29	Výtěžnost sady RL9486 z DOE 1 (Vlastní zpracování).....	90
Tabulka 30	Rozdělení desek pro epitaxní reaktory pro DOE 2 (Vlastní zpracování) .....	91
Tabulka 31	Návrh implantačních dávek pro DOE 2 (Vlastní zpracování).....	92
Tabulka 32	Dělení impl. dávek pro DOE 2 s výslednými výtěžnostmi (Vlastní zpracování) .....	96

Tabulka 33 Tabulka se sadami rizikové produkce (Vlastní zpracování).....	98
Tabulka 34 Procentuální výtěžnosti BH5XX pro rizikovou produkci (Vlastní zpracování) .....	99
Tabulka 35 Finanční zhodnocení v letech 2019 – 2022 pro čip BH5XX (Vlastní zpracování) .....	101



## SEZNAM PŘÍLOH

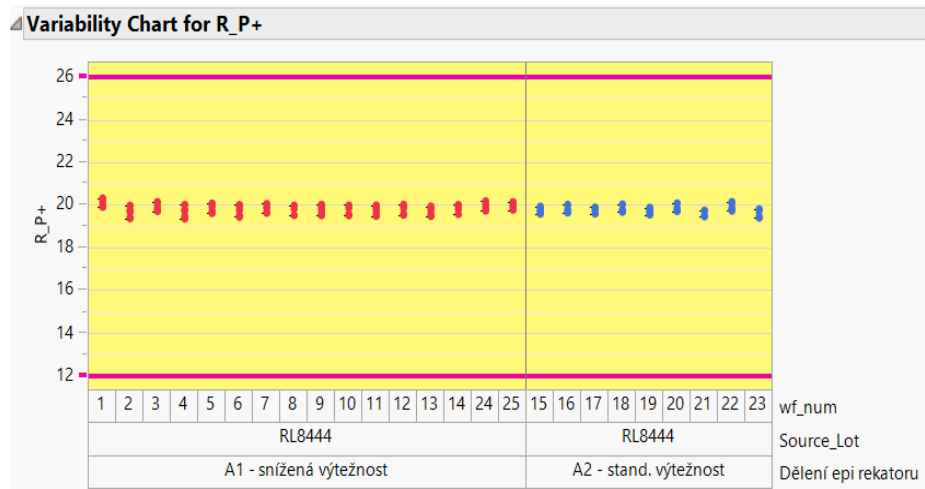
Příloha P I: Kritické parametry pro sadu RL8444

Příloha P II: Trend sad kritických parametrů pro rok 2019 - 2022

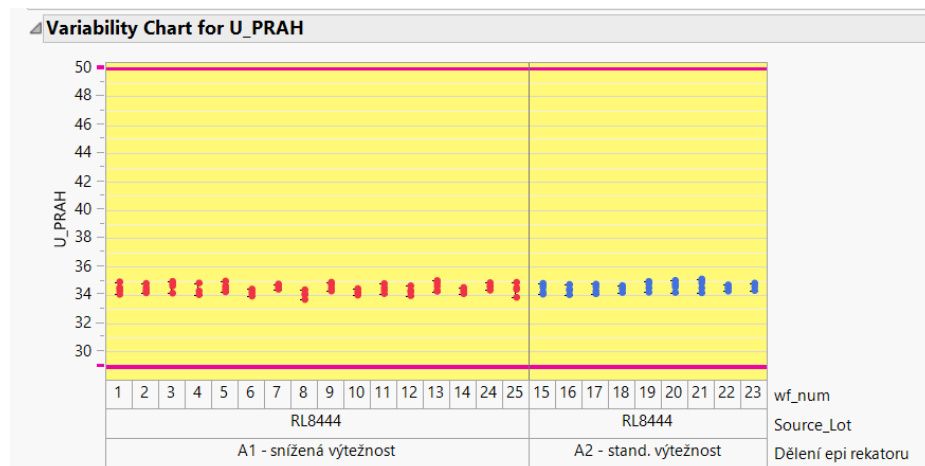
Příloha P III: Riziková analýza projektu

Příloha P IV: Kritické parametry z PC testování pro DOE 2

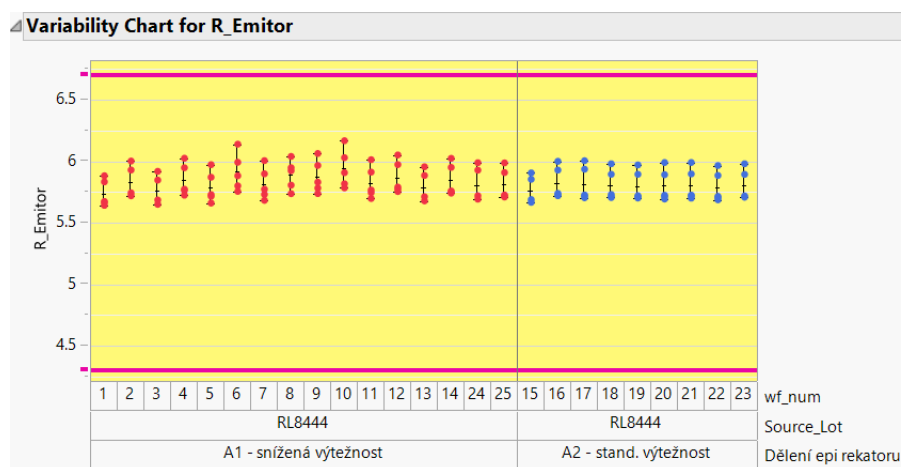
## PŘÍLOHA P I: KRITICKÉ PARAMETRY PRO SADU RL8444



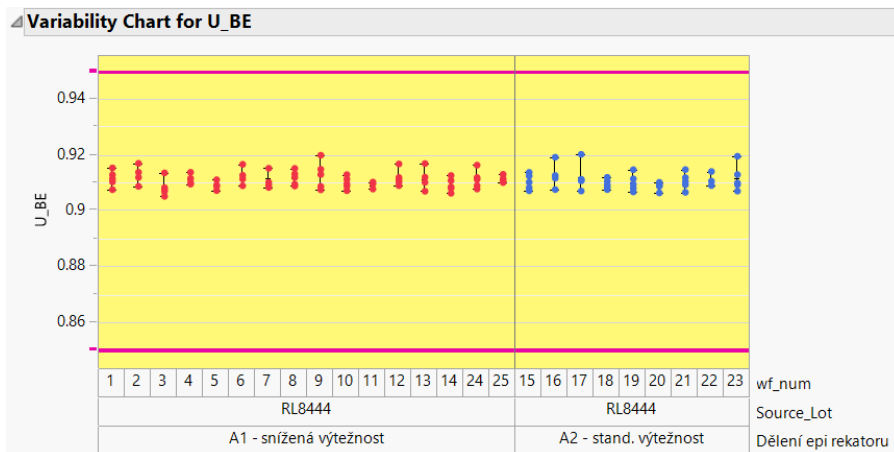
*Odpor P+ vrstvy u sady RL8444*



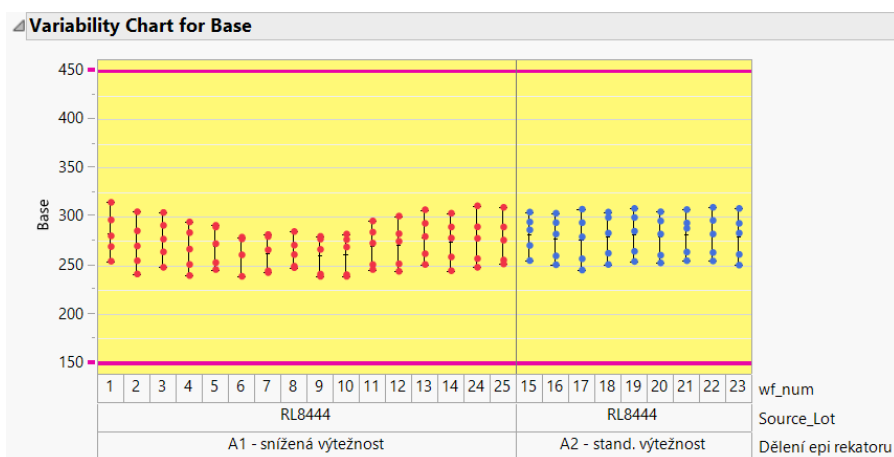
*Prahové napětí (U\_PRAH) u sady RL8444*



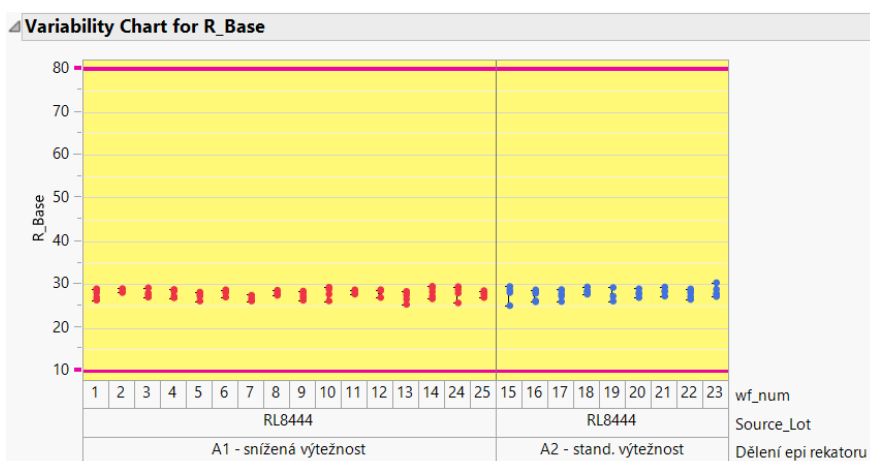
*Odpor emitoru (R\_Emitor) u sady RL8444*



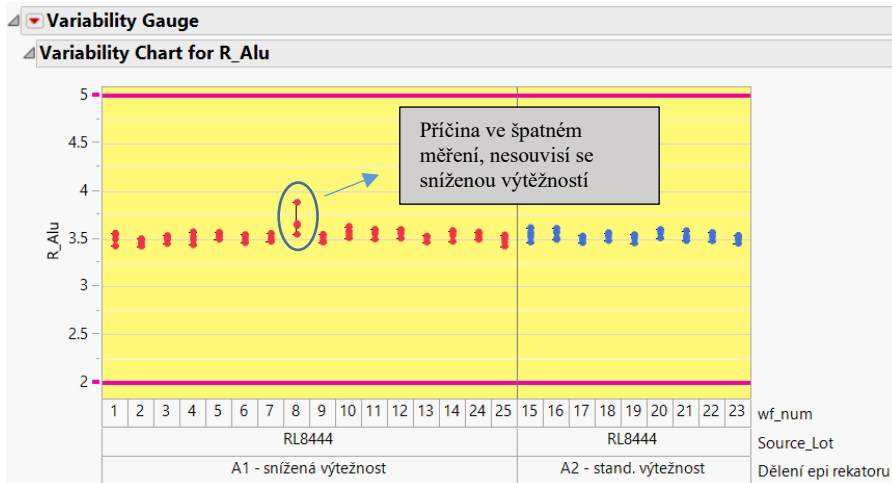
*Propustné napětí báze, emitor ( $U_{BE}$ ) u sady RL8444*



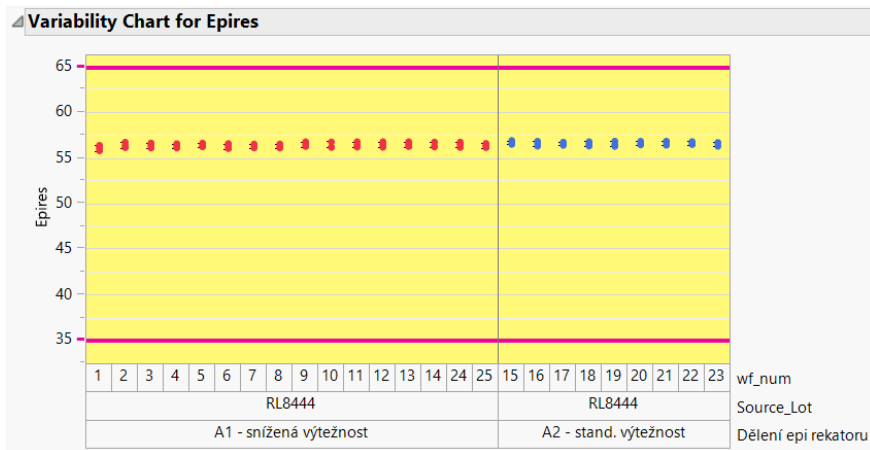
*NPN tranzitor ( $Base$ ) u sady RL8444*



*Odpor báze ( $R_{Base}$ ) u sady RL8444*

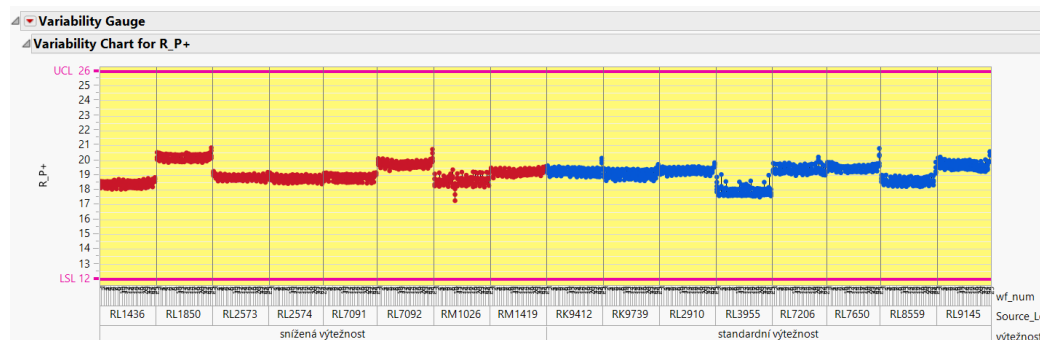


*Odpor hliníkového kontaktu ( $R_{Alu}$ ) u sady RL8444*

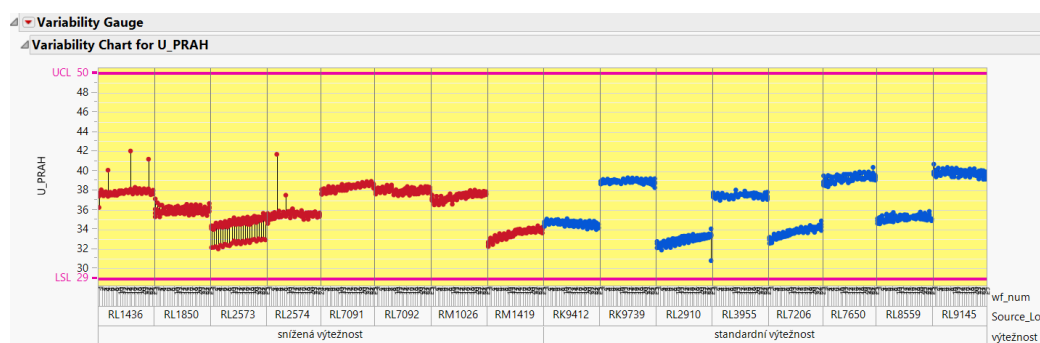


*Epitaxní proces ( $Epipes$ ) u sady RL8444*

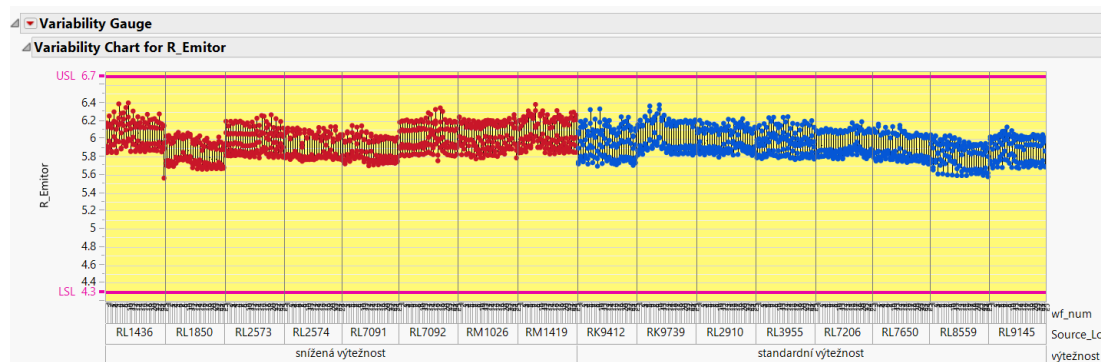
## PŘÍLOHA P II: TREND SAD KRITICKÝCH PARAMETRŮ PRO ROK 2019 - 2022



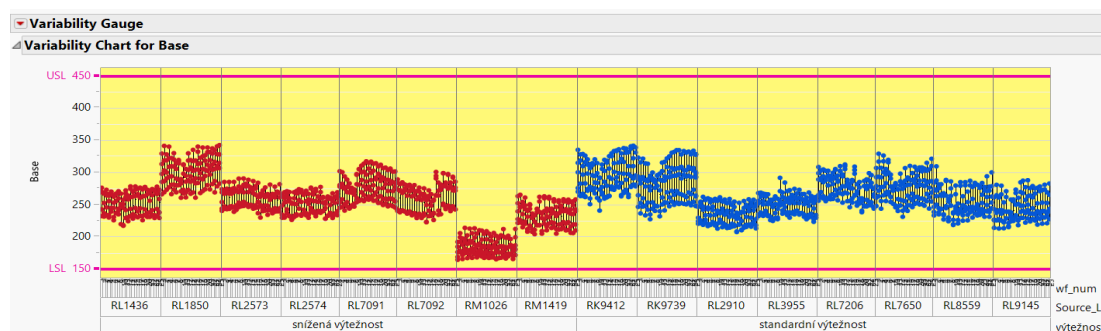
*Odpor P+ vrstvy – trend sad 2019 - 2022 (snížena vs. standardní vytěžnost)*



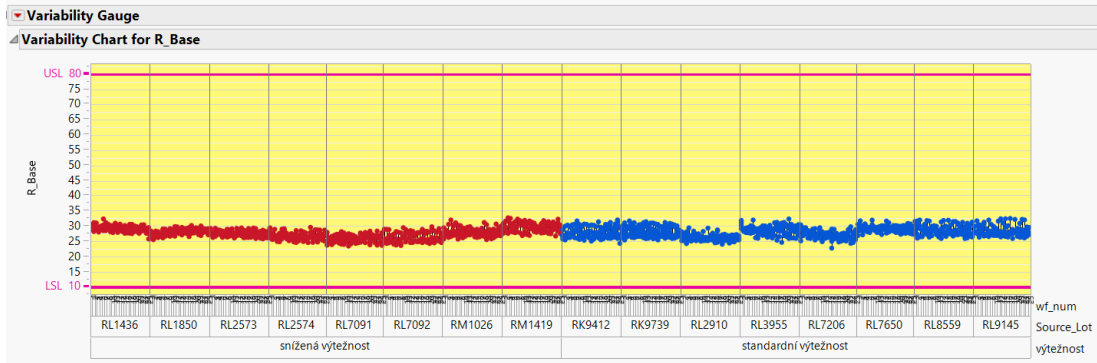
*Prahové napětí U\_PRAH – trend sad 2019 - 2022 (snížena vs. standardní vytěžnost)*



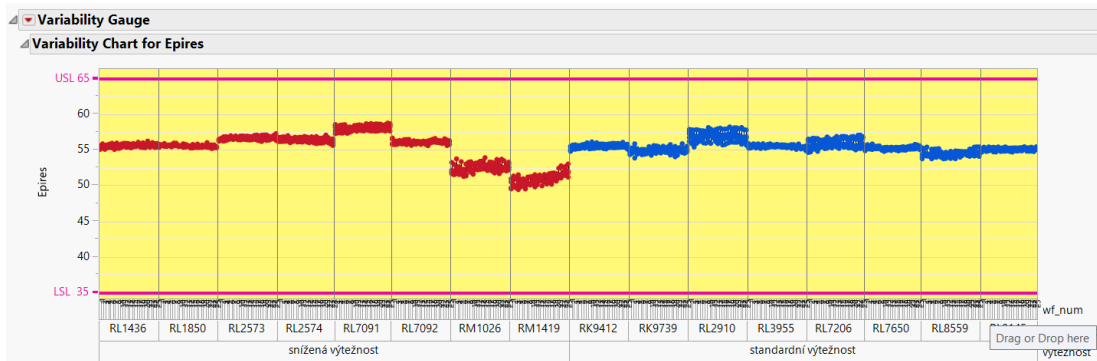
*Odpor emitoru – trend sad 2019 - 2022 (snížena vs. standardní vytěžnost)*



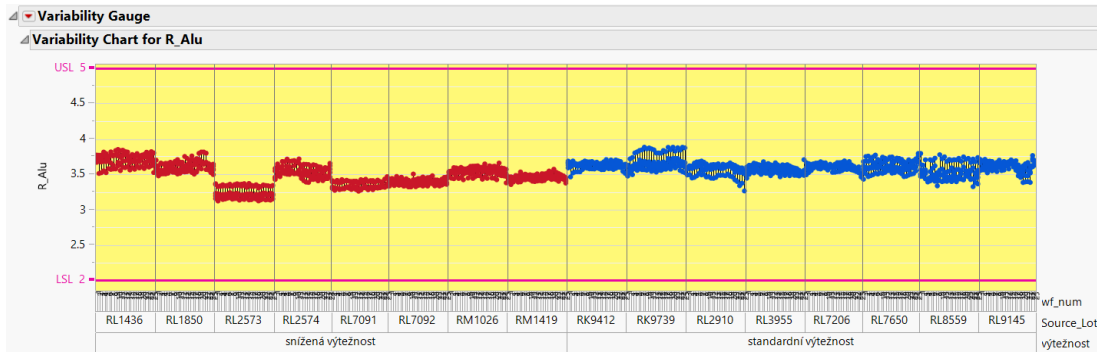
*NPN tranzitor (Base) – trend sad 2019 - 2022 (snížena vs. standardní vytěžnost)*



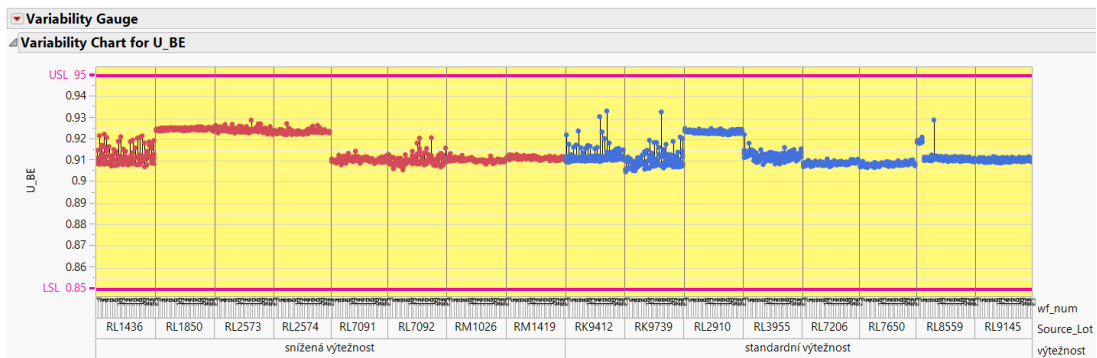
*Odpor báze – trend sad 2019 - 2022 (snížena vs. standardní výtežnost)*



*Epitaxní proces – trend sad 2019 - 2022 (snížena vs. standardní výtežnost)*



*Odpor hliníkového kontaktu – trend sad 2019 - 2022 (snížena vs. standardní výtežnost)*

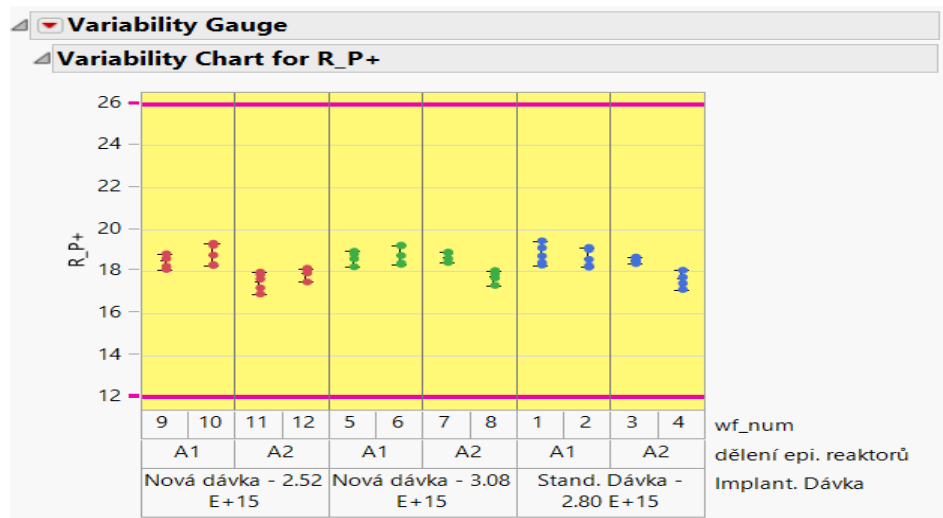


*Propustné napětí (báze,emitor) – trend sad 2019 - 2022 (snížena vs. standardní výtežnost)*

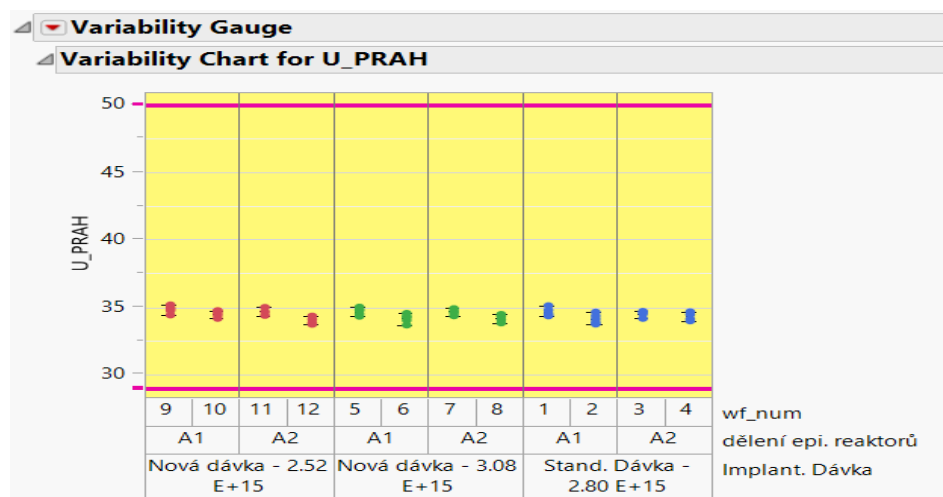
## PŘÍLOHA P III: RIZIKOVÁ ANALÝZA PROJEKTU

Hrozba	Scénář	Pravděp. rizika	Dopad	Hodnota rizika	Opatření	
1	Nesprávné zpracování DOE 1 na pozici epitaxu	Špatně zpracování inženýrské sady na epitaxním reaktoru	NR	VD	SHR	Spolupráce a koordinace s technologem epitaxního reaktoru, zpracování pod odhledem
2	Nesprávné zpracování DOE 2 na implant. zařízení	Špatně nastavena implantační dávka	NR	VD	SHR	Spolupráce a koordinace s technologem implant. reaktoru, zpracování pod odhledem
3	Manipulační incident během zpracování DOE 1 a 2	Poškrábané či zlomené desky během procesu	SR	VD	VHR	Spolupráce s výrobu, průběžná kontrola
4	Chyby při sběru dat v procesu výroby	Nesprávně navedené data z procesu	NR	SD	NHR	Spolupráce a koordinace s výrobní linkou
5	Nesprávné měření PC a UP dat	Špatně nastavena karta a nastavení testování hrotovou kartou	NR	SD	NHR	Kontrola nastavení během měření
6	Prodlužování projektu	Pomalejší zpracování inženýrské sady oproti standardní výrobě	SR	VD	VHR	Nastavení vyšší priority při náznačce zdržení zpracování
7	Neznalost problematiky	Nedodržení cíle snížení dávkvy utopené vrstvy pro DOE 2	SR	SD	SHR	Nastavení vyšší priority při náznačce zdržení zpracování

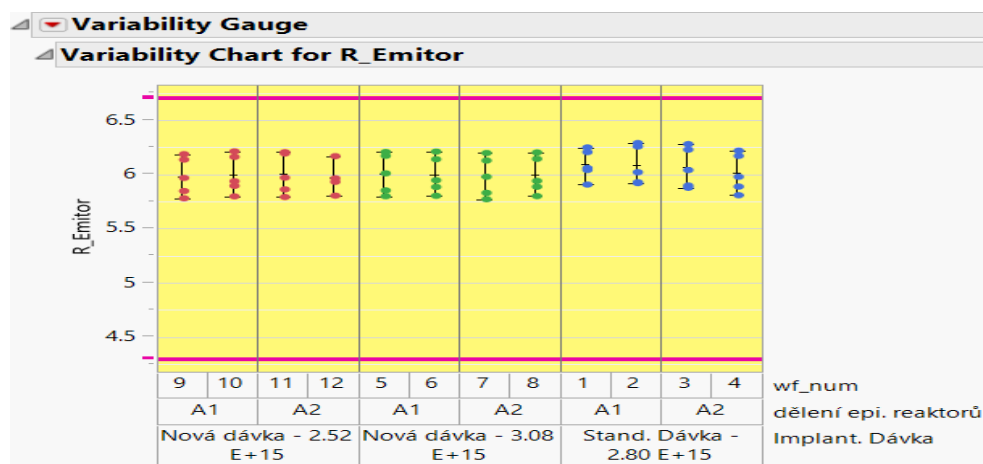
## PŘÍLOHA P IV: KRITICKÉ PARAMETRY Z PC TESTOVÁNÍ PRO DOE 2



*Odpor P+ vrstvy ( $R_{P+}$ ) u sady RL9701 dle dělení imp. dávek pro DOE 2*

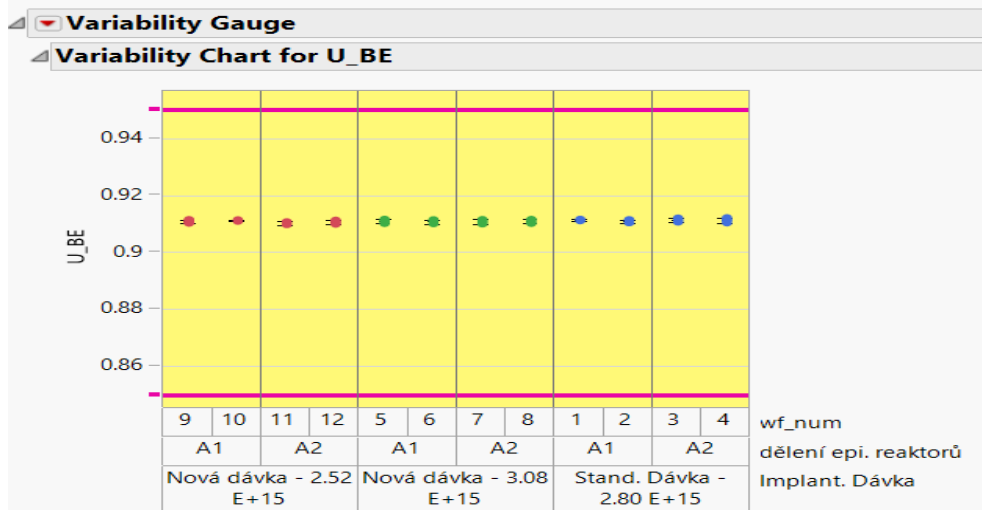


*Odpor Prahového napětí ( $U_{Prah}$ ) u sady RL9701 dle dělení imp. dávek pro DOE 2*

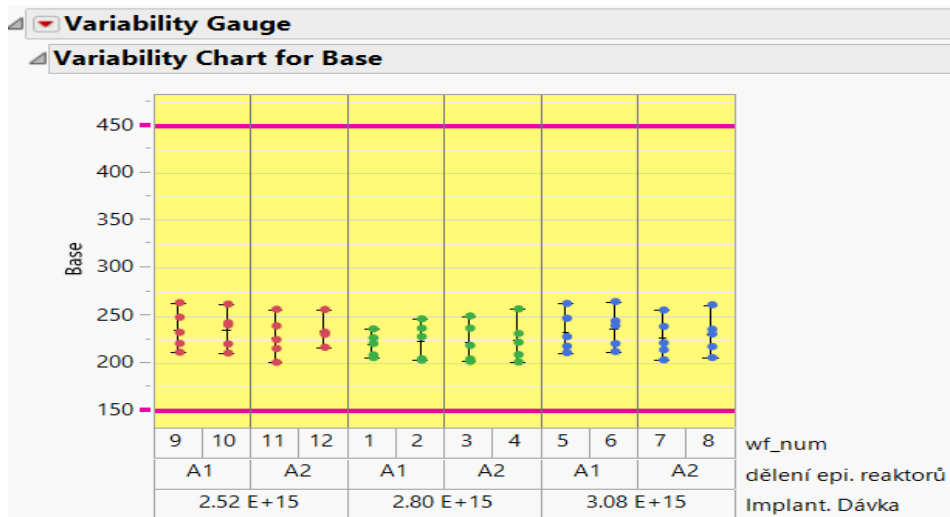


*Odpor emitoru ( $R_{Emitor}$ ) u sady RL9701 dle dělení imp. dávek pro DOE 2*

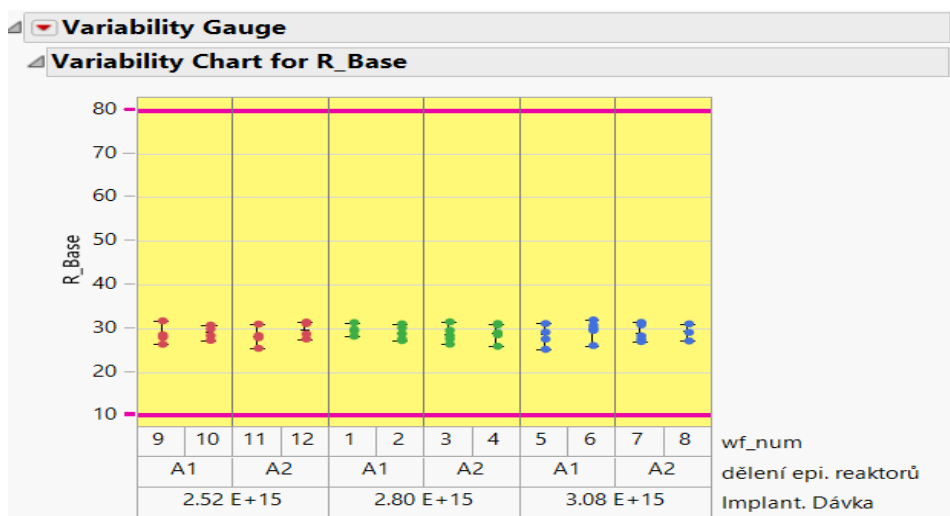




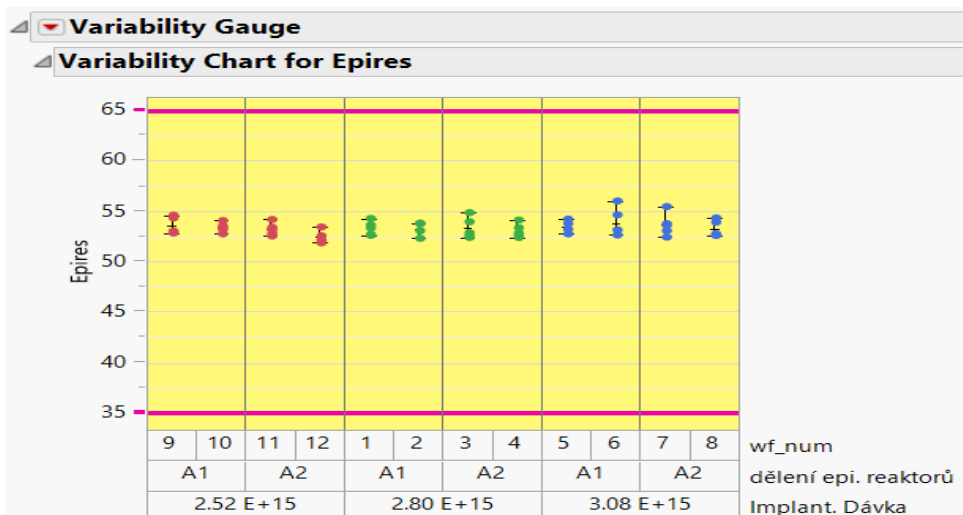
*Propustné napětí - báze,emitor ( $U_{BE}$ ) u sady RL9701 dle dělení imp. dávek pro DOE 2*



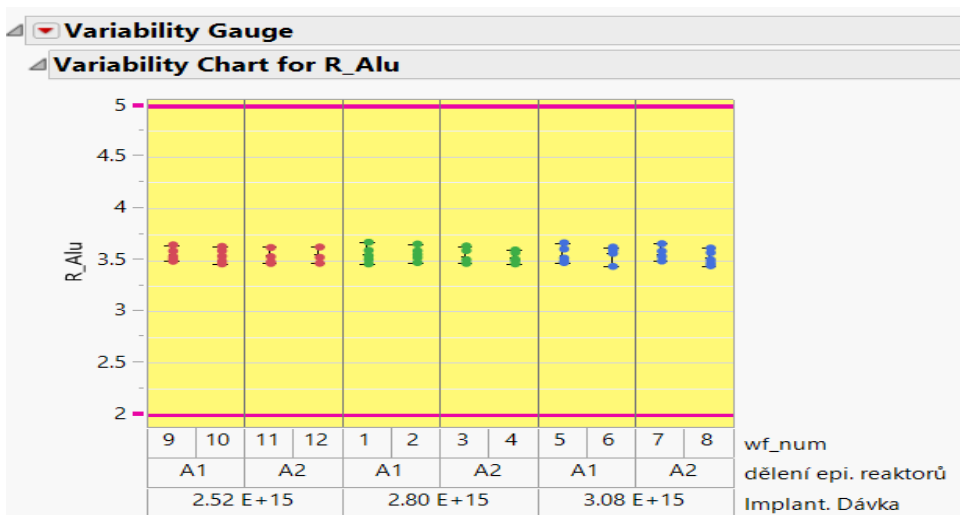
*NPN tranzistor ( $Base$ ) u sady RL9701 dle dělení imp. dávek pro DOE 2*



*Odpor báze ( $R_{Base}$ ) u sady RL9701 dle dělení imp. dávek pro DOE 2*



*Epitaxní proces (Epires) u sady RL9701 dle dělení imp. dávek pro DOE 2*



*Hliníkový kontakt (R\_Alu) u sady RL9701 dle dělení imp. dávek pro DOE 2*