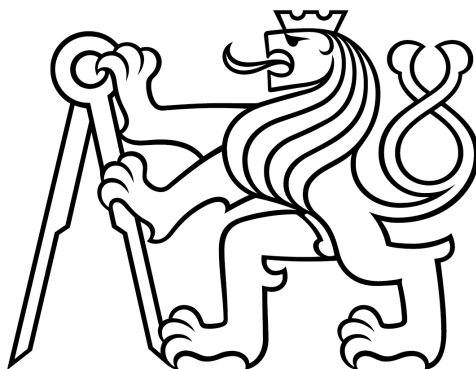


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ  
KATEDRA MIKROELEKTRONIKY



Diplomová práce

Miniaturizované vyčítací rozhraní pro pixelový detektor radiace  
Timepix 2

*Ondřej Pavlas*

Vedoucí: Ing. Záhlava Vít, CSc.

Studijní program: Elektronika a komunikace  
Květen 2024



# Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Praha, dne .....

.....

podpis

# Poděkování:

TODO poděkování

## **Abstract**

TODO English abstract

## **Abstrakt**

TODO Český abstrakt

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Pixelové detektory radiace a vyčítací zařízení</b>	<b>2</b>
2.1	Princip činnosti pixelových detektorů . . . . .	2
2.2	Vyčítací zařízení pro pixelové detektory . . . . .	3
2.2.1	USB Lite . . . . .	3
2.2.2	MiniPIX SPRINTER . . . . .	4
2.2.3	Katherine pro Timepix 2 . . . . .	4
2.3	Timepix 2 . . . . .	5
2.3.1	Analogová část . . . . .	5
2.3.2	Digitální část . . . . .	5
2.3.3	Komunikační rozhraní . . . . .	7
2.3.4	Technická specifikace . . . . .	8
<b>3</b>	<b>Návrh řešení</b>	<b>11</b>
3.1	Koncept řešení . . . . .	11
3.2	Požadavky na realizaci . . . . .	11
3.2.1	Řídící jednotka . . . . .	11
3.2.2	Komunikační rozhraní . . . . .	11
3.2.3	Napájení . . . . .	11
3.2.4	Mechanika . . . . .	11
<b>4</b>	<b>Realizace</b>	<b>12</b>
4.1	Základní deska . . . . .	12
4.1.1	Mikrokontrolér . . . . .	12
4.1.2	Napájení . . . . .	12
4.1.3	Konverze logických úrovní . . . . .	12
4.1.4	USB . . . . .	12
4.2	Deska s Timepix 2 . . . . .	12
4.2.1	Napájení Timepix 2 . . . . .	12
4.2.2	Vysokonapěťový zdroj . . . . .	12
4.2.3	Měření teploty . . . . .	12

<b>5</b>	<b>Testování</b>	<b>13</b>
5.1	Napájení . . . . .	13
5.2	Vysokonapěťový zdroj . . . . .	13
5.3	Měření teploty . . . . .	13
5.4	Komunikační rozhraní s Timepix 2 . . . . .	13
5.5	Digitální test Timepix 2 . . . . .	13
5.5.1	Vyčtení chip ID . . . . .	13
5.5.2	Vyčtení a zapsání pixelových matic . . . . .	13
5.6	USB komunikace . . . . .	13
5.7	Měření spotřeby . . . . .	13
5.7.1	Porovnání spotřeby . . . . .	13
5.8	Dosažené parametry . . . . .	13
<b>6</b>	<b>Závěr</b>	<b>14</b>
	<b>Seznam použité literatury</b>	<b>16</b>
	<b>Seznam použitých symbolů</b>	<b>17</b>
	<b>Seznam použitých zkratk</b>	<b>18</b>

# Seznam obrázků

2.1	Rozložení hybridního pixelového detektoru Timepix [4] . . . . .	3
2.2	Vyčítací zařízení <i>USB lite</i> . . . . .	3
2.3	Vyčítací zařízení MiniPIX SPRINTER . . . . .	4
2.4	Vyčítací zařízení Katherine pro Timepix 2 [8] . . . . .	4
2.5	Detektor Timepix 2 [10] . . . . .	5
2.6	Zpracování signálu na úrovni pixelů . . . . .	6
2.7	Digitální módy Timepix 2 [19] . . . . .	6
2.8	SLVS specifikace [17] . . . . .	7
2.9	Vyčítací rychlosti snímků z Timepix2. Frekvence hodin $f_{clock} = 100$ MHz [2] . . . . .	7
2.10	Rozložení detektoru Timepix 2 [2] . . . . .	9
2.11	Připojení detektoru Timepix 2 k desce plošných spojů [16] . . . . .	10



# Seznam tabulek

2.1	Napájecí úrovně Timepix 2 . . . . .	8
-----	-------------------------------------	---

# Kapitola 1

## Úvod

## Kapitola 2

# Pixelové detektory radiace a vyčítací zařízení

Mezi možnosti detekovat ionizující záření patří mimo jiné, použití pixelových detektorů. Pomocí pixelových detektorů, konkrétněji hybridních pixelových detektorů, jsme schopni detailně změřit ionizující záření. V dalších částech této kapitoly bude popsána obecná činnost a princip detekce radiace pixelových detektorů. V části 2.3, bude konkrétně popsán detektor z rodiny Timepix [1], detektor Timepix 2 [2].

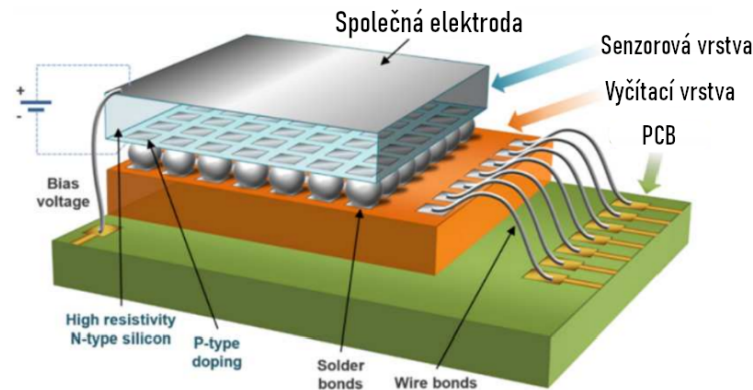
### 2.1 Princip činnosti pixelových detektorů

V této části bude popsán obecný princip činnosti pixelových detektorů, který je společný pro detektory radiace z rodiny Timepix [1], vyvíjenými pod záštitou CERN Medpipix Collaboration [3]. Pixelový detektor, přesněji hybridní pixelový detektor se skládá ze dvou oddělitelných částí, ze sensorové vrstvy a vrstvy s vyčítací elektronikou viz. obrázek 2.1. Právě toto rozdělení na sensorovou a vyčítací část označuje název hybridní detektor.

Senzorová vrstva je tvořena polovodičovým materiálem. Důležitými parametry sensorové vrstvy jsou typ polovodičového materiálu a její tloušťka. Nejčastěji používané materiály jsou Si, CdTe a GaAs. Na sensorovou vrstvu je připojené vysoké napětí, označované jako *bias voltage*. Toto vysoké napětí zajistí vyprázdnění oblasti v polovodičové struktuře sensorové vrstvy. Pokud částice ionizujícího záření interaguje v sensorové vrstvě, dojde k vytvoření náboje. Tento náboj je dále zpracován vyčítací elektronikou která je pomocí technologie nazývané *bump bond*, připojena k sensorové vrstvě.

Vyčítací vrstva (ASIC) je rozdělena na 256x256 individuálních pixelů. Každý pixel obsahuje potřebnou elektroniku ke zpracování náboje, vzniklého v sensorové vrstvě. Detailnější popis zpracování analogového náboje na úrovni jednotlivých pixelů, bude popsán pro konkrétní pixelový detektor Timepix 2 v části 2.3. Po analogovém zpracování signálu následuje digitální zpracování, poté je digitální signál převeden na výstupní plošky. Vyčítací vrstva je pomocí *wire bond* technologie připojena k desce plošných spojů. Signály

vedoucí z pixelových detektorů jsou následně zpracovány vyčítacím zařízením. Druhy vyčítacích zařízení budou popsány v části 2.2.



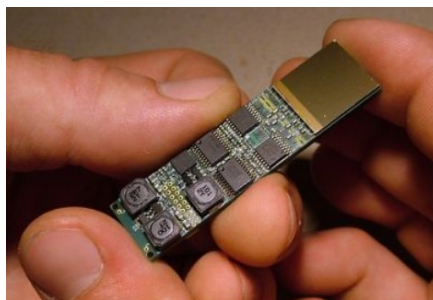
Obrázek 2.1: Rozložení hybridního pixelového detektoru Timepix [4]

## 2.2 Vyčítací zařízení pro pixelové detektory

Každý pixelový detektor z rodiny detektorů Timepix [1], má specifické požadavky pro návrh vyčítacího zařízení. Základními požadavky jakými jsou napájecí napětí detektoru a komunikační rozhraní s detektorem, musí být vždy splněny aby bylo možné spolehlivě komunikovat s pixelovým detektorem. Vyčítacích zařízení existuje celá řada. V této práci, respektive v následujících částech bude popsán návrh miniaturizovaného vyčítacího rozhraní. Pokusím se zde tedy uvést příklady miniaturizovaných zařízení.

### 2.2.1 USB Lite

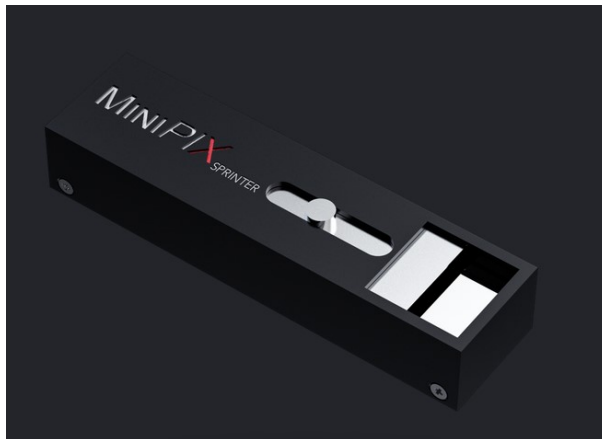
Dosud nejmenším vyčítacím zařízením rodiny detektorů Timepix [1], je zařízení *USB Lite* [5], viz. obrázek 2.2. Toto zařízení umožňuje komunikovat s detektorem Medipix 2 [6]. Rozměry zařízení jsou 60x15 mm. Rychlost vyčítání snímků je 4 fps a spotřeba zařízení je menší než 2 W [5].



Obrázek 2.2: Vyčítací zařízení *USB lite*

### 2.2.2 MiniPIX SPRINTER

Vyčítací zařízení MiniPIX SPRINTER je vyvíjeno společností ADVACAM, zařízení je možné vidět na obrázku 2.3. Toto zařízení umožňuje komunikovat s detektorem Timepix 2 [2]. Rozměry zařízení jsou 50x21x14 mm. Rychlost vyčítání snímků je 99 [7].



Obrázek 2.3: Vyčítací zařízení MiniPIX SPRINTER

### 2.2.3 Katherine pro Timepix 2

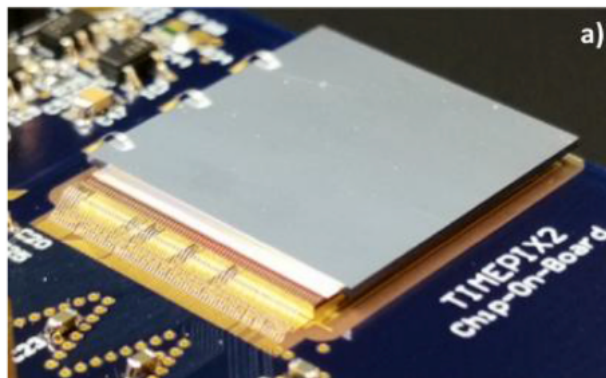
Posledním uvedeným typem vyčítacího zařízení je zařízení Kathrine pro Timepix 2, které můžete vidět na obrázku 2.4. Toto vyčítací zařízení se od předchozích dvou uvedených liší ve velikosti a maximální rychlosti komunikace. Zařízení se skládá ze dvou částí. Samotným vyčítacím zařízením, na obrázku 2.4 vpravo a takzvaným *chipboardem*, na obrázku 2.4 vlevo. Část chipboardu obsahuje detektor Timepix 2 a napájecí zdroje potřebné pro provoz detektoru. Dále jsou ze propojeny signály z konektoru od vyčítacího zařízení po samotný Timepix 2. Výhodou tohoto modulárního zapojení je možnost modifikace chipboardové části, bez nutnosti změn na straně vyčítacího zařízení. Tedy existuje možnost k jednomu vyčítacímu zařízení, připojit různé chipboardy. Parametry samotného vyčítacího zařízení jsou následující. Rozměry 100x80x28 mm, rychlost vyčítání až 3.2 Gbps [8].



Obrázek 2.4: Vyčítací zařízení Katherine pro Timepix 2 [8]

## 2.3 Timepix 2

V předchozí části 2.1, byly popsány obecné vlastnosti detektoru a základní principy detekce ionizujícího záření. V této kapitole bude detailněji popsán konkrétní detektor, detektor Timepix 2 [2]. Detektor byl vyvinut pod záštitou CERN Medipix Collaboration [3]. Timepix 2 patří do rodiny detektorů Timepix. Prvním z rodiny detektorů byl detektor Timepix [1], následně to popořadě byly detektory Timepix 3 [9], Timepix 2 [2], [10] a nejnovějším detektorem je Timepix 4 [11]. Detektor Timepix 2 je zobrazen na obrázku 2.5.



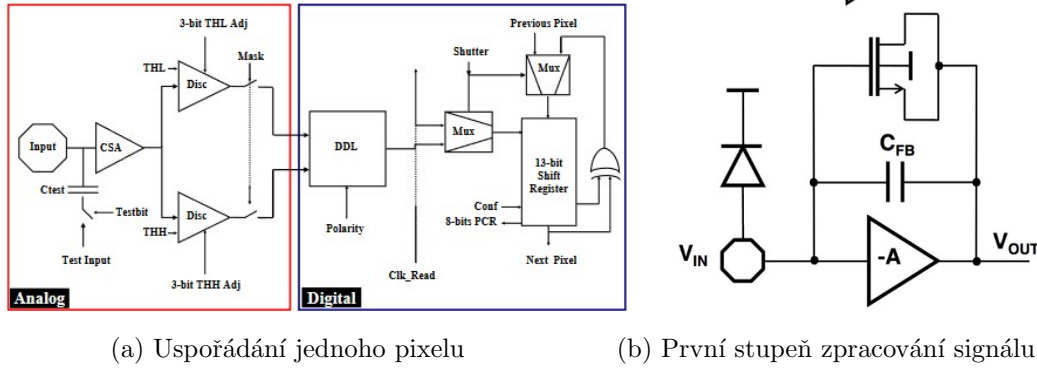
Obrázek 2.5: Detektor Timepix 2 [10]

### 2.3.1 Analogová část

Každý pixel z matice 256x256 pixelů má vlastní analogovou část. Jak bylo zmíněno v kapitole 2, pokud částice interaguje na senzorové vrstvě dojde k vytvoření nábojového impulsu. Tento náboj je díky připojenímu napětí přitážen k elektrodám. Tento náboj může být charakterizován jako Diracův proudový impuls. Integrací Diracovo proudového impulsu dostaneme celkový generovaný náboj  $Q$ . Diracův impuls je naintegrovan do malého kapacitoru  $C_f$ . Poté na výstupu CSA je v ideálním případě napěťový skok s amplitudou  $Q/C_f$  viz. 2.6b. Výstupní puls je poté porovnán s prahovou úrovní. Nastavením prahové úrovně lze eliminovat zbytkový proud, takzvaný *leakage current*, závěrného směru polovodičové struktury, který zde vznikl kvůli připojenímu vysokému napětí. Pokud je signál větší než daná nastavená úroveň, je inkrementován digitální čítač [1]. Každý diskriminátor obsahuje 5-bitový DAC převodník. Tento 5 bitový DAC převodník umožňuje nastavit úroveň detekovatelného signálu pro každý pixel individuálně a tím eliminovat šum. Uspořádání pro analogovou část lze vidět na obrázku 2.6a, kde je zobrazeno uspořádání jednoho pixelu detektoru Medipix 2.

### 2.3.2 Digitální část

Každý pixel obsahuje čtyři digitální čítače typu LSFR. Každý  $n$ -bitový čítač generuje  $2^n$  pseudonáhodných čísel. V případě Timepix 2 každý pixel obsahuje dva 10-bitové (A,B) a



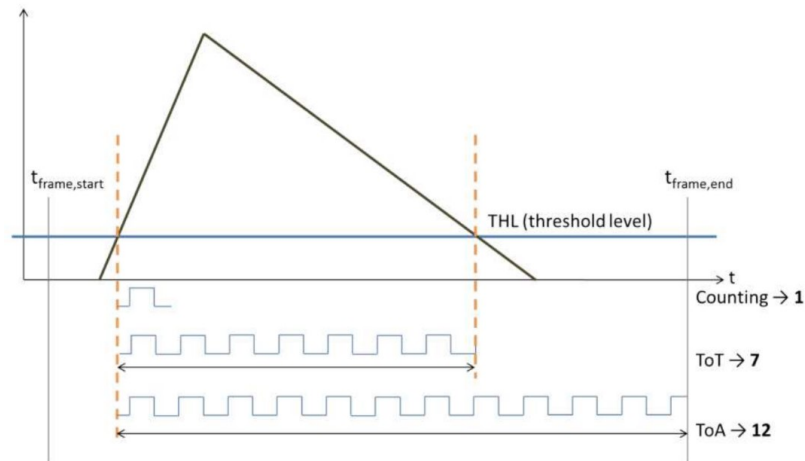
Obrázek 2.6: Zpracování signálu na úrovni pixelů

dva 4-bitové (C,D) čítače. Například tedy 14-bitový čítač vznikne kombinací 10-bitového a 4-bitového čítače. Odpovídající 14-bitová hodnota je poté viz 2.1. Celkem tedy pro každý pixel lze využít 28-bitů. Tyto čítače mohou pracovat v různých módech. Tyto módy budou probrány v další části.

$$14 - bit = (hodnota_{4-bit} \times 2^{10}) + hodnota_{10-bit} \quad (2.1)$$

Jak bylo zmíněno výše. Každý z digitálních čítačů může být nakonfigurován do jiného módu. Pro Timepix 2 jsou to následující módy 2.7.

- **Time over Threshold (ToT):** Čítač je inkrementován při každém hodinovém pulsu, kdy je signál nad nastavenou prahovou úrovní
- **Time of Arrival (ToA):** Čítač je inkrementován při každém hodinovém pulsu, kdy signál překročí nastavenou úroveň a inkrementuje se až do konce akvizice.
- **Countig mode:** Čítač je inkrementován pokud signál překročí dvakrát nastavený práh, viz. obrázek 2.7



Obrázek 2.7: Digitální módy Timepix 2 [19]

Jakou energii interagující částice zanechala v senzoru můžeme zjistit z ToT měření. Počet hodinových cyklů odpovídá času, po který hodnota analogového napětí byla nad nastavenou detekovatelnou úrovní. Více o způsobu měření energie například viz. [20].

### 2.3.3 Komunikační rozhraní

#### Logické úrovně

Timepix 2 umožňuje komunikaci po paraelním nebo sériovém datovém kanálu. Pro komunikaci přes paraelní bránu je možno využít 32 paraelních vodičů. Paraelní brána dosahuje násobně vyšších přenosových rychlostí, než sériový kanál, viz. obrázek 2.9. Dosažením takovýchto rychlostí je zapotřebí na straně vyčítací elektroniky použít velmi rychlé rozhraní, například FPGA.

Veškerá sériová komunikace probíhá po diferenciálních datových párech. Konkrétně se jedná o specifikaci SLVS [17]. Napěťové úrovně této specifikace lze najít na obrázku 2.8. Jak lze na obrázku 2.8 vidět, specifikace SLVS je analogická se specifikací LVDS [18]. Výhody sériové komunikace jsou především v návrhu a spotřebě vyčítacího zařízení. Maximální datové rychlost, respektive rychlost komunikačních hodin je dle [2] 100 Mhz. Lze tedy pro návrh použít například mikroprocesor. Hlavní nevýhodou sériové komunikace je oproti paraelní komunikaci vyčítací rychlost, která je násobně nižší 2.9.



Obrázek 2.8: SLVS specifikace [17]

# bits/pixel	Full Frame, serial port		Full frame, parallel port	
	$t_{\text{read}}$ [ms]	framerate [fps]	$t_{\text{read}}$ [ms]	framerate [fps]
4	2.62	381	0.08	12207
10	6.55	153	0.20	4883
14	9.18	109	0.29	3488
28	18.35	54	0.57	1744

Obrázek 2.9: Vyčítací rychlosti snímků z Timepix2. Frekvence hodin  $f_{\text{clock}} = 100$  MHz [2]



### Struktura komunikace

V této podkapitole bude popsána struktura komunikace s Timepix 2 za použití sériové komunikace popsané v 2.3.3. Komunikace s Timepix 2 se rozděluje na příkazy SET a GET. Příkazy SET nastavujeme příslušný registr a příkazy GET daný registr vyčítáme.

### 2.3.4 Technická specifikace

Timepix 2 je rozdělen do 256 x 256 pixelů. Rozteč mezi jednotlivými pixely je 55  $\mu\text{m}$ . Celkově pak Timepix 2 má rozměry 16.6 x 14.14 mm. Vyčítací část detektoru tvoří ASIC chip navržen ve 130 nm CMOS technologii. Samotná výroba ASIC je zajišťována jedním z předních výrobců chipů, firmou TSMC [12] na Taiwanu. Všechny technické informace, nebude-li uvedeno jinak jsou čerpány z manuálu k detektoru Timepix 2 [2].

### Napájení

Timepix 2 ke své činnosti potřebuje celkem 3 napájení viz. tabulka 2.1. Napájení VDD a VDDA slouží k napájení jádra Timepix 2, napájení VDDIO pak k napájení vstupních výstupních bran. Pokud chceme z Timepix 2 vyčíst CHIP ID, musíme na pin VDD33 aplikovat napájecí napětí 2.5 V. Při normální činnosti detektoru, je požadováno napětí 1.2 V. Celková spotřeba Timepix 2 při zapnutí všech pixelů a frekvenci datových hodin  $f_{clock} = \text{Mhz}$  je dle [10] nižší než 900 mW.

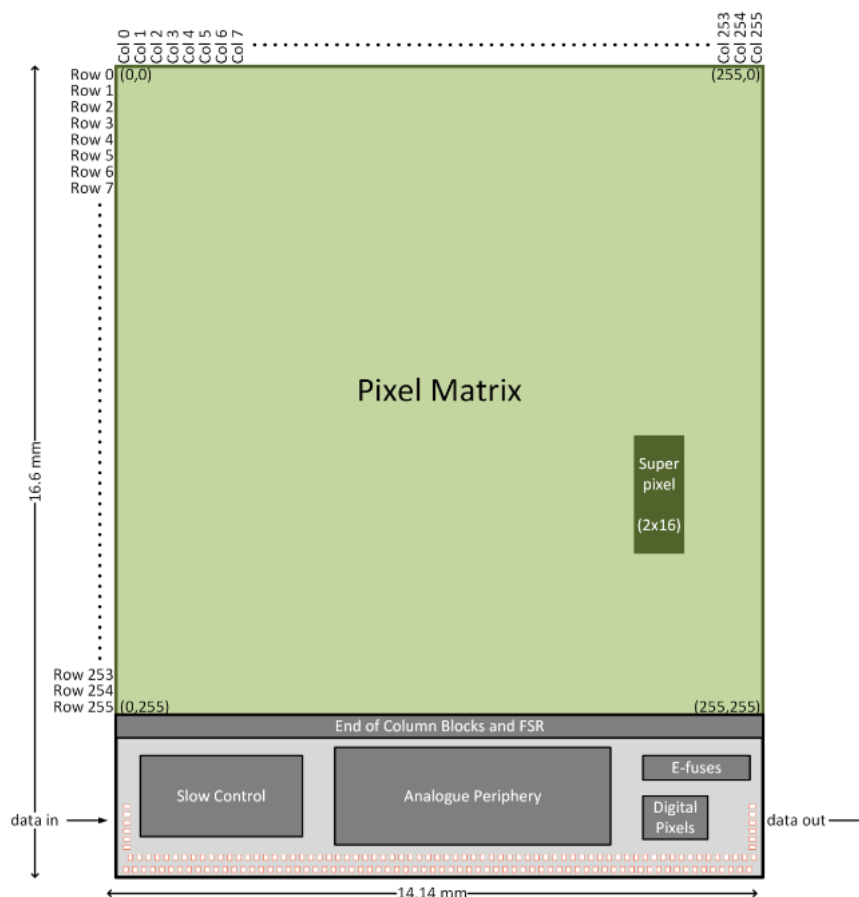
Napájecí úrovně Timepix 2	
Název pinu	Hodnota napájecího napětí [V]
VDDIO	2.5
VDD	1.2
VDDA	1.2
VDD33	2.5 (1.2)

Tabulka 2.1: Napájecí úrovně Timepix 2

Speciální kategorií napájení je napájení pro zajištění vysokého napětí, které se připojí na sensorovou vrstvu. Toto napětí zajistí vyprázdnění oblasti v polovodičové struktuře. Požadavky na parametry vysokého napětí záleží na typu a tloušťce sensorové vrstvy. Nejčastěji používaným materiálem sensorové vrstvy je křemík. Například vysoké velikost napětí použitá pro testování Timepix 2 se sensorovou vrstvou křemíku o tloušťce 500  $\mu\text{m}$  dle [13] byla 100 V. Příklady velikosti vysokého napětí používaných pro křemíkové sensorové vrstvy lze najít v odkazech [14], [15].

### Rozhraní pro připojení Timepix 2 k desce plošných spojů

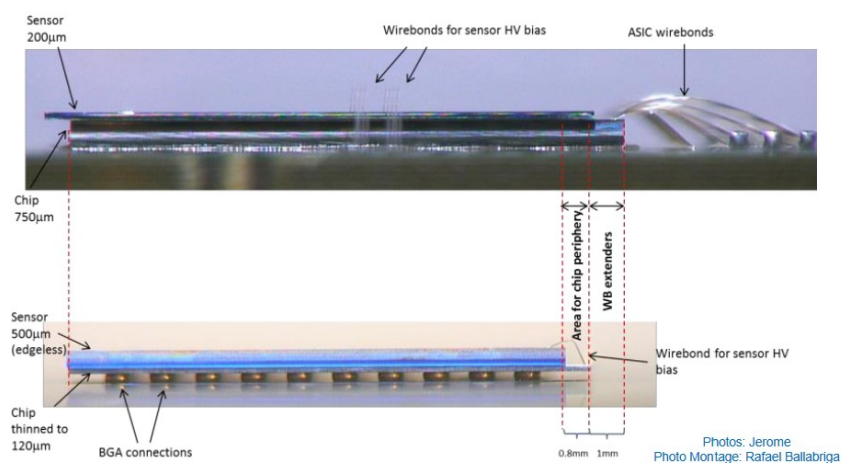
Připojení Timepix 2 k desce plošných spojů je nejčastěji realizováno pomocí technologie *wire bonding*. Timepix 2 má celkem 152 pinů pro přichycení wire bondů. Rozložení pinů je zobrazeno na obrázku 2.10 ve spodní části. Rozteč mezi jednotlivými plošky je  $108\ \mu\text{m}$ . Dalším možným způsobem připojení Timepix 2 k desce plošných spojů je pomocí



Obrázek 2.10: Rozložení detektoru Timepix 2 [2]

technologie zvané TSV. Respektive pomocí této technologie je možné signály vyvést ze zadní strany Timepix 2 k pájecím ploškám. Vznikne tím tak uspořádání, známe z technologie výroby pouzder BGA elektronických součástek.

Běžnější způsob připojení Timepix 2 k desce plošných spojů je pomocí wire bondů. Použití wire bondů i technologie BGA je možné vidět na obrázku 2.11. Výhodou oproti technologii wire bondů je lepší praktické zacházení, díky absenci tenkých wire bondů, které jsou velmi náchylné na mechanické poškození. Další výhodou je poté technologicky méně náročné připojení detektoru. Avšak nevýhodou této technologie je vystavení chipu vysoké teplotě při pájení.



Obrázek 2.11: Připojení detektoru Timepix 2 k desce plošných spojů [16]

## Kapitola 3

# Návrh řešení

### 3.1 Koncept řešení

### 3.2 Požadavky na realizaci

#### 3.2.1 Zpracování dat

#### 3.2.2 Komunikační rozhraní

#### 3.2.3 Napájení

#### 3.2.4 Mechanika

# Kapitola 4

## Realizace

### 4.1 Základní deska

#### 4.1.1 Mikrokontrolér

#### 4.1.2 Napájení

#### 4.1.3 Konverze logických úrovní

#### 4.1.4 USB

### 4.2 Deska s Timepix 2

#### 4.2.1 Napájení Timepix 2

#### 4.2.2 Vysokonapěťový zdroj

#### 4.2.3 Měření teploty

# Kapitola 5

## Testování

### 5.1 Napájení

### 5.2 Vysokonapěťový zdroj

### 5.3 Měření teploty

### 5.4 Komunikační rozhraní s Timepix 2

### 5.5 Digitální test Timepix 2

#### 5.5.1 Vyčtení chip ID

#### 5.5.2 Vyčtení a zapsání pixelových matic

### 5.6 USB komunikace

### 5.7 Měření spotřeby

#### 5.7.1 Porovnání spotřeby

### 5.8 Dosažené parametry

Kapitola 6

Závěr

# Seznam použité literatury

- [1] X. Llopart Cudié, *Design and characterization of 64K pixels chips working in single photon processing mode*. PhD thesis, Mid Sweden University, 2007. ISBN: 978-91-85317-56-1.
- [2] J. Alozy, R. Ballabriga, I. Kremastiotis, X. Llopart, T. Poikela, V. Sriskaran, and W. Wong, “Timepix2 Manual (v2.1),” April 12 2019. CERN, Geneva.
- [3] CERN, “Web presentation of the Medipix Collaboration.” Dostupné z: [www.cern.ch/medipix](http://www.cern.ch/medipix).
- [4] M. Platkevič, *Signal Processing and Data Read-Out from Position Sensitive Pixel Detectors*. PhD thesis, ČVUT, 2014.
- [5] Z. Vykydal and J. Jakůbek, “USB lite - Miniaturized readout interface for Medipix2 detector,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, vol. 633, pp. 48–49, 2011. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900210013082/pdf?md5=733e9d449a2e198b6559b52d5fbe242f&pid=1-s2.0-S0168900210013082-main.pdf>.
- [6] CERN, “Web presentation of the Medipix Collaboration.” Dostupné z: <https://medipix.web.cern.ch/medipix2>.
- [7] ADVACAM, “Web presentation of the MiniPIX SPRINTER.” Dostupné z: <https://advacam.com/camera/minipix-sprinter>.
- [8] P. Burian, P. Broulím, B. Bergmann, and L. Tlustos, “Ethernet embedded readout interface for timepix2—katherine readout for timepix2,” *Journal of Instrumentation*, vol. 15, p. C01037, jan 2020.
- [9] T. Poikela, J. Plosila, T. Westerlund, M. Campbell, M. D. Gaspari, X. Llopart, V. Gromov, R. Kluit, M. van Beuzekom, F. Zappon, V. Zivkovic, C. Brezina, K. Desch, Y. Fu, and A. Kruth, “Timepix3: a 65k channel hybrid pixel readout chip with simultaneous toa/tot and sparse readout,” *Journal of Instrumentation*, vol. 9, p. C05013, may 2014.



- [10] W. Wong, J. Alozy, R. Ballabriga, M. Campbell, I. Kremastiotis, X. Llopart, T. Poikela, V. Sriskaran, L. Tlustos, and D. Turecek, “Introducing timepix2, a frame-based pixel detector readout asic measuring energy deposition and arrival time,” *Radiation Measurements*, vol. 131, p. 106230, 2020.
- [11] X. Llopart, J. Alozy, R. Ballabriga, M. Campbell, R. Casanova, V. Gromov, E. Heijne, T. Poikela, E. Santin, V. Sriskaran, L. Tlustos, and A. Vitkovskiy, “Timepix4, a large area pixel detector readout chip which can be tiled on 4 sides providing sub-200 ps timestamp binning,” *Journal of Instrumentation*, vol. 17, p. C01044, jan 2022.
- [12] TSMC, “Web presentation of the TSMC.” Dostupné z: <https://www.tsmc.com/english>.
- [13] S. George, D. Turecek, S. Wheeler, S. Kodaira, and L. Pinsky, “First tests with timepix2 and heavy ions,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 958, p. 162725, 2020. Proceedings of the Vienna Conference on Instrumentation 2019.
- [14] S. Pospisil, “Timepix hybrid pixels detectors for particle identification and dosimetry.” Dostupné z: <https://indico.cern.ch/event/954194/contributions/4009245/attachments/2156334/3637201/Stanislav%20Pospisil%20-%20SP-Dakar-Timepix-lecture-fin.pdf>.
- [15] L. S. Pinsky, “An Update on the Timepix2.” Dostupné z: <https://wrmiss.org/workshops/twentyfourth/Pinsky.pdf>.
- [16] V. Re, “Web presentation of the TSV.” Dostupné z: [https://indico.cern.ch/event/710050/contributions/3185372/attachments/1741432/2817619/11\\_20\\_Re\\_Vertex\\_2018.pdf](https://indico.cern.ch/event/710050/contributions/3185372/attachments/1741432/2817619/11_20_Re_Vertex_2018.pdf).
- [17] F. Tavernier and P. Moreira, “SLVS interface circuits.” Dostupné z: [https://indico.cern.ch/event/404345/contributions/1850202/attachments/809975/1109940/SLVS\\_IO](https://indico.cern.ch/event/404345/contributions/1850202/attachments/809975/1109940/SLVS_IO).
- [18] “Ieee standard for low-voltage differential signals (lvds) for scalable coherent interface (sci),” *IEEE Std 1596.3-1996*, pp. 1–34, 1996.
- [19] P. Mánek, “Machine learning approach to ionizing particle recognition using hybrid active pixel detector,” Master’s thesis, ČVUT, 2018.
- [20] J. Jakubek, “Precise energy calibration of pixel detector working in time-over-threshold mode,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 633, pp. S262–S266, 2011. 11th International Workshop on Radiation Imaging Detectors (IWORID).

# Seznam použitých symbolů

$\alpha$  alfa

# Seznam použitých zkratek

ASIC	Application Specify Integrated Circuit
TSMC	Taiwan Semiconductor Manufacturing Company Limited
TSV	Through-Silicon-Vias
BGA	Ball Grid Array
FPGA	Field Programmable Gate Arrays
CMOS	Complementary metal–oxide–semiconductor
DAC	Digital to Analog Convertor
LSFR	Linear Feedback Shift Registers
PCB	Printed Circuit Board