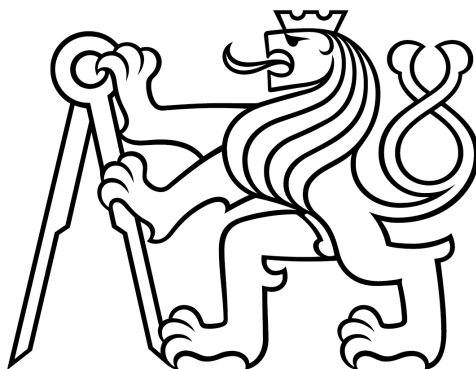


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA MIKROELEKTRONIKY



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

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Úvod | 1 |
| 2 | Pixelové detektory radiace | 2 |
| 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 | 3 |
| 2.2.3 | Katherine pro Timepix 2 | 4 |
| 3 | Timepix 2 | 5 |
| 3.1 | Technická specifikace | 5 |
| 3.1.1 | Napájení | 5 |
| 3.1.2 | Rozhraní pro připojení Timepix 2 k desce plošných spojů | 6 |
| 3.2 | Komunikační rozhraní | 6 |
| 3.2.1 | Logické úrovně | 6 |
| 3.2.2 | Struktura komunikace | 8 |
| 3.2.3 | Vstupní, výstupní brána | 8 |
| 3.3 | Analogová část | 8 |
| 3.4 | Digitální část | 9 |
| 4 | Návrh řešení | 11 |
| 4.1 | Blokový diagram | 11 |
| 4.2 | Požadavky na realizaci | 11 |
| 4.2.1 | Výpočetní výkon | 11 |
| 4.2.2 | Komunikační rozhraní | 11 |
| 4.2.3 | Spotřeba | 11 |
| 4.2.4 | Mechanika | 11 |
| 5 | Realizace | 12 |
| 5.1 | Základní deska | 12 |
| 5.1.1 | Procesor | 12 |
| 5.1.2 | Napájení | 12 |
| 5.1.3 | Konverze logických úrovní | 12 |
| 5.1.4 | USB | 12 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 5.2 | Deska s Timepix 2 | 12 |
| 5.2.1 | Napájení Timepix 2 | 12 |
| 5.2.2 | Vysokonapěťový zdroj | 12 |
| 5.2.3 | Měření teploty | 12 |
| 6 | Testování | 13 |
| 6.1 | Digitální test Timepix 2 | 13 |
| 6.1.1 | Vyčtení a zapsání pixelových matic | 13 |
| 6.1.2 | Vyčtení chip ID | 13 |
| 6.2 | Měření spotřeby | 13 |
| 6.2.1 | Porovnání spotřeby | 13 |
| 6.3 | Dosažené parametry | 13 |
| 7 | Závěr | 14 |
| | Seznam použité literatury | 16 |
| | Seznam použitých symbolů | 17 |
| | Seznam použitých zkratk | 18 |

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 |
| 3.1 | Detektor Timepix 2 [10] | 5 |
| 3.2 | Rozložení detektoru Timepix 2 [2] | 7 |
| 3.3 | Připojení detektoru Timepix 2 k desce plošných spojů [13] | 7 |
| 3.4 | SLVS specifikace [14] | 8 |
| 3.5 | Vyčítací rychlosti snímků z Timepix2. Frekvence hodin $f_{clock} = 100$ MHz [2] | 8 |
| 3.6 | Uspořádání jednoho pixelu | 9 |
| 3.7 | Digitální módy Timepix 2 [16] | 10 |

Seznam tabulek

| | |
|---|---|
| 3.1 Napájecí úrovně Timepix 2 | 6 |
|---|---|

Kapitola 1

Úvod

Kapitola 2

Pixelové detektory radiace

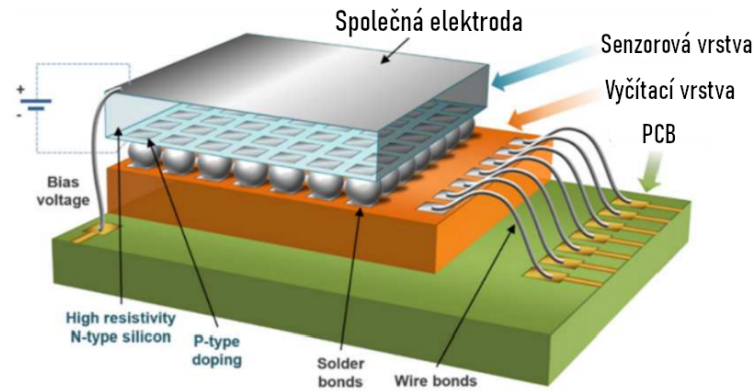
Mezi možnosti detekovat ionizující záření patří mimo jiné, použití pixelových detektorů. Pomocí pixelových detektorů, konkrétněji hybridních pixelových detektorů, jsme schopni detailně změřit ionizující záření, které interaguje s detektorem. V dalších částech této kapitoly bude popsána obecná činnost a princip detekce radiace pixelových detektorů. V kapitole 3, bude konkrétně popsán detektor z rodiny Timepix [1], konkrétněji detektor Timepix 2 [2].

2.1 Princip činnosti pixelových detektorů

V této části bude popsán obecný princip činnosti 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.

Sensorová 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 signálu na úrovni jednotlivých pixelů, bude popsán pro konkrétní pixelový detektor Timepix 2 v kapitole 3. Signál po zpracování v jednotlivých pixelech digitální společnou částí vyčítací vrstvy převeden na výstupní plošky. Vyčítací vrstva je poté 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 následující části.



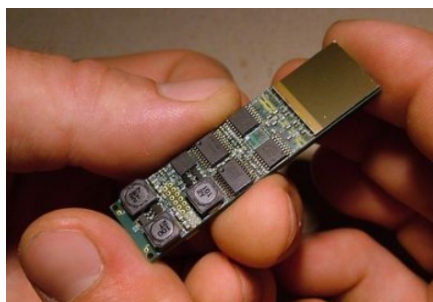
Obrázek 2.1: Rozložení hybridního pixelového detektoru Timepix [4]

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 pracovat s pixelovým detektorem. Vyčítacích zařízení existuje celá řada. V této práci, respektive v následujících částech bude popsán návrh miniaturizovaného vyčítacího rozhraní. Pokusím se zde uvést příklady miniaturizovaných zařízení.

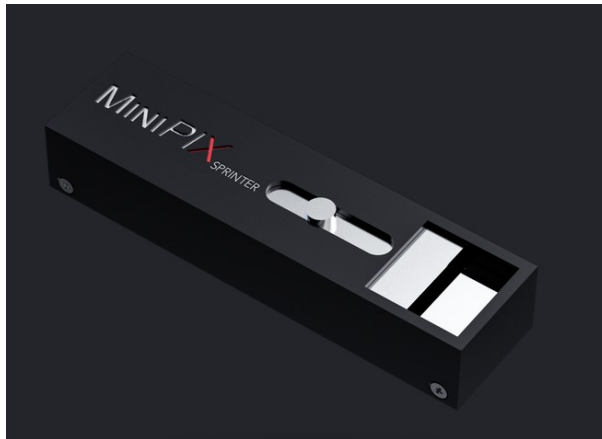
2.2.1 USB Lite

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 viz., obrázek 2.4. Toto vyčítací zařízení se od předchozích dvou uvedených liší ve velikosti a rychlosti zařízení. 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. Tedy možnost k jednomu vyčítacímu zařízení, připojit různé *chipboardy*. Parametry samotného vyčítacího zařízení jsou následující. Rozměry 100 x 80 x 28 mm, rychlost vyčítání až 3.2 Gbps [8].

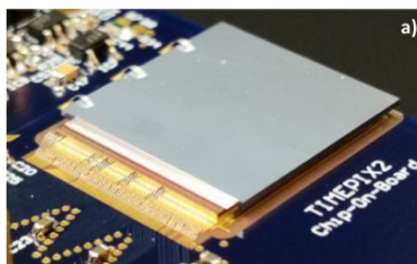


Obrázek 2.4: Vyčítací zařízení Katherine pro Timepix 2 [8]

Kapitola 3

Timepix 2

V předchozí kapitole, kapitole 2, byly popsány obecné vlastnosti detektoru a základní principy detekce ionizujícího záření. V této kapitole bude detailněji popsán konkrétní detektor, detektor Timepix 2 [2]. 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 3.1.



Obrázek 3.1: Detektor Timepix 2 [10]

3.1 Technická specifikace

Timepix 2 je rozdělen do 256 x 256 pixelů. Rozteč mezi jednotlivými pixely je 55 μm . Celkově pak Timepix 2 má rozměry 16.6 x 14.14 mm. Detektor byl vyvinut pod záštitou CERN Medpipix Collaboration [3]. Vyčítací část detektoru tvoří ASCI 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].

3.1.1 Napájení

Timepix 2 ke své činnosti potřebuje celkem 3 napájení viz. tabulka 3.1. 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 3.1: Napájecí úrovně Timepix 2

3.1.2 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 3.2 ve spodní části. Rozteč mezi jednotlivými plošky je 108 μm . Dalším možným způsobem připojení Timepix 2 k desce plošných spojů je pomocí 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.

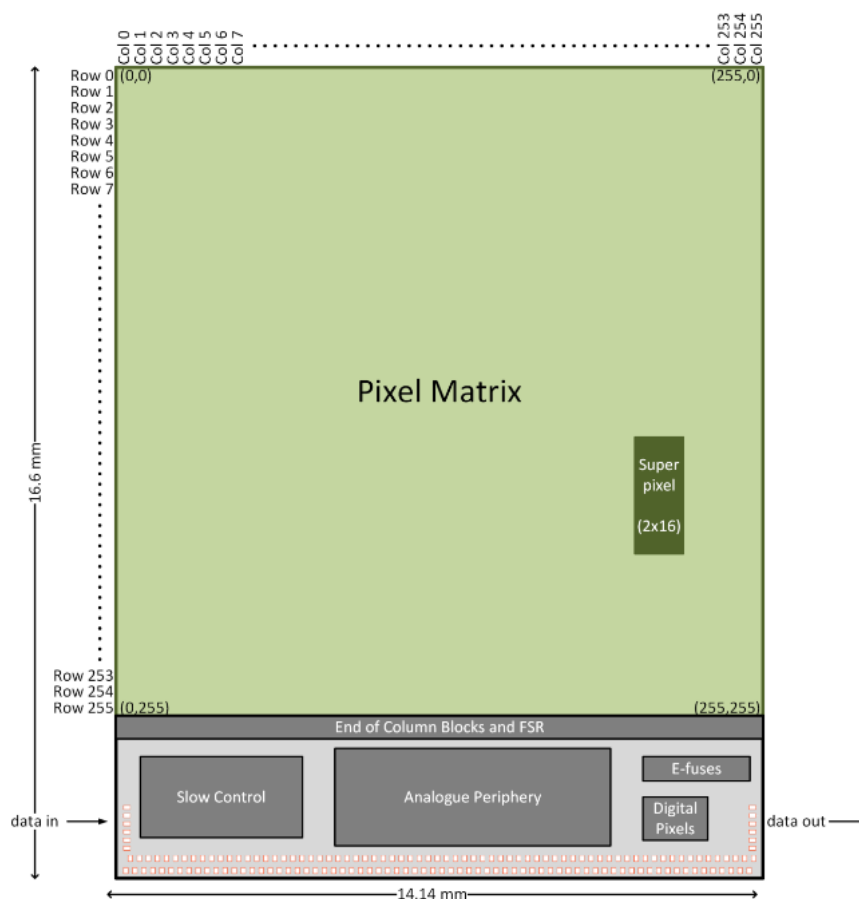
Běžnější způsob připojení Timepix 2 k desce plošných spojů je pomocí wire bondů. Použití wire bondů i technologie BGA je možné vidět na obrázku 3.3. Výhodou oproti technologii wire bondů je lepší praktické zacházení, díky absenci tenkých wire bondů, které jsou velmi náchylné na mechanické poškození. Další výhodou je poté technologicky méně náročné připojení detektoru. Avšak nevýhodou této technologie je vystavení chipu vysoké teplotě při pájení.

3.2 Komunikační rozhraní

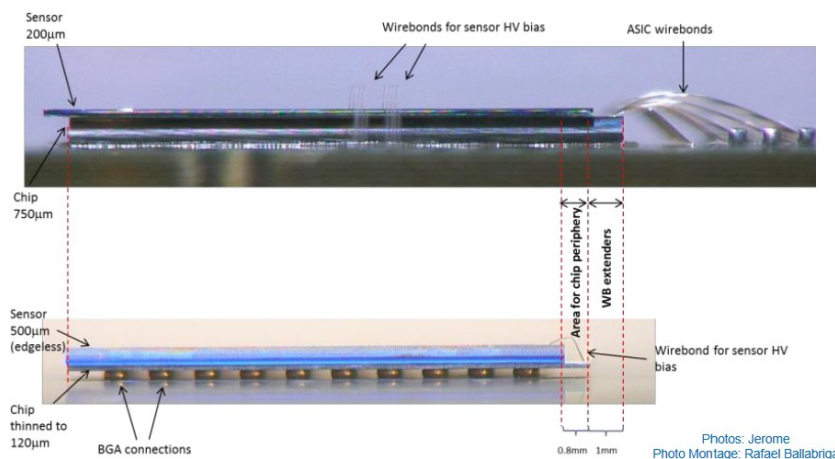
3.2.1 Logické úrovně

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 3.5. 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 [14]. Napěťové úrovně této specifikace lze najít na obrázku 3.4. Jak

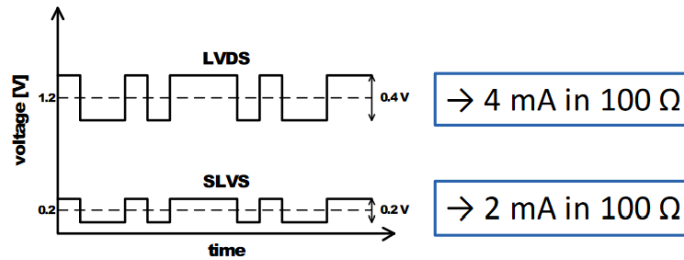


Obrázek 3.2: Rozložení detektoru Timepix 2 [2]



Obrázek 3.3: Připojení detektoru Timepix 2 k desce plošných spojů [13]

lze na obrázku 3.4 vidět, specifikace SLVS je analogická se specifikací LVDS [15]. 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 paralelní komunikaci vyčítací rychlost, která je násobně nižší 3.5.



Obrázek 3.4: SLVS specifikace [14]

| # bits/pixel | Full Frame, serial port | | Full frame, parallel port | |
|--------------|-------------------------|-----------------|---------------------------|-----------------|
| | t_{read} [ms] | framerate [fps] | t_{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 |

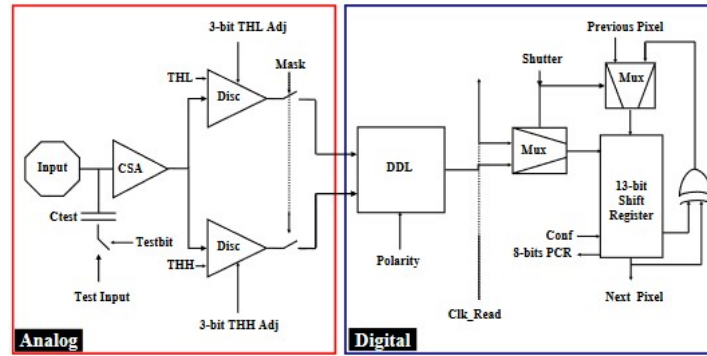
Obrázek 3.5: Vyčítací rychlosti snímků z Timepix2. Frekvence hodin $f_{\text{clock}} = 100$ MHz [2]

3.2.2 Struktura komunikace

V této podkapitole bude popsána struktura komunikace s Timepix 2 za použití sériové komunikace popsané v 3.2.1.

3.3 Analogová část

Každý jeden z 256 x 256 pixelů celé matice Timepix 2 je tvořen svojí vlastní analogovou částí. Jak bylo zmíněno v kapitole 2, pokud částice interaguje na senzorové vrstvě dojde k vytvoření nábojového impulsu. Tento náboj je díky připojenému napětí přitážen k elektrodám. Tento náboj může být charakterizován jako Diracův proudový impuls. Integrací Diracovo proudového impulsu poté dostaneme celkový generovaný náboj Q . Diracův impuls je naintegrován do malého kapacitoru C_f . Poté na výstupu CSA je v ideálním případě napěťový skok s amplitudou Q/C_f . Výstupní puls je poté porovnán s komparační. Nastavením komparačním úrovně lze eliminovat zbytkový proud takzvaný *leakage current* závěrného směru polovodičové struktury který zde vzniká kvůli připojenému 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. Analogické uspořádání pro analogovou část lze vidět na obrázku 3.6, kde je zobrazeno uspořádání jednoho pixelu detektoru Medipix 2.



Obrázek 3.6: Uspořádání jednoho pixelu

3.4 Digitální část

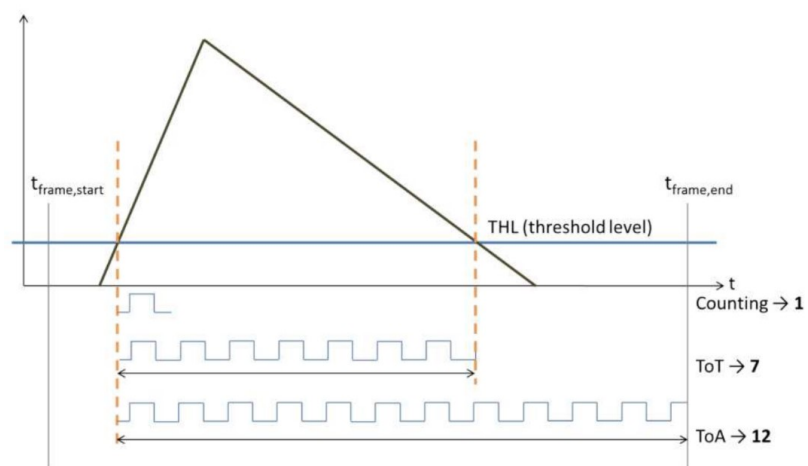
Každý pixel obsahuje čtyři digitální čítače typu LSFR. Každý n -bitový čítač generuje 2^n pseudonáhodných čísel. V případě Timepix 2 každý pixel obsahuje dva 10-bitové (A,B) a dva 4-bitové (C,D) čítače. Například tedy 14-bitový čítač vznikne kombinací 10-bitového a 4-bitového čítače. Odpovídající 14-bitová hodnota je poté viz 3.1. Celkem tedy pro každý pixel lze využít 28-bitů. Tyto čítače mohou pracovat v různých módech. Tyto módy budou probírány v další části.

$$14 - bit = (hodnota_{4-bit} \times 2^{10}) + hodnota_{10-bit} \quad (3.1)$$

Jak bylo zmíněno výše. Každý z digitálních čítačů může být nakonfigurován do jiného módu. Pro Timepix 2 jsou to následující módy 3.7.

- **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.
- **Counting mode:** Čítač je inkrementován pokud signál překročí dvakrát nastavený práh, viz. obrázek 3.7

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. [17].



Obrázek 3.7: Digitální módy Timepix 2 [16]

Kapitola 4

Návrh řešení

4.1 Blokový diagram

4.2 Požadavky na realizaci

4.2.1 Výpočetní výkon

4.2.2 Komunikační rozhraní

4.2.3 Spotřeba

4.2.4 Mechanika

Kapitola 5

Realizace

5.1 Základní deska

5.1.1 Procesor

5.1.2 Napájení

5.1.3 Konverze logických úrovní

5.1.4 USB

5.2 Deska s Timepix 2

5.2.1 Napájení Timepix 2

5.2.2 Vysokonapěťový zdroj

5.2.3 Měření teploty

Kapitola 6

Testování

6.1 Digitální test Timepix 2

6.1.1 Vyčtení a zapsání pixelových matic

6.1.2 Vyčtení chip ID

6.2 Měření spotřeby

6.2.1 Porovnání spotřeby

6.3 Dosažené parametry

Kapitola 7

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.
- [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] 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.
- [14] F. Tavernier and P. Moreira, “SLVS interface circuits.” Dostupné z: https://indico.cern.ch/event/404345/contributions/1850202/attachments/809975/1109940/SLVS_IO.
- [15] “Ieee standard for low-voltage differential signals (lvds) for scalable coherent interface (sci),” *IEEE Std 1596.3-1996*, pp. 1–34, 1996.
- [16] P. Mánek, “Machine learning approach to ionizing particle recognition using hybrid active pixel detector,” Master’s thesis, ČVUT, 2018.
- [17] 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

α 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 |