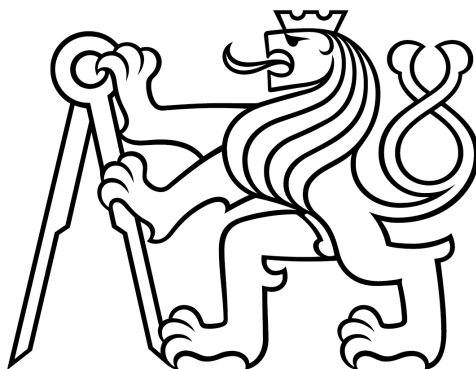


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA MIKROELEKTRONIKY



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 a vyčítací zařízení	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
2.3	Timepix 2	5
2.3.1	Matrice pixelů	5
2.3.2	Technická specifikace	8
3	Návrh řešení	13
3.1	Koncept řešení	13
3.1.1	Komunikace s Timepix 2	14
3.1.2	Uživatelské rozhraní	14
3.1.3	Napájení	14
3.1.4	Mechanika	15
	Seznam použité literatury	18
	Seznam použitých symbolů	19
	Seznam použitých zkratk	20
A	Zadání Diplomové práce	21
B	Základní deska	22

Seznam obrázků

2.1	Rozložení hybridního pixelového detektoru Timepix [4]	3
2.2	Vyčítací zařízení <i>USB lite</i>	4
2.3	Vyčítací zařízení MiniPIX SPRINTER	4
2.4	Vyčítací zařízení Katherine pro Timepix 2 [8]	5
2.5	Schematické rozložení detektoru Timepix 2 [2]	6
2.6	Uspořádání jednoho pixelu [10]	7
2.7	Digitální módy Timepix 2 [13]	8
2.8	SLVS specifikace [15]	9
2.9	Vyčítací rychlosti snímků z Timepix2. Frekvence hodin $f_{clock} = 100$ MHz [10]	10
2.10	Připojení detektoru Timepix 2 k desce plošných spojů [21]	12
3.1	Koncept řešení vyčítacího rozhraní pro detektor Timepix 2	14

Seznam tabulek

2.1	Napájecí úrovně Timepix 2	10
-----	-------------------------------------	----

Kapitola 1

Úvod

Kapitola 2

Pixelové detektory radiace a vyčítací zařízení

Jednou z možností jak detekovat ionizující záření, patří mimo jiné, použití pixelových detektorů. Pomocí pixelových detektorů, konkrétněji hybridních pixelových detektorů, jsme schopni detailně změřit ionizující záření. V této kapitole bude popsána obecná činnost a princip detekce ionizujícího záření za použití pixelových detektorů. V části 2.3, bude detailně popsán detektor z rodiny pixelových detektorů Timepix [1], detektor Timepix 2 [2], který je jednou z hlavních součástí této diplomové práce.

2.1 Princip činnosti pixelových detektorů

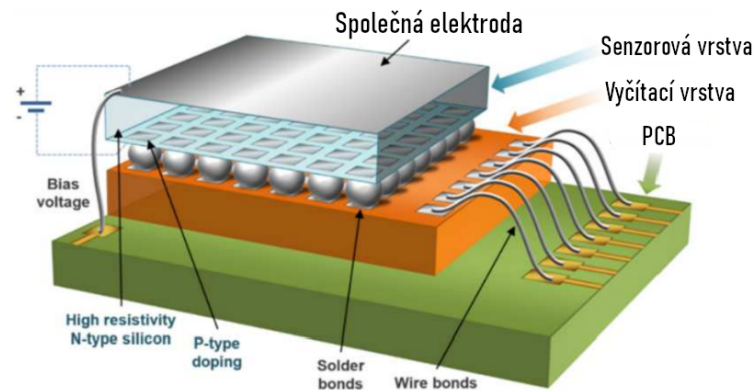
V této části bude popsán obecný princip činnosti pixelových detektorů, který je společný pro všechny detektory radiace z rodiny Timepix [1], vyvíjenými pod záštitou CERN Medpipix Collaboration [3].

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*. 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. Vyčítací elektronika se nachází ve vyčítací vrstvě, která je připojena k sensorové vrstvě za pomoci technologie nazývané se *bump bond*.

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. Následně je zpracovaný signál vyveden na výstupní plošky detektoru. Vyčítací vrstva je pomocí *wire bond* technologie připojena k desce plošných spojů viz obrázek 2.1. Signály vedoucí z pixelového detektoru jsou následně zpracovány vyčítacím zařízením. Příklady vyčítacích zařízení budou popsány v následující části 2.2.



Obrázek 2.1: Rozložení hybridního pixelového detektoru Timepix [4]

2.2 Vyčítací zařízení pro pixelové detektory

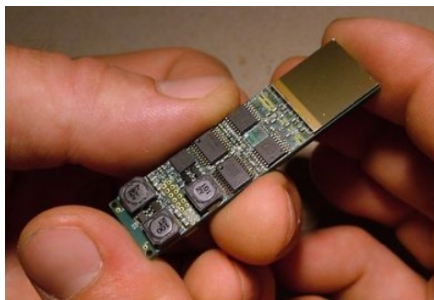
Každý pixelový detektor z rodiny detektorů Timepix [1], má specifické požadavky pro návrh vyčítacího zařízení. Základními požadavky, kterými jsou napájecí napětí detektoru a komunikační rozhraní detektoru, musí být splněny aby bylo možné spolehlivě komunikovat s daným pixelovým detektorem. Vyčítacích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

2.2.1 USB Lite

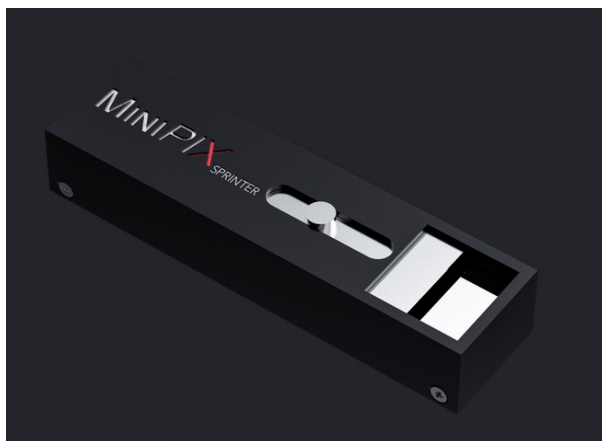
Dosud nejmenším vyčítacím zařízením rodiny detektorů Timepix [1], je zařízení *USB Lite* [5], které je zobrazeno na obrázku 2.2. Toto zařízení umožňuje komunikovat s detektorem Medipix 2 [6]. Rozměry zařízení jsou 60x15 mm. Rychlost vyčítání z pixelového detektoru je 4 fps. Spotřeba zařízení je menší než 2 W [5].

2.2.2 MiniPIX SPRINTER

Vyčítací zařízení MiniPIX SPRINTER je vyvíjeno společností ADVACAM [7], zařízení je možné vidět na obrázku 2.3. Toto zařízení umožňuje komunikovat s pixelovým detektorem radiace Timepix 2 [2]. Rozměry zařízení jsou 80x21x14 mm. Rychlost vyčítání snímků je

Obrázek 2.2: Vyčítací zařízení *USB lite*

99 fps [7]. Uživatelské komunikační rozhraní je USB 2.0 Full Speed s maximální přenosovou rychlostí 12 Mbit/s.



Obrázek 2.3: Vyčítací zařízení MiniPIX SPRINT

2.2.3 Katherine pro Timepix 2

Posledním uvedeným typem vyčítacího zařízení v této práci je zařízení Katherine pro Timepix 2 [8], které můžete vidět na obrázku 2.4. Toto vyčítací zařízení se od předchozích dvou uvedených liší ve velikosti a maximální vyčítací rychlosti. Katherine pro Timepix 2 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 zde propojeny signály z konektoru od vyčítacího zařízení po samotný detektor Timepix 2. Výhodou tohoto modulárního zapojení je možnost modifikace části obsahující pixelový detektor, bez nutnosti změn na straně vyčítacího zařízení. Tedy existuje možnost k jednomu vyčítacímu zařízení, připojit různé pixelové detektory radiace. 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 pixelových detektorů a základní principy detekce ionizujícího záření. V této kapitole bude detailněji popsán konkrétní detektor, detektor Timepix 2 [2]. Detektor byl vyvinut pod záštitou CERN Medpipix Collaboration [3]. Timepix 2 patří do rodiny detektorů Timepix, kde prvním z rodiny detektorů byl detektor Timepix [1], následně to popořadě byly detektory Timepix 3 [9], Timepix 2 [2], [10] a v současné době nejnovější detektor Timepix 4 [11]. Schematické rozložení detektoru Timepix 2 je zobrazeno na obrázku 2.5.

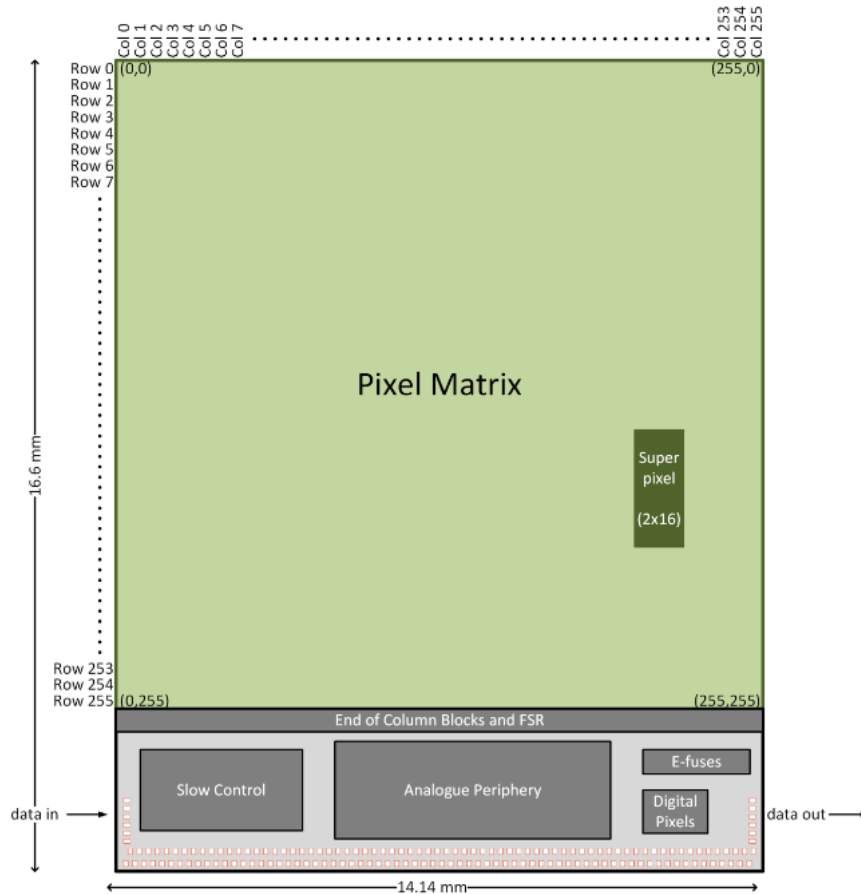
2.3.1 Matice pixelů

Detektor je tvořen maticí 256 x 256 pixelů s roztečí 55 μm . Každý pixel má vlastní analogovou a digitální část, tyto jednotlivé části budou popsány v následujících částech 2.3.1 a 2.3.1. Schematické zobrazení jednoho pixelu a jeho analogové a digitální části je možné najít na obrázku 2.6.

Analogová část

Každý pixel z matice má vlastní analogovou část, viz. obrázek 2.6. Jak bylo zmíněno v kapitole týkající se obecného principu detekce ionizujícího záření 2, pokud ionizující částice interaguje na sensorové vrstvě dojde k vytvoření nábojového impulsu. Tento náboj je díky připojenímu vysokému napětí přitážen k vyčítacím elektrodám. Vytvořený náboj může být charakterizován jako Diracův proudový impuls. Integrací Diracovo proudového impulsu poté dostaneme celkový generovaný náboj Q .

Analogové zpracování signálů na úrovni jednotlivých pixelů poté probíhá následovně. Diracův proudový impuls vytvořený na sensorové vrstvě je naintegrován do malého vstupního kapacitoru C_{FB} z obrázku 2.6. Poté na výstupu CSA je v ideálním případě napěťový skok s amplitudou Q/C_f viz. 2.6. 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



Obrázek 2.5: Schematické rozložení detektoru Timepix 2 [2]

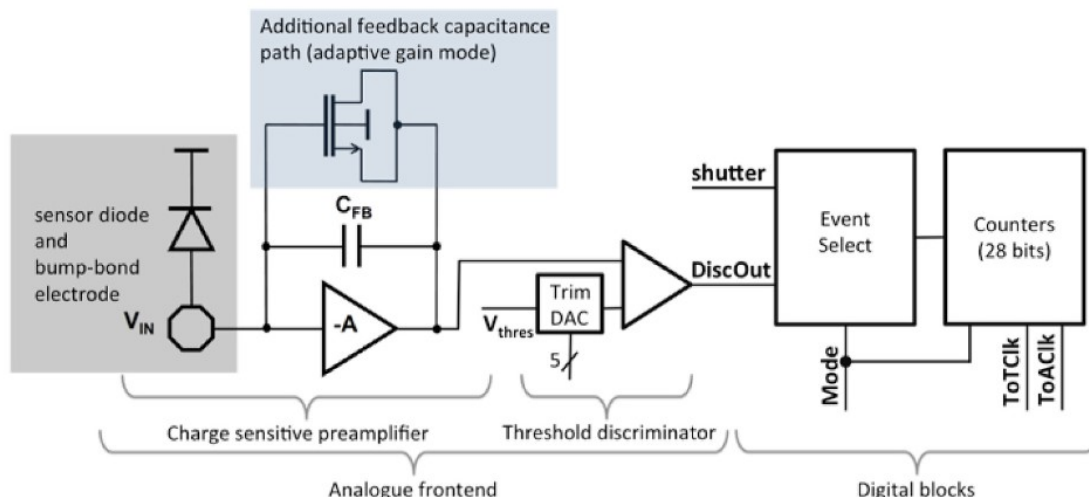
vysokému napětí. Pokud je výstupní signál větší než daná nastavená úroveň, je inkrementován digitální čítač [1]. Každý diskriminátor obsahuje 5-bitový DAC převodník. Tento 5-bitový DAC převodník umožňuje nastavit úroveň detekovatelného signálu pro každý pixel individuálně a tím lokálně eliminovat šum způsobený zbytkovým proudem polovodičové struktury.

Pokud není povolena funkce adaptivního zesílení signálu, ve zpětné vazbě CSA z obrázku 2.6 je fixní hodnota kondenzátoru C_{FB} . Tedy dochází k rovnoměrnému zesílení vstupního signálu, bez ohledu na velikosti generovaného náboje.

Pokud je povolen režim adaptivního zesílení, zpětná vazba CSA je tvořena kondenzátorem C_{FB} paralelně s kapacitou MOS tranzistoru z obrázku 2.6. Zesílení vstupního signálu je poté větší pro vstupní signály s malou amplitudou a nižší pro signály s vysokou amplitudou, více o této metodě lze dohledat například v [12].

Digitální část

Zobrazení digitální části jednotlivých pixelů, je možné vidět na obrázku 2.6. Každý pixel obsahuje digitální 28 bitové čítače. Konkrétně se jedná o čtyři digitální čítače typu LSFR. V případě Timepix 2 každý pixel obsahuje dva 10-bitové (označení: A,B) a dva



Obrázek 2.6: Uspořádání jednoho pixelu [10]

4-bitové (označení: C,D) čítače. Například 14-bitový čítač lze jednoduše vytvořit kombinací 10-bitového a 4-bitového čítače. Díky použití lineárně posuvného čítače LSFR, každý n -bitový čítač generuje 2^n pseudonáhodných čísel. Odpovídající dekódovaná hodnota pseudonáhodného čísla lze pro příklad čtrnácti bitového čítače získat za použití rovnice 2.1. To jaká hodnota bude uložena do konkrétního čítače určují jednotlivé digitální režimy detektoru, které budou popsány následovně.

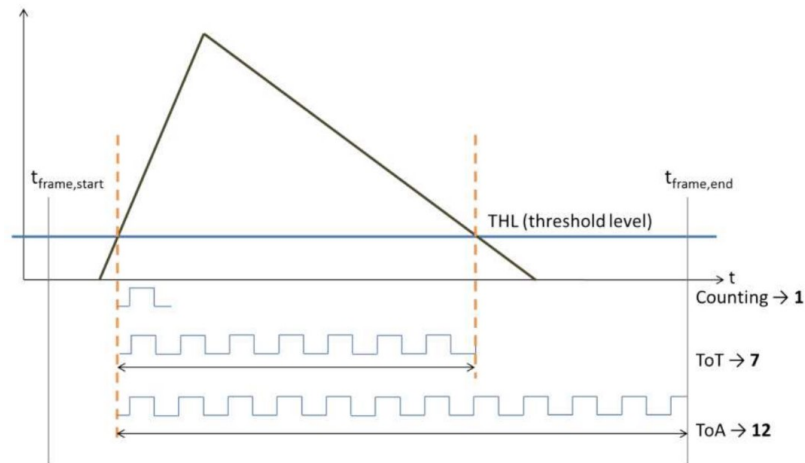
$$14bit = (hodnota_{4bit} \times 2^{10}) + hodnota_{10bit} \quad (2.1)$$

Jak bylo zmíněno výše. Digitální čítače můžou být nakonfigurované do různých měřících módů. 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.
- **Counting mode:** Čítač je inkrementován pokud došlo k překročení nastavené prahové úrovně detekce.

Celkem lze použít 8 digitálních módů. Každý jednotlivý mód určuje, jaká informace bude v jakém čítači uložena. Například při použití digitálního módu s označením ToT10/ToA18 je do 10 bitového čítače ukládána informace ToT a do 18 bitového čítače je ukládána informace ToA. Více o jednotlivých digitálních módech Timepix 2 lze dohledat v technické dokumentaci [2].

Digitální čítače mimo výše popsaných digitálních módů můžou pracovat buď v simultánním, nebo kontinuálním režimu. Simultánní režim znamená, že naměřená data musí být vždy vyčtena z 28 bitového digitálního čítače, přičemž při vyčítání není možné



Obrázek 2.7: Digitální módy Timepix 2 [13]

měřit příchozí ionizující záření. Doba kdy detektor nemůže měřit vlivem samotného vyčítání dat se nazývá mrtvá doba detektoru. Pro Timepix 2 při použití sériového komunikačního rozhraní s frekvencí hodinového signálu 100 MHz je tato doba přibližně 18.3 ms. Druhým režimem je režim kontinuální. Výhodou kontinuálního režimu je, že zde je kratší mrtvá doba, v závislosti na použitém čítači 6.5 ms až 9.2 ms. Zjednodušený princip činnosti je, že dva digitální čítače jsou nastaveny na stejnou velikost, přičemž do jednoho z čítačů se ukládá informace o měření, dle nastaveného měřicího módu. Tento čítač je zřetězen s druhým čítačem o identickou velikostí, ze kterého se pouze vyčítá. Doba vyčtení tohoto čítače poté definuje výše uvedenou mrtvou dobu.

Příkladem použití digitálního módu může být způsob měření energie, kterou interagující částice zanechala v senzoru. Tuto energii můžeme zjistit pokud vybereme digitální mód, při kterém se do některého z čítačů ukládá informace o ToT měření. Následně počet naměřených hodinových pulsů odpovídá času, pro který hodnota analogového napětí měřeného signálu byla nad nastavenou detekovatelnou úroveň. Více o způsobu měření energie, kterou částice zanechala v detektoru lze dohledat například v [14].

2.3.2 Technická specifikace

Timepix 2 je rozdělen do 256 x 256 pixelů. Rozteč mezi jednotlivými pixely je 55 μm . Celkově rozměry Timepix 2 jsou 16.6 x 14.14 mm. Vyčítací část detektoru tvoří ASIC čip navržen ve 130 nm CMOS technologii. Samotná výroba ASIC je zajišťována jedním z předních výrobců čipů, firmou TSMC [17] na Taiwanu. Všechny technické informace, nebude-li uvedeno jinak jsou čerpány z manuálu k detektoru Timepix 2 [2].

Komunikační rozhraní

Timepix 2 umožňuje komunikaci za použití paralelního nebo sériového rozhraní. Při použití paralelního rozhraní je možno využít 32 paralelních datových vodičů. Paralelní rozhraní dosahuje násobně vyšších přenosových rychlostí v závislosti na počtu použitých paralelních vodičů. Tuto závislost je možné vidět na obrázku 2.9. Pro paralelní zpracování dat je zapotřebí na straně vyčítací elektroniky použít velmi rychlé rozhraní, například FPGA.

Sériová komunikace probíhá po diferenciálních datových párech. Konkrétně se jedná o komunikační specifikaci SLVS [15]. Napěťové úrovně této specifikace lze najít na obrázku 2.8. Jak lze z obrázku 2.8 vidět, specifikace SLVS je analogická ke komunikační specifikaci LVDS [16]. Maximální frekvence komunikačních hodin při použití sériového rozhraní je dle manuálu Timepix 2 [2] 100 Mhz. Z uvedených parametrů týkající se maximální rychlosti komunikace, lze na straně vyčítacího rozhraní navrhnout například použití mikroprocesoru. Hlavní nevýhodou sériové komunikace je maximální vyčítací rychlost, která je násobně nižší než za použití paralelního rozhraní 2.9. Naopak výhodou sériové komunikace jsou především jednoduchost implementace a také teoreticky nižší spotřeba vyčítacího zařízení detektoru, způsobena maximální rychlostí komunikace.



Obrázek 2.8: SLVS specifikace [15]

Napájení

Timepix 2 ke své činnosti potřebuje celkem 3 napájení viz. tabulka 2.1. Napájení VDD slouží pro napájení digitální části jádra Timepix2 a VDDA slouží k napájení analogové části jádra Timepix 2. Napájení VDDIO slouží k napájení vstupních/výstupních bran detektoru. Posledním uvedeným napájením v tabulce 2.1 je napájení VDD33. Toto napájení je potřeba přepínat, podle potřebné funkcionality detektoru. Pokud chceme z Timepix 2 vyčíst CHIP ID, musíme na pin VDD33 aplikovat napájecí napětí 2.5 V. Při ostatní činnosti detektoru, je požadováno aby napětí označené VDD33 bylo 1.2 V.

Speciální kategorií napájení je napájení pro zajištění vysokého napětí, které je připojeno na senzorovou vrstvu. Toto napětí zajistí vyprázdnění oblasti v polovodičové struktuře. Požadavky na parametry vysokého napětí záleží na typu a tloušťce senzorové vrstvy. Nejčastěji používaným materiálem senzorové vrstvy je křemík, ovšem záleží na příkladu použití detektoru. Uvedu-li příklad vysokého napětí, které bylo použito pro testování Timepix 2 s křemíkovou senzorovou vrstvou o tloušťce 500 μm dle [18] bylo

Napájecí úrovně Timepix 2		
Název pinu	Hodnota napájecího napětí [V]	Počet pinů
VDDIO	2.5	7
VDD	1.2	15
VDDA	1.2	18
VDD33	2.5 (1.2)	1

Tabulka 2.1: Napájecí úrovně Timepix 2

100 V. Další příklady velikosti vysokého napětí používaných pro různé senzorové vrstvy lze najít v odkazech [19], [20]. Důležitou vlastností vysokonapěťových zdrojů je možnost nastavení výstupního vysokého napětí v určitém pracovním rozsahu.

Spotřeba

Celková spotřeba Timepix 2 dle [10] při zapnutí všech pixelů a frekvenci datových hodin $f_{clock} = \text{Mhz}$ je nižší než 900 mW. Přičemž spotřeba jednoho pixelu je $5 \text{ } \mu\text{A}$.

Timepix 2 disponuje možnostmi, jak celkovou spotřebu detektoru snížit. Ke celkovému snížení spotřeby slouží funkcionalita, která umožňuje zamaskovat pixely, které nebudou dále použity pro ukládání informace z měření. Zamaskovat lze individuální pixely detektoru nebo takzvané super pixely, které jsou označeny jako sdružení 2×16 jednotlivých pixelů. Při zamaskování dojde k téměř kompletnímu vypnutí vybraných pixelů. Z výše uvedené spotřeby pro jeden pixel, se pro vybraný pixel, který má být zamaskovaný, dostáváme na spotřebu okolo jednotek nA na jeden pixel.

Rychlost komunikace

V části 2.3.2, byly popsány možnosti využití paralelního, či sériového rozhraní pro komunikaci s Timepix 2. Doba pro vyčtení celé matice pixelů pro oba typy rozhraní lze vidět na obrázku 2.9.

# bits/ pixel	Full frame, serial port		Full frame, parallel port		ZCS ^a , serial port	
	t_{read} [ms]	framerate [fps]	t_{read} [ms]	framerate [fps]	t_{read} [ms]	framerate [fps]
4	2.62	381	0.08	12207	0.16	6104
10	6.55	153	0.20	4883	0.41	2441
14	9.18	109	0.29	3488	0.57	1744
28	18.35	54	0.57	1744	1.15	872

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

[10]

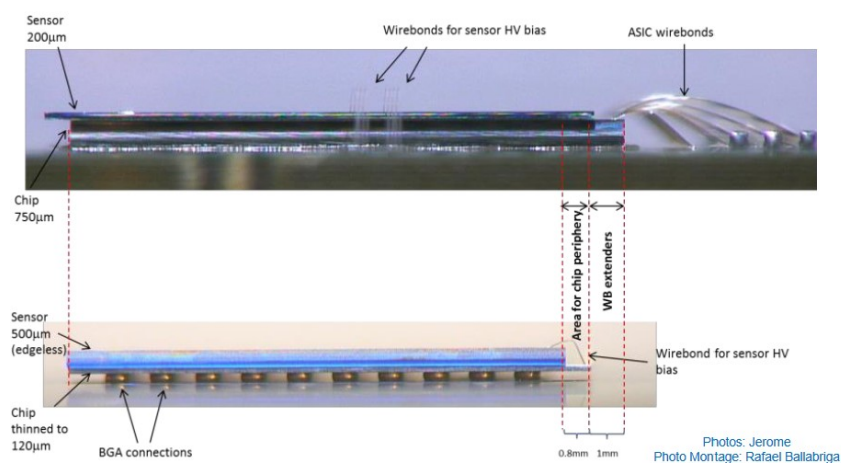
Poslední možností vyčítání dat z Timepix 2 je použití ZCS módu. Tento mód lze použít při vyčítání dat přes sériové rozhraní. Na obrázku 2.9, lze vidět, že tento mód je rychlejší než použití sériového rozhraní při vyčítání celých snímků. Při použití ZCS módu nejprve detektor odešle 256 bitů, které odpovídají jednotlivým sloupcům detektoru. V těchto 256 bitech je uložena informace o tom, zda-li došlo v příslušném sloupci k detekci ionizujícího záření, neboli jestli byl zasažen alespoň jeden pixel v tomto sloupci. Pokud ano, bude sloupec nastaven na logickou hodnotu 1. V opačném případě zůstává hodnota sloupce v logické nule. Po obdržení 256 bitů je přijato tolik dat, kolik sloupců bylo zasaženo. Avšak minimální počet odeslaných sloupců je 16 a to i v případě, pokud by nebyla detekována žádná částice v celé matici. Velikost poslaných dat za použití ZCS módu je tedy vždy závislá na aktivitě ionizujícího záření a s tím i spojená vyčítací rychlost. Pokud by byly aktivovány všechny pixely, bude rychlost ZCS módu nanejvýše stejně rychlá, jako při vyčtení celého snímku. Na obrázku 2.9 je pro ZCS mód uvažováno vyčtení 16 sloupců matice.

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 připojení wire bondů. Rozložení pinů je zobrazeno na obrázku 2.5 ve spodní části. Rozteč mezi jednotlivými piny je 108 μm .

Dalším možným způsobem připojení Timepix 2 k desce plošných spojů je technologie zvaná TSV. 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 2.10. Výhodou technologie BGA oproti technologii wire bondů je lepší praktické zacházení s detektorem, díky absenci tenkých wire bondů, které jsou velmi náchylné na mechanické poškození. Další výhodou je poté technologicky méně náročné připojení detektoru k desce plošných spojů. Nevýhodou této technologie je vystavení chipu vysoké teplotě při pájení detektoru na desku plošných spojů.



Obrázek 2.10: Připojení detektoru Timepix 2 k desce plošných spojů [21]

Kapitola 3

Návrh řešení

Návrh řešení byl navržen s ohled na primární požadavky, které rozhraní musí splňovat, aby byla zajištěna jeho základní funkčnost. Prvním primárním požadavkem, je zajištění základní funkčnosti detektoru Timepix 2, tyto požadavky byly popsány v části 2.3.2. Dalším požadavkem na navrhované vyčítací rozhraní je jeho celková miniaturizace, tento požadavek byl stanoven zadním diplomové práce.

Podrobnější rozbor celkového řešení této práce, je dále v části ??, kde bude popsán výběr konkrétních součástí a návrh zapojení rozhraní, respektující primární požadavky uvedené v této části textu 3.

3.1 Koncept řešení

Navržený koncept vyčítacího rozhraní je zobrazen pomocí schematického nákresu na obrázku 3.1. Koncept rozhraní se skládá ze dvou desek plošných spojů.

První deskou plošných spojů je deska s označením *Základní deska* 3.1. Na této desce je implementováno většina funkcionalit potřebných pro komunikaci s detektorem Timepix 2. Dále je zde implementována část zajišťující USB komunikaci, která slouží pro komunikaci s u uživatelským rozhraní přes USB.

Druhou deskou plošných spojů je deska s názvem *Deska s Timepix 2* 3.1. Na této desce se nachází detektor Timepix 2, dále je zde implementován vysokonapěťový zdroj (HV), měření vysokého napětí a teploty.

Toto rozložení rozhraní na dvě desky plošných spojů, bylo navrženo s ohledem na požadavky miniaturizace celého zařízení, a také s ohledem na variabilitu zařízení. Variabilitu myšlenou ve smyslu možnosti připojit k jedné základní desce různé desky s pixelovým detektorem, tento koncept lze také najít například v zařízení popsaném v části 2.2.3. Koncept byl dále navržen s ohledem na možnost vyčítací rozhraní připojit k uživatelskému rozhraní, konkrétně k osobnímu počítači.



Obrázek 3.1: Koncept řešení vyčítacího rozhraní pro detektor Timepix 2

3.1.1 Komunikace s Timepix 2

Pro komunikaci s Timepix 2 je možné využít sériové, nebo paralelní rozhraní, jak již bylo zmíněno v části 2.3.2. Pro tuto práci uvažujeme využití pouze sériové komunikace. Využití sériového rozhraní pro komunikaci s Timepix 2, umožní použít mikrokontrolér. Maximální vyčítací rychlost z detektoru Timepix 2 je 100 Mbits/s. S ohledem na tuto maximální rychlost vyčítání dat z Timepix 2 musí být vybrán vhodný mikrokontrolér pro obsluhu komunikace, nejen s Timepix 2 detektorem.

3.1.2 Uživatelské rozhraní

Uživatelské rozhraní pro tuto práci bylo zvoleno rozhraní USB s konektorem typu C. Použit byl standart USB 2.0 High Speed. Tento standart umožňuje komunikovat maximální rychlostí až 480 Mbit/s. S respektem na maximální rychlost vyčítání dat z detektoru Timepix 2, která je 100 Mbits/s, je tato rychlost dostačující.

3.1.3 Napájení

Pro napájení detektoru Timepix 2 jsou dle 2.1 zapotřebí tři napájecí napětí. Napájecí zdroje musí být vhodné pro maximální odběr detektoru Timepix 2. Kde uvedená celková spotřeba samotného detektoru, by neměla být dle 2.3 vyšší než 900 mW.

Dalším potřebným napájením potřebným pro navržený koncept je napájení mikrokontroléru. Toto napájení je závislé na konkrétním typu mikrokontroléru. Detailnější informace o výběru mikrokontroléru a jeho potřebných napájecích úrovní budou v popsány části ??.

3.1.4 Mechanika

Návrh rozhraní je rozložen do dvou desek plošných spojů spojenými konektorem. Při návrhu mechanické části rozhraní musí být zajištěna mechanická odolnost vůči poškození, především nejcitlivější části a to části, ve které se nachází *wire bondy* propojující Timepix 2 s deskou plošných spojů 2.10. Dále uživatel musí být schopen se pomocí konektoru připojit k vyčítacímu rozhraní. V neposlední řadě musí být zajištěn odvod tepla ze součástek vyčítacího rozhraní, které mají největší výkon. Těmito součástky z navrženého konceptu budou především samotný detektor Timepix 2, mikrokontrolér a napájecí zdroj.

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] M. Manghisoni, D. Comotti, L. Gaioni, L. Ratti, and V. Re, “Dynamic compression of the signal in a charge sensitive amplifier: From concept to design,” *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 62, no. 5, pp. 2318–2326, 2015.
- [13] P. Mánek, “Machine learning approach to ionizing particle recognition using hybrid active pixel detector,” Master’s thesis, ČVUT, 2018.
- [14] 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).
- [15] F. Tavernier and P. Moreira, “SLVS interface circuits.” Dostupné z: https://indico.cern.ch/event/404345/contributions/1850202/attachments/809975/1109940/SLVS_I0.
- [16] “Ieee standard for low-voltage differential signals (lvds) for scalable coherent interface (sci),” *IEEE Std 1596.3-1996*, pp. 1–34, 1996.
- [17] TSMC, “Web presentation of the TSMC.” Dostupné z: <https://www.tsmc.com/english>.
- [18] 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.
- [19] S. Pospisil, “Timepix hybrid pixels detectors for particle identification and dosimetry.” Dostupné z: <https://indico.cern.ch/event/954194/contributions/4009245/attachments/2156334/3637201/Stanislaw%20Pospisil%20-%20SP-Dakar-Timepix-lecture-fin.pdf>.
- [20] L. S. Pinsky, “An Update on the Timepix2.” Dostupné z: <https://wrmiss.org/workshops/twentyfourth/Pinsky.pdf>.

- [21] 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.
- [22] Monolithic Power Systems, “Synchronous Buck Converter.” Dostupné z: https://www.monolithicpower.com/en/documentview/productdocument/index/version/2/document_type/Datasheet/lang/en/sku/MP2333H/document_id/4409/.
- [23] STMicroelectronics, “Datasheet STM32U5Axxx.” Dostupné z: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32u5a9nj.pdf>.
- [24] STMicroelectronics, “RM0456 reference manual STM32U5A.” Dostupné z: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32u5a9nj.pdf>.
- [25] A. Devices, “Introduction to SPI Interface.” Dostupné z: <https://www.analog.com/en/resources/analog-dialogue/articles/introduction-to-spi-interface.html>.
- [26] Lattice Semiconductor, “MachXO2.” Dostupné z: <https://www.latticesemi.com/Products/FPGAandCPLD/MachXO2>.
- [27] A. Devices, “Digitally Controlled, 0.5% Accurate, Safest APD Bias Supply.” Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/MAX1932.pdf>.
- [28] A. Devices, “Efficient Rail-to-Rail I/O Op Amps.” Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/625234fc.pdf>.
- [29] P. Mánek, P. Burian, E. David-Bosne, P. Smolyanskiy, and B. Bergmann, “Track lab: extensible data acquisition software for fast pixel detectors, online analysis and automation,” *Journal of Instrumentation*, vol. 19, p. C01008, jan 2024.

Seznam použitých symbolů

α alfa

Seznam použitých zkratek

ASIC	Application Specify Integrated Circuit
TSMC	Taiwan Semiconductor Manufacturing Company Limited
TSV	Through-Silicon-Vias
CSA	Charge Sensitive Amplifier
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
HV	High Voltage
USB	Universal Serial Bus
DSP	Digital signal processing
FPU	Floating Point Unit
EEC	Error Correction Code
ESD	Electro Static Discharge
DSI	Display Serial Interface
PG	Power Good
EN	Enable
SYSCLK	System Clock
HSI	High Speed Internal Clock
HSE	High Speed Internal Clock
PLL	Phase Locked Loop
JTAG	Joint Test Action Group
CPLD	Complex Programmable Logic Devices
SPI	Serial Peripheral Interface
UART	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter
ZCS	Zero Column Suppression
SYSCLK	System Clock
VN	Vysoké Napětí
RNDIS	Remote Network Driver Interface Specification

Příloha A

Zadání Diplomové práce



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Pavlas** Jméno: **Ondřej** Osobní číslo: **492331**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra mikroelektroniky**
Studijní program: **Elektronika a komunikace**
Specializace: **Elektronika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Miniaturizované vyčítací rozhraní pro pixelový detektor radiace Timepix 2

Název diplomové práce anglicky:

Miniaturized Reading Interface for the Timepix 2 Pixel Radiation Detector

Pokyny pro vypracování:

1. Seznamte se s pixelovým detektorem radiace Timepix 2 a dalšími detektory produkovanými pod záštitou CERN Medipix Collaboration.
2. Analyzujte specifické požadavky Timepix 2 detektoru, zejména jeho potřeby napájení, komunikační rozhraní, zdroje vysokého napětí a způsobu provádění měření s detektorem.
3. Navrhněte koncept vyčítacího rozhraní vhodného pro použití s osobním počítačem.
4. Proveďte výběr vhodných komponentů s ohledem na nízkou spotřebu, malé rozměry a výslednou komplexitu vyčítacího rozhraní, posléze návrh realizujte formou funkčního prototypu.
5. Naprogramujte základní funkce nezbytné pro ovládání detektoru Timepix 2 a ostatních komponent, proveďte ověření funkčnosti Timepix 2 pomocí digitálního testu.
6. Změřte a zhodnoťte parametry nově navrženého rozhraní pro Timepix 2 detektor.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Webová prezentace CERN Medipix Collaboration: www.cern.ch/medipix
- [2] Technická dokumentace detektoru Timepix2
- [3] Pinker, J.: "Mikroprocesory a mikropočítače", Praha: BEN - technická literatura, 2004, ISBN, 80-7300-110-1

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Vít Záhla, CSc. katedra mikroelektroniky FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Ing. Michael Holík, Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: **08.02.2024**

Termín odevzdání diplomové práce: _____

Platnost zadání diplomové práce: **21.09.2025**

Ing. Vít Záhla, CSc.
podpis vedoucí(ho) práce

prof. Ing. Pavel Hazdra, CSc.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Příloha B

Základní deska