



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV FYZIKÁLNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PHYSICAL ENGINEERING

**VLIV VLASTNOSTÍ OBRAZOVÝCH SENZORŮ NA
KVALITU REKONSTRUKCE KVANTITATIVNÍHO
FÁZOVÉHO ZOBRAZENÍ**

INFLUENCE OF IMAGING SENSORS PROPERTIES ON THE QUALITY OF THE QUANTITATIVE PHASE
IMAGE RECONSTRUCTION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Václav Šulc

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Zbyněk Dostál

BRNO 2016

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav fyzikálního inženýrství
Student: **Václav Šulc**
Studijní program: Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor: Fyzikální inženýrství a nanotechnologie
Vedoucí práce: **Ing. Zbyněk Dostál**
Akademický rok: 2015/16

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Vliv vlastností obrazových senzorů na kvalitu rekonstrukce kvantitativního fázového zobrazení

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Kvantitativní fázový obraz je základní výstupní typ dat z koherencí řízeného holografického mikroskopu. Jeho kvalitní záznam zaručuje přesnost měření a rozlišení hodnot fáze. Tato problematika bude řešena v této práci.

Cíle bakalářské práce:

Sepsat rešerši o senzorech se zaměřením na princip jejich funkce a vlastnosti. Na základě vybraných vlastností provést testování dostupných senzorů a vyhodnotit jejich vhodnost pro snímání kvantitativního fázového obrazu. U vhodného senzoru optimalizovat princip chlazení a navržené úpravy otestovat.

Seznam literatury:

JANESICK J. R.: Scientific Charge-coupled Devices, SPIE Press, 1. 1. 2001, ISBN: 0819436984, 9780819436986

OHTA J.: Smart CMOS Image Sensors and Applications, CRC Press, 19. 9. 2007, ISBN: 1420019155, 9781420019155

KOLMAN, P.; CHMELÍK, R.: Coherence-controlled holographic microscope, OPTICS EXPRESS, Vol.18, (2010), No.21, pp.21990-22003.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

prof. RNDr. Tomáš Šíkola, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce je zaměřena na šumové vlastnosti obrazových sensorů a jejich vlivu na kvantitativní fázové zobrazení. Byly nasnímány a analyzovány černé snímky dostupných kamer. Vypočítané hodnoty směrodatné odchylky šumu snímků byly použity při vytvoření umělých hologramů, z kterých byla rekonstruována kvantitativní fázová zobrazení. Z výsledků měření byla vybrána kamera Basler acA2040-180km jako nejvhodnější pro použití v holografii. Pro tuto kameru byl navržen, vyroben a otestován efektivní systém chlazení, který šumové charakteristiky vylepšil.

KLÍČOVÁ SLOVA

Obrazový sensor, CCD, CMOS, černý snímek, šum, kvantitativní fázové zobrazení, holografická mikroskopie, chlazený obrazový sensor.

ABSTRACT

This bachelor thesis is focused on imaging sensors noise characteristics and their impact on quantitative phase imaging. From available sensors the darkframes were acquired and analyzed. Computed data of noise standard deviation were used to simulate synthetic holograms for reconstruction of quantitative phase images. A camera Basler acA2040-180km was found to be a most suitable device for holography. The design, fabrication and testing of an effective cooling system for such a device proved to have even better noise characteristics.

KEYWORDS

Imaging sensor, CCD, CMOS, darkframe, noise, quantitative phase image, holographic microscopy, cooled image sensor.

ŠULC, V. *Vliv vlastností obrazových sensorů na kvalitu rekonstrukce kvantitativního fázového zobrazení*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 77 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Zbyněk Dostál

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Vliv vlastností obrazových senzorů na kvalitu rekonstrukce kvantitativního fázového zobrazení“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Zbyňkovi Dostálovi za konzultace a nezměrnou trpělivost při vedení k vypracování této práce.

Brno

.....

(podpis autora)

OBSAH

1 Úvod	13
1.1 Kvantitativní fázová mikroskopie	13
1.1.1 Interferenční mikroskopy	14
1.1.2 Holografické mikroskopy	14
1.2 Holografická mikroskopie na VUT v Brně	15
2 Optické senzory	17
2.1 Historický úvod	17
2.2 CCD čip	19
2.2.1 Princip CCD senzoru	20
2.3 CMOS čip	24
2.3.1 Princip CMOS senzoru	25
2.4 Kvantová účinnost	27
2.5 Šum	29
3 Termoelektrický jev	31
3.1 Seebeckův jev	31
3.2 Peltierův jev	32
4 Směrodatná odchylka fáze	35
4.1 Přehled kamer	35
4.2 Černý snímek	35
4.2.1 Vyhodnocení černého snímku	36
4.3 Hologram	37
4.3.1 Generování syntetického hologramu	38
4.4 Zpracování hologramu	39
4.5 Výsledky	41
5 Konstrukce chlazení kamery Basler acA2040-180km	49
5.1 Návrh konstrukce vodního chlazení	50
5.1.1 Peltierův článek - Termoelektrický chladič	51
5.1.2 Vodní chlazení	51
5.1.3 Tepelný most	54
5.1.4 Tělo kamery	54
5.2 Sestavení vodního chlazení	56
5.3 Sestavení chlazení kamery Basler acA2040-180km	58
5.4 Návrh přímého chlazení čipu	59

6	Testování chlazení kamery	61
7	Závěr	65
	Literatura	67
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	71
	Seznam příloh	77

1 ÚVOD

Pozorovat vzorek lze mnoha způsoby světelné mikroskopie. Pomocí klasického světelného mikroskopu je možné jednoduše pozorovat amplitudové (viditelné) vzorky, protože běžné detektory (jako je lidské oko, digitální čip nebo fotografický film) jsou citlivé na intenzitu dopadajícího světla, tedy kvadrát modulu amplitudy dopadající vlny.

Při pozorování buněčných struktur jsou velmi často pozorovány vzorky fázového charakteru, to znamená, že při prostupu světelné vlny vzorek mění výrazně fázi a amplitudu vlny nepatrně. Takovéto vzorky se při pozorování ve světlém poli zobrazují nekontrastně (transmisivita těchto vzorků bývá velmi podobná okolnímu prostředí). Za účelem zvýraznění fázových vzorků při zobrazování světelnou mikroskopií, tedy převedením změny fáze na změnu amplitudy a tím zviditelnění vzorku při detekování intenzity, byly předvedeny metody pro zvýraznění změny fáze. Použití takovýchto metod v mikroskopii se říká fázové a kvantitativní fázové zobrazování [1] (zkráceně QPI, z ang. *quantitative phase imaging*). Mezi tyto fázové metody se řadí Zernikeův fázový kontrast [2] (roku 1953 získal Frederik Zernike Nobelovu cenu za fyziku za vypracování této metody a konstrukci fázově kontrastního mikroskopu), Nomarského diferenciální interferenční kontrast [3] nebo Hoffmanův modulační kontrast [4].

Avšak použitím klasického mikroskopu není možné kvantitativně zobrazit změnu fáze světla, kterou způsobuje pozorovaný vzorek. Tu umožňuje zobrazit interferenční mikroskopie, která se začala rozvíjet od roku 1893, kdy Sirks popsal první interferenční mikroskop s oddělenou předmětovou a referenční větví [5].

1.1 Kvantitativní fázová mikroskopie

V první polovině 20. století se objevily první komerčně vyráběné interferenční mikroskopy, které byly finančně nákladné, ale také konstrukčně náročné (Krug a Lau [6], Horn [7]). K výraznému rozšíření použití interferenčních mikroskopů došlo ke konci 20. století s obrovským rozvojem výpočetní techniky a digitálních obrazových detektorů, které jsou důležité při zpracování snímků.

Zejména transmisní mikroskopie je od konce 20. století používána pro pozorování žijících buněk a jejich změn v reálném čase a to pomocí kvantitativního fázového kontrastu, který je možný bez obarvení buňky většinou toxickými látkami, které ovlivňují živé buňky. Velmi významným pro tato použití byl rok 1952, kdy Davies a Wilkins [8] objevili, že kvantitativní fázový kontrast pozorované buňky je přímo závislý na množství její suché buněčné hmoty. To vedlo k možnosti opticky vážít pozorované vzorky a sledovat změny přesunu hmoty vzorku v reálném čase.

Dělení kvantitativní fázové mikroskopie

V současné době můžeme světelné mikroskopy, využívající interference světla s oddělenou referenční a předmětovou větví mikroskopu, dělit do dvou hlavních kategorií a to podle geometrie skládání světelných svazků. Přesněji podle úhlu, který svírají mezi sebou paprsek v referenční a předmětové větvi. Je-li úhel nulový nebo velmi blízký nule, to znamená že se paprsky scházejí v ose (*in-line*), hovoříme o **interferenčních mikroskopech**. Pokud je úhel mezi interferujícími paprsky nenulový, nastává mimoosová interference (*off-axis*) a hovoříme o **holografických mikroskopech**.

1.1.1 Interferenční mikroskopy

Kombinováním svazků pod nulovým nebo téměř nulovým úhlem (*in-line*) umožňuje použití nekoherentního zdroje světla (např. plošný zdroj polychromatického světla), který způsobuje obrazové nedostatky jako koherenční zrnitost a šum. Takto získaný interferogram¹ má velmi nízkou prostorovou frekvenci interferenčních proužků (řádově jednotky proužků v zorném poli) a neobsahuje úplné informace o předmětové vlně (amplituda a fáze). Proto je nutné zaznamenat alespoň tři a více snímků v jedné sérii (obvykle tři až sedm) s různým fázovým posunem, které po zpracování obsahují informaci o fázovém obrazu předmětu. Tyto mikroskopy využívají fázový kompenzátor, který snímkům navazuje fázi a tím je spojuje. Použití tohoto typu mikroskopu není vhodné pro zaznamenávání rychlých dějů, protože čas potřebný k zaznamenání a kombinaci tolika snímků je příliš velký na to, aby se výsledný obraz dal pozorovat v reálném čase. Navíc podmínky při záznamu snímků jedné série se mohou lišit například vibracemi, které mohou negativně ovlivnit výslednou kvalitu snímku. Takovéto mikroskopy jsou označovány jako interferometry s řízenou změnou fáze [10] zkratkou PSI (z ang. *phase-shifting interferometry*).

1.1.2 Holografické mikroskopy

Kombinování svazků pod nenulovým úhlem, též zvaným jako mimoosová interferometrie nebo holografická mikroskopie, má velký význam na vlastnosti vzniklého

¹Interferenční obrazec poskládaný dvěma (i více) interferujícími vlnami [9]. Dále je rozvedeno v oddílu 4.3.

interferenčního obrazce. Takto vzniklý interferogram je totiž hologramem, to znamená že je možné z jednoho snímku kompletně rekonstruovat předmětovou vlnu (např. [11, 12]). Jedná se tedy o mikroskopy tvořící interferenční obrazce s nosnou prostorovou frekvencí. Nespornou výhodou mimoosové mikroskopie je možnost zobrazovat vzorky (živé buňky) v reálném čase. Omezením rychlosti zobrazování je v tomto případě pouze rychlost zpracovávání dat.

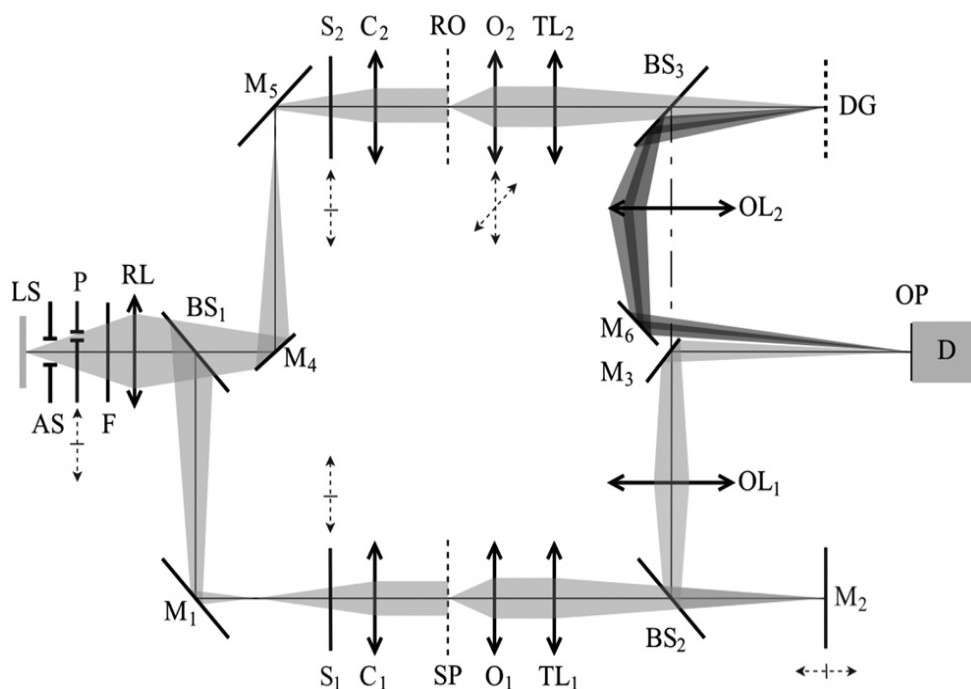
Dvousvazkové systémy s mimoosovým uspořádáním, označované jako *digitální holografické mikroskopy (DHM)*, vytvářejí interferogram (zde hologram) s vysokou prostorovou frekvencí interferenčních proužků (řádově stovky proužků v zorném poli). Díky jednoduché konstrukci je nutnost použití koherentního zdroje světla pro vytvoření interferenční struktury (např. laseru). Použitím takového zdroje snižujeme kvalitu obrazu a to přítomností koherentního šumu, parazitních interferencí a difrakcí na hranách optických komponent [13]. Mezi hlavní důvody využití interferenčních mikroskopů je možnost vytvářet optické řezy pozorovaným vzorkem, změřit kvantitativní fázový kontrast nebo numerické přeastřování během měření.

1.2 Holografická mikroskopie na VUT v Brně

Na Ústavu fyzikálního inženýrství FSI VUT v Brně jsou vyvíjeny interferenční mikroskopy založené na principu holografické mikroskopie, tedy mimoosová geometrie skládání svazků, nazývané koherencí řízené holografické mikroskopy (zkráceně CCHM z anglického názvu *Coherence-controlled holographic microscope*). Díky svému jedinečnému uspořádání [13] je možné na rozdíl od DHM použití prostorově i časově nekoherentních zdrojů světla, což spojuje výhody interferometrických i holografických mikroskopů (PSI a DHM) a zároveň potlačuje jejich nevýhody. Možnost řízení stupně koherence použitého záření (změnou velikosti aperturní clony), achromaticnost interferometru (zajištěné dělením svazku difrakční mřížkou Leithova návrhu [14]), vytváření optických řezů (pomocí *ex post* numerického přeastřování [15]) a zobrazení v rozptylovém prostředí, z nich dělá unikátní holografické systémy.

Motivace

Všechny tyto metody mají jednu věc společnou a tou je detektor. Bez digitálního detektoru by nebylo možné v moderní interferometrii kvalitně zaznamenávat a následně zpracovávat obraz (zde interferogram), který získáváme při pozorování vzorku. V dnešní době existuje mnoho metod, jak zaznamenat obraz v digitální podobě, ale ne všechny jsou vhodné. Při záznamu obrazu digitálním detektorem není



Obr. 1.1: Schéma optické soustavy koherenci řízeného holografického mikroskopu (CCHM).LS - zdroj světla; AS - aperturní clona; F - filtr; RL - kolektor;BS - deliče svazku; M - zrcadla; C - kondenzory; SP - vzorek; RO - referenční objekt; O - objektivy; DG - difrakční mřížka; OL - výstupní objektivy; OP - výstupní rovina; D - detektor. Převzato z [16].

výstupní snímek zaznamenaný přesně tak, jak byl promítnut na detektor, ale je pozměněn. To je způsobeno šumem, který určitým způsobem ovlivňuje zaznamenaný obraz, který má negativní účinek na kvalitu zobrazení zpracovávaného obrazu.

Cíle bakalářské práce

Sepsat rešerši o optických senzorech se zaměřením na princip jejich funkce a vlastnosti. Na základě vybraných vlastností provést testování dostupných senzorů a vyhodnotit jejich vhodnost pro snímání kvantitativního fázového obrazu. U vhodného senzoru optimalizovat princip chlazení a navržené úpravy otestovat.

2 OPTICKÉ SENZORY

2.1 Historický úvod

Možnost uchovat okamžik, „zastavit čas“, a znovu jej zobrazit, je důležitým milníkem v historii vědy a techniky. Prvním, kdo zaznamenal obraz na přenosné médium, byl Francouz Joseph Nicéphore Niépce okolo roku 1826 [17], kdy technikou zvanou heliografie (z řeckého *Helios* - bůh slunce, zosobněním slunce [18]) vytvořil první známý snímek nazvaný *View from the Window at Le Gras* (překlad: *Pohled z okna v Le Gras*). Ta je založena na principu vytvrzení tenké asfaltové vrstvy expozicí slunečními paprsky. Po dokončení snímání je přebytečný asfalt omyt a zbude pouze vytvrzená vrstva tvořící obraz. Obrovskou nevýhodou je délka expozice, která je potřebná okolo 8 hodin.

Od té doby se podoba záznamového média velmi změnila. Od vrstvy světlocitlivého jodidu stříbra naneseném na měděné destičce (r. 1839, tzv. daguerrotypie [17]), první negativ na dopisním papíře máčeném v roztoku kuchyňské soli (William Fox Talbot r. 1835) a první film vyrobený z celulózy (John Wesley Hyatt r. 1867). Od té doby se technologie záznamu přímého obrazu rapidně zdokonalovala, byly vyvíjeny nové metody záznamových médií, díky kterým byl obraz zaznamenán rychleji, kvalitněji a přesněji [19, 20].

Na začátku druhé poloviny 20. století s rostoucími ambicemi cestovat do vesmíru nebo vysílat výzkumné mise a sondy mimo povrch planety Země, udával potřebu nějakým způsobem snímky zaznamenat a poté odeslat k vyhodnocení zpět na Zemi. Nejvhodnější formou přenosu informací byla digitalizace. V té době již existovala zařízení, která dokázala zaznamenat obraz na fotocitlivou vrstvu a zdigitalizovat jej pomocí vyčítání elektronovým svazkem (rastrování) a měření velikosti amplitudy protékajícího proudu (např. vidikonová trubice [21, 22]). Bohužel využití těchto metod založených na principu žhaveného vlákna ve vakuu nebylo možné, neboť trvanlivost takových zařízení nebyla dostačující pro dlouhodobé použití ve vesmíru z důvodu degradace fotokatody [23].

Právě trvanlivost zařízení, která by byla vynesena na oběžnou dráhu Země bez možnosti okamžitého servisu, byla klíčová. Vesmírná mise s právě takovými nároky byla v 70. letech představena jako program dalekohledu LST (z ang. *Large Space Telescope* - Velký vesmírný teleskop), později pojmenovaném Hubbleův vesmírný teleskop (na počest amerického astronoma Edwina Hubblea, (1889-1953)). Ten byl vynesena na oběžnou dráhu až roku 1990 a je s mnoha úpravami a záměnami přístrojů v provozu dodnes [23].

Celý projekt stál na výběru metody, pomocí které by bylo možné snímat vesmírné

objekty s dobrou kvalitou. a snímky efektivně odesílat v podobě dat na Zemi. Roku 1976 vyhlásilo NASA (zkráceně pro *National Aeronautics and Space Administration*) výběrové řízení pro kamerový systém LST. Nejlepším řešením bylo *Wide Field Planetary Camera I* (WF/PC I), které navrhly spolupracující firmy Caltech a JPL (Jet Propulsion Laboratory). Návrhem bylo spojení osmi 800 x 800 px 15 μm TI CCD čipů uspořádaných do dvou sestav složených z 2 x 2 CCD čipů. Z toho jedna byla pokryta vrstvou fosforu pro zachycení elektromagnetické části spektra až k hranici UV o vlnové délce 1216 \AA pro rozšíření záznamu záření ničím neošetřeného CCD čipu.

Fotoelektrický jev

Digitální senzory jsou založeny na fotoelektrickém jevu, který poprvé vysvětlil Albert Einstein roku 1905 a v roce 1921 získal Nobelovu cenu.

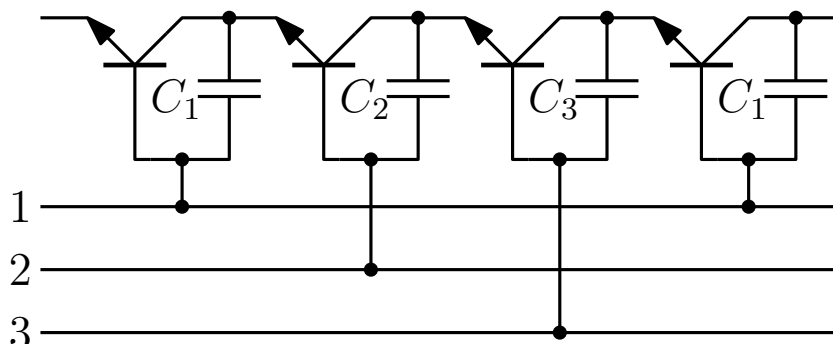
Při dopadu fotonu o energii $h\nu$, kde h je Planckova konstanta a ν frekvence dopadajícího světla, je část této energie spotřebována k uvolnění elektronu vykonáním výstupní práce $\Phi_0 = h\nu_0$ a zbytek přeměněna v kinetickou energii E_k takto vzniklého fotoelektronu. Tento zákon zachování energie Einstein popsal rovnicí $h\nu = \Phi_0 + E_k$.

Experimenty prokázaly, že kinetická energie vyzařovaných elektronů není závislá na intenzitě dopadajícího světla, ale na její frekvenci. Pro každý kov existuje určitá mezní frekvence ν_0 , kdy pouze pro $\nu > \nu_0$ nastává fotoelektrický jev. Intenzita dopadajícího záření ovlivňuje pouze počet uvolněných elektronů v materiálu.

2.2 CCD čip

Vynalezením CCD čipu předcházela nápad viceprezidenta Bellových Laboratoří Jacka Mortona, silného příznivce technologie magnetických bublinových pamětí¹. Jeho myšlenkou bylo, zda by bylo možné zhotovit zařízení podobné MBM na bázi polovodiče. O několik týdnů později roku 1969 Willard S. Boyle a George E. Smith navrhli, nechali vyrobit a otestovali tři fázové zařízení - řada devíti 100 μm kovových elektrod oddělených od sebe 3 μm položených na polovodičovém substrátu s nevodivou vrstvou SiO_2 . Postupným posouváním napětí z jedné elektrody na druhou se posouval i přitahovaný, nebo-li vázaný, náboj v substrátu podle pozice elektrody, na které bylo přiloženo napětí. Posouvání náboje tímto způsobem je zobrazeno na obrázku 2.4. Z tohoto principu pohybu vázaných nábojů v polovodiči získalo toto zařízení název *Charge-Coupled Device* (zkráceně CCD), v překladu *Zařízení s vázanými náboji*.

Boyle a Smith tímto experimentem demonstrovali přenos náboje mezi jednotlivými vodiči vzorku a možnost manipulace s nábojem v polovodiči v závislosti na časování polohy napětí na elektrodách. Tento výsledek prezentovali na IEEE konferenci v New Yorku roku 1970 [24].



Obr. 2.1: Schéma obvodu Bucket-Brigade Circuit. Převzato z [25].

Co však nevěděli bylo, že v té stejné době ve Výzkumných laboratořích Phillips pánové K. Teer a F. L. J. Sangster pracovali na podobném transportním zobrazovacím zařízení s názvem *Bucket-Brigade Circuit*, zkráceně BBC. Principem bylo pospojování jednotlivých MOS² tranzistorů paralelně s kondenzátorem dle obr. 2.1.

¹MBM z anglického *Magnetic Bubble Memory*

Tento typ paměťového média je schopen uchovat zapsaná data i po odpojení od napájení. V 70. letech se těšila tato metoda slibnému rozvoji, ale příchodem Flash RAM pamětí roku 1984 firmy Toshiba nemohla metoda MBM soutěžit a opustilo se od ní.

²Metal Oxide Semiconductor

Takto tvořené „bloky“ byly napojeny za sebe - výstup (drain) jednoho MOS tranzistoru na vstup (source) druhého [25]. Informace se uchovávala v podobě nabití kondenzátoru a postupným přiváděním napětí na elektrody postupně dle schématu 1-2, 2-3, 3-1. Tímto způsobem byla informace posouvána mezi jednotlivými bloky obvodu.

Přestože za zrodem CCD čipů byla myšlenka vytvořit paměťové zařízení, mnoho lidí si uvědomovalo potenciál, které toto zařízení přinášelo, než pouze paměťové médium. Tak jako tomu bylo u fotografického filmu v 19. století, kdy se astronomové zprvu stavěli bokem k nové metodě, jelikož film měl mnoho nedokonalostí a pozorování předmětu přímým okem se zdálo být nejlepším možným způsobem. I tyto nové metody se ale časem zdokonalovaly a ke konci 19. století se využití filmu stalo dominantním nástrojem pro moderní astronomii a astrofyziku.

Podobně tomu bylo i u CCD čipů, kde v té době tato nová technologie nemohla silně rozšířeným filmům konkurovat. Jak astronomii, kde velké fotografické desky odpovídaly rozlišením větším než 100 Mpx, tak i v medicíně, kde fotografický film dokázal zaznamenat rentgenový snímek celé hrudi v měřítku 1:1, což malé čipy nedokázaly.

Avšak díky výhodám jako malé rozměry, váha, nízké provozní náklady, optická přesnost, linearita obrazu a citlivost více než 100krát větší, než filmová média a spolehlivost, je vidět dnes, kdy digitální senzory jsou nejrozšířenějším záznamovým médiem.

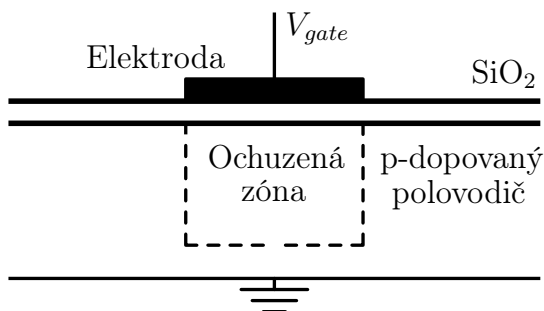
To vše mělo za výsledek i výše zmíněné použití CCD čipů ve vesmírném programu LST a mnoha dalších zařízení, která jsou založena na velmi citlivé detekci často i osamocených fotonů z obrovských vzdáleností. Použití CCD čipů v astronomii mělo za následek revoluci ve sledování hvězdné oblohy a vesmírných objektů [23].

2.2.1 Princip CCD senzoru

Architektura CCD čipu má tři základní funkce: a) navázání náboje, b) posun náboje, c) převod náboje na měřitelné napětí. Základním stevebním blokem CCD je struktura *metal-oxide-semiconductor* (MOS, v překladu *kov-oxid-polovodič*), také nazývaný gate (brána). Jelikož oxid křemičitý je přirozeným izolantem mezi křemíkovým polovodičem a kovem.

Zobrazovací senzory jsou sestaveny z mnoha malých obrazových elementů - pixelů (picture element). Tyto pixely jsou vytvořeny rozdělením křemíkového substrátu pokrytým nevodivou vrstvou SiO₂, na které jsou vytvořeny kovové elektrody. Pro každý pixel bývají obvykle tři elektrody, ale záleží na typu technologie daného čipu. Při dopadu fotonů na fotocitlivou plochu daného pixelu jsou za fotoelektric-

kého jevu kombinovány v p-dopovaném polovodičovém substrátu páry fotoelektronu a díry, které vytvářejí ochuzenou zónu³ od majoritních nosičů náboje (v p-polovodiči to jsou díry). V této zóně přivedením napětí V_{gate} na elektrodu se pod ní nashromáždí elektrostatickými silami v potenciálové jámě počet elektronů úměrný počtu rekombinovaných párů elektron-díra.



Obr. 2.2: Struktura MOS, převzato z [26].

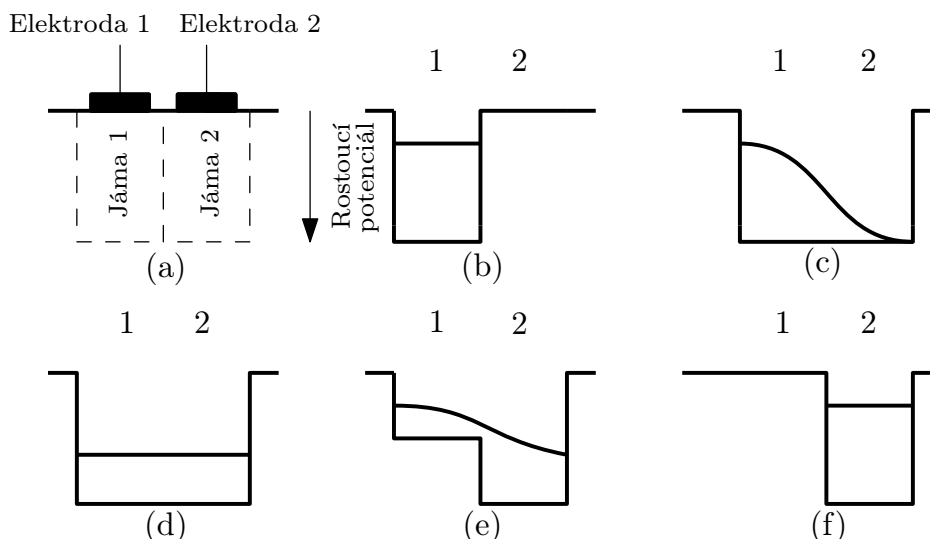
Pro vyčtení a změření zachyceného náboje v daném pixelu je zapotřebí posunovat tímto vázaným nábojem napříč substrátem senzoru i mezi pixely. To je provedeno systematickým přikládáním napětí k elektrodám V_1 , V_2 a V_3 (viz obrázek 2.4), které takto vytváří potenciálové jámy pod každou z připojených elektrod. Přelití náboje mezi jámami pod elektrodami je nesmírně důležité, protože je-li časování napájení elektrod správně nastaveno, dokáže tak posunout náboj všech pixelů najednou.

Při posunu nábojů všech sloupců o jeden pixel směrem dolů dojde k vysunutí nejspodnějšího řádku nábojů pixelů mimo snímací plochu. Tento náboj je přesunut do horizontálního sériového registru, který poté postupně posune veškerý náboj tohoto řádku do vyčítače a zesilovače, kde je převeden v měřitelné napětí. Pro posunutí všech sloupců o jeden pixel směrem dolů je nejprve nutné vyčíst a tím uvolnit celý řádek sériového registru.

Pro vynulování celého senzoru je potřeba jej resetovat. To může být provedeno mnoha způsoby, ale hlavním principem je přivedení napětí na všechny elektrody, a tedy propojení všech jám a jejich uzemnění. Tím se celý senzor „vyčistí“ od náboje a vynuluje.

V předešlých řádcích byl popsán záznam a přenos obrazu pomocí CCD senzoru s technologií **Full Frame** (FF, v překladu *plný snímek*). Pro tento typ senzoru je nutné, aby kamera měla mechanickou uzávěrku, protože během vyčítání pixelů senzoru by jinak dopadaly další fotony a tím by rozmazaly původní obraz.

³Ve skutečnosti to je objem.



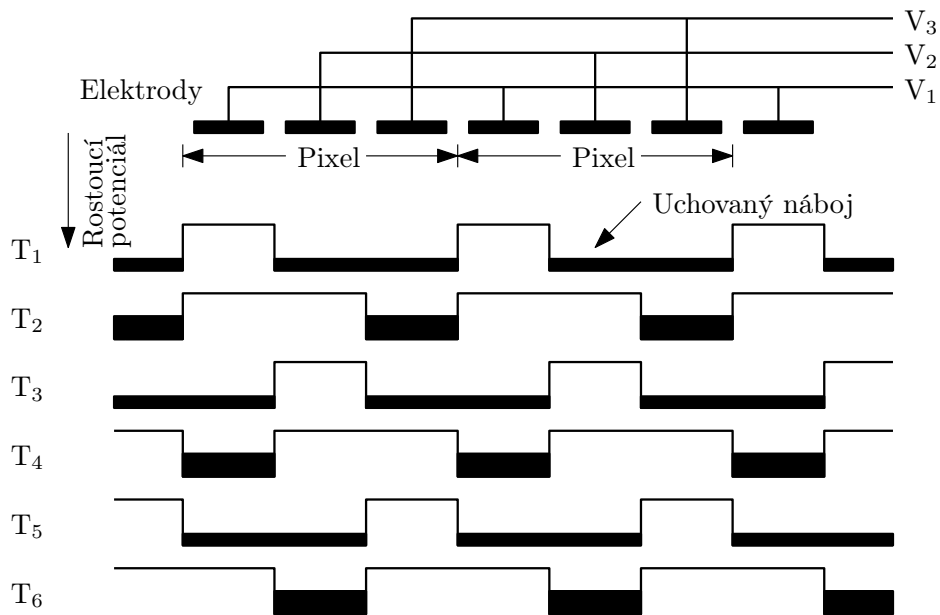
Obr. 2.3: Posun náboje mezi sousedícími potenciálovými jámami při změně napětí na elektrodách (gatech). (a) Sousedící jámy. (b) Náboj v jámě 1. (c) Po přivedení napětí na elektrodě 2 se náboj přelívá do jámy 2. (d) Náboj se rovnoměrně rozprostřel. (e) Snížení napětí na elektrodě 1 způsobuje přelívání náboje do jámy 2. (f) Veškerý náboj je přesunut do jámy 2. Převzato a upraveno z [26].

Tato technologie může mít až 100% faktor zaplnění aktivní fotocitlivou plochou pixelů a je tedy vhodná pro vědecké použití, kde je potřeba vysoké citlivosti. Tato technologie ale není nejvhodnější pro vysokou rychlost snímání.

Další technologií je **Frame Transfer** (FT, v překladu *posun snímku*), kde má CCD čip prakticky dvojnásobnou velikost. To je kvůli tomu, že polovina čipu je zastíněna uzemněným materiálem, skrze který neprosteupí světlo a tedy nemůže ovlivnit náboj v zastíněných pixelech. Kamera s takovým obrazovým čipem nemusí mít nutně mechanickou uzávěrku, neboť celý obraz je možné rychle skrýt do zastíněné části čipu, odkud se následně všechny pixely obrazu vyčtou.

Tato technologie je využívá totožného stavby čipu jako FF, ale má zakrytou polovinu senzoru, který slouží jako uskladnění. Tento čip má také až 100% faktor zaplnění aktivní plochy pixelů, ale pro záznam obrazu slouží pouze polovina senzoru.

Podobnou technologií je **Interline Transfer** (IT, v překladu *posun uvnitř sloupců*). Ta má vedle každého pixelu jeden zastíněný, který slouží k rychlému přesunu a uskladnění náboje. Poté je náboj posunut z těchto vertikálních registrů do horizontálního sériového registru a vyčten. U této technologie také nemusí mít kamera mechanickou uzávěrku, jelikož přesun obrazu do skladovacích pixelů je velmi



Obr. 2.4: Schéma posunu náboje v tří fázovém CCD zařízení. Je zapotřebí šesti kroků, aby byl náboj posunut o pozici jednoho pixelu. Tento obrázek reprezentuje jeden sloupec pixelů. Řádky pixelů jdou ve směru do stránky textu. Převzato z [26].

rychlý, přibližně $1 \mu s$, takže dochází k minimálnímu rozmazání obrazu.

Interline Transfer je nejrozšířenější technologií CCD sensorů. Z důvodů zastínění velké části pixelu pro uskladnění a přesun náboje, má každý pixel pouze okolo 20% faktor zaplnění aktivní snímací plochy. Ten je možné výrazně zvětšit až k 100%, a to díky mikročočkám, které jsou vytvořeny před každou z aktivních ploch pixelů. Použití mikročoček na zvýšení aktivní plochy velmi závisí na geometrii pixelů (mikročočky jsou kruhové a pixely čtvercové nebo obdélníkové), nepřesnostech při výrobě a také kolmost dopadu paprsků na rovinu mikročoček. Při dopadu paprsku na rovinu pod úhlem dochází i k posunu středu ohniska mikročoček a celková efektivita aktivní plochy klesá.[26]

2.3 CMOS čip

V devadesátých letech 20. století pokračujícím vývojem a zdokonalováním technologií a výrobních procesů pro výrobu polovodičových CMOS struktur (*complementary metal-oxide-semiconductor*, v překladu *doplňující se kov-oxid-polovodič*) pro využití v digitálních aplikacích (mikroprocesory, paměťové moduly, programovatelné čipy), které byly poptávkou i novými možnostmi posouvány kupředu, bylo přirozeným nástupcem ve vývoji zobrazovacích senzorů struktura *CMOS imaging sensor* (CIS, v překladu *obrazový CMOS senzor*).

Výhodou těchto senzorů je, že do struktury pixelů je zabudováno jeden či více aktivních tranzistorů. Takto upravené struktury se jmenují senzory s aktivními pixely (APS).

Pro rozdělení pojmů a ujasnění v této části textu budu používat pro CMOS obrazové senzory zkratku „CIS“ a pro polovodičové digitální obvody „CMOS“. Obecně se pro obrazové senzory používá zkratka „CMOS“, kterou se rozumí právě obrazový senzor.

Pro stavbu CIS struktur je použit stále se zdokonalující velkovýrobní průmysl CMOS obvodů. Právě s velkým objemem produkce, zmenšujícími se rozměry a dostupností se snižuje i cena výroby CMOS struktur, a to návazně ovlivňuje i nižší cenu CIS. Avšak architektura CIS je mnohem komplexnější, neboť zmenšující se technologie CMOS není úplně vhodná pro křemíkové CIS technologie. Při výrobě CIS je zapotřebí určitých kroků, které nejsou standardními nebo obvyklými při výrobě CMOS obvodů. To je způsobeno tím, že CIS obsahuje jak zmenšující se digitální struktury, tak i analogové komponenty, které mají rozdílné výrobní postupy. Například fotodetektor a jeho výstup je analogový, přívod napětí a vodiče spadají do „šedé zóny“ mezi analogovým a digitálním přenosem a obvody za A/D převodníkem jsou digitální.

Při rozvoji výroby polovodičových struktur jsou hlavním oborem právě digitální obvody, ty se rozměrově stále zmenšují a tím dovolují vytvořit větší počet obvodových elementů (např. tranzistorů, vodičů). Právě hlavní parametrem výrobních schopností polovodičových struktur je minimální velikost součásti obvodu, ta je nejdůležitější právě z pohledu procesu výroby litografií.

Se zmenšující se velikostí vytvářených digitálních struktur je nutné i snižovat maximální použité napětí V_{max} , neboť se zmenšuje i izolující vrstva oxidu mezi kovem a polovodičem. Maximální použité napětí je tak limitované silou dielektrického pole oxidu E_{max} a jeho tloušťkou t_{oxid} dle

$$V_{max} = E_{max}t_{oxid}. \quad (2.1)$$

Tedy s menší tloušťkou izolujícího oxidu se úměrně zmenšuje i maximální napětí. Zároveň poměr V_{max}/t_{oxid} nemůže převýšit E_{max} , což vysvětluje trend zmenšování rozměrů polovodičových součástek. To však pro přenos digitálního signálu není nijak omezující, neboť digitální signál je tvořen logickou nulou a jedničkou, tedy nulové napětí a nenulové napětí, nezávislé na jeho velikosti.

Avšak nároky pro stavbu analogových obvodů pixelů CIS jsou odlišné. Během integrační doby (délka expozice), kdy na pixel dopadají fotony, se vytvoří n_{FE} fotoelektronů, přičemž maximální počet elektronů v jámě je $n_{jáma}$. To odpovídá maximálnímu napětí

$$V_{max} = \frac{Q}{C} = n_{jáma}q \frac{t_{oxid}}{\varepsilon_{oxid}A_{gate}}, \quad (2.2)$$

kde Q je náboj, C kapacita, q hodnota jednoho náboje, ε_{oxid} dielektrická konstanta oxidu a A_{gate} velikost plochy elektrody. Vlastnosti analogových obvodů jsou lepší, je-li maximální napětí vyšší. To je možné zvětšením t_{oxid} nebo A_{gate} . Ovšem pro rozměrově omezený pixel není zvětšení elektrody vhodnou volbou, proto větší tloušťka oxidu je vhodnější parametr. Pro kvalitní výrobu CIS senzorů je vhodné, aby při výrobním procesu bylo možné vytvořit dvě různé tloušťky oxidu. Jednu pro digitální obvody a druhou pro analogové.[26]

2.3.1 Princip CMOS senzoru

Princip záznamu světla CIS čipů je velmi podobný principu CCD čipů, kdy fotony dopadající na fotocitlivou vrstvu vytvářejí ochuzenou zónu kombinací páru fotoelektron-díra (viz sekce 2.2.1). Avšak hlavním rozdílem mezi těmito dvěma technologiemi je to, že u CIS zachycený náboj nikam neputuje, ale je změřen transistorem přímo v každém z pixelů senzoru a až poté je jednoduchým způsobem vyčten z pixelu.

U CCD je náboj nejdříve složitým časováním přesouván z pixelů a až při výstupu náboje z horizontálního registru je náboj změřen a převeden na napětí. Přesun náboje mezi pixely je navíc velmi náročný, neboť napětí na elektrodách pro vytvoření potenciálových jam se pohybuje v hodnotách 8-15 V, což se zobrazí na mnohem větší spotřebě CCD čipů. U CIS pro přenos již změřeného náboje v jednotlivém pixelu je potřeba napětí přibližně o řád menší.

Technologie CIS je založená na alespoň 3 MOS tranzistorech, které jsou zakomponovány v každém pixelu. Ty umožňují provést různé operace přímo v pixelu, jako změření zachyceného náboje, vyčtení změřeného napětí, vynulování pixelu. Tři tranzistory v pixelu nesou označení 3T. Tato konfigurace je dostatečná k úspěšnému zaznamenání snímku, ale má mnoho nedostatků. Například zaznamenaný snímek je

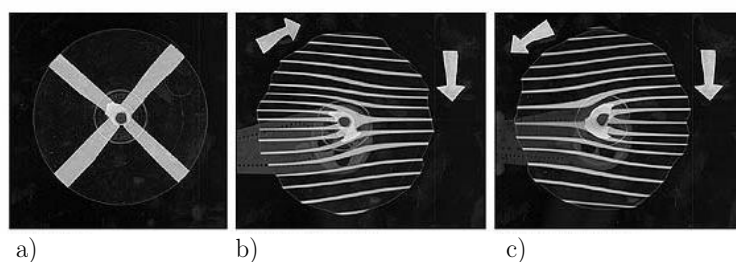
pokřiven právé z důvodu, že jednotlivé pixely jsou vyčítány a nemohou být resetovány najednou.

Tyto nedostatky jsou opravovány a vylepšovány právé dalšími tranzistory v každém pixelu. Takové senzory nesou označení 4T, 5T nebo i 6T. S dalšími tranzistory mají pixely další možnosti operací. Posun náboje v rámci pixelu k měřidlu, globální vynulování. S každým přidaným tranzistorem se rozšiřuje možnost použití zařízení, ale také zvyšuje počet obvodů a součástek v pixelu a tím i snižuje faktor zaplnění.

Vyčítání čipu je provedeno systémem horizontálních a vertikálních vodičů, které tvoří mřížku souřadnic podle pozic pixelů. Přivedením vyčítacího napětí na vodiče o určených souřadnicích, získáme hodnotu napětí pixelu přiřazeného k těmto souřadnicím. Tato vlastnost umožňuje vyčítání nejen celého snímku, ale i pouze vybrané části senzoru či jednotlivých pixelů.

Architektura 3T CIS senzorů je vyznačována způsobem postupného vyčítání snímku *Electronic Rolling Shutter (ERS)*. Vyznačuje se postupným vyčítáním jednoho pixelu za druhým. To je způsobeno tím, že při vyčítání jsou tranzistory schopny si udržet v paměti pouze hodnotu napětí jednoho pixelu. Tento nedostatek je odstraněn s technologií 4T a vyšší.

Tento efekt se projevuje zejména při snímání rychle se pohybujících předmětů. Tedy předmětů, které se viditelně pohnou za dobu integrace pixelu. Dobrým příkladem jsou otáčející se rotory letadel či helikoptér, které na výsledném snímku dle rychlosti otáčení jsou zobrazeny pokřiveně až tvarem typickým pro ERS viz obrázek 2.5. Tento problém je do jisté míry možné napravit numerickým přepočítáním snímku a tedy narovnání takto pokřivených struktur ve snímku.



Obr. 2.5: Typické pokřivení ve snímacím módu ERS. Obrázek a) zobrazuje nehybný rotor, b) a c) zobrazuje zechycení pokřivení rotoru při vyčítání snímku směrem dolů během otáčení rotoru ve směru a proti směru hodinových ručiček respektive. Převzato z [27].

S vyšším počtem tranzistorů v pixelu je od technologie 4T možné vyčítat a re-

setovat pixely najednou napříč celým senzorem. Tato vyčítací mód se nazývá **Global Shutter** (*globální uzávěrka*), která umožňuje současnou integraci všech pixelů. Synchronizací resetování a vyčtení pixelů je odstraněn s geometrickým pokřivením pohybujících se předmětů. Tato technologie umožňuje velmi dobrou ovladatelnost expozice snímání.[26]

2.4 Kvantová účinnost

Kvantová účinnost popisuje citlivost detekovaného světla v závislosti na vlnové délce dopadajících fotonů. Je ovlivněna faktorem zaplnění aktivní plochy pixelu, rozměrem ochuzené zóny, která je ovlivněna přiloženým napětím na elektrodě, tloušťkou substrátu a s ní spojenou střední vlnou dráhou fotonu a difuzí fotoelektronů v něm, transmisivitou použitých materiálů pro vodiče.

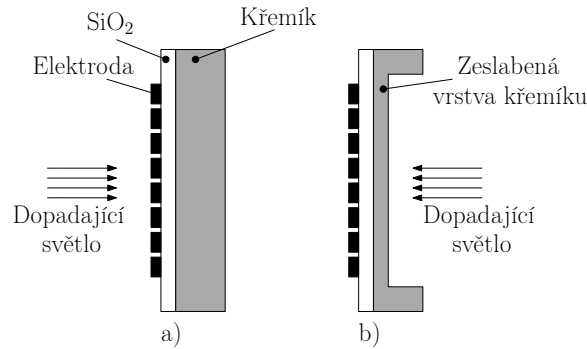
Kvantová účinnost obrazových sensorů určuje jejich citlivost na detekované světlo. Výrobci udávané hodnoty kvantové účinnosti se napříč výrobky liší a jsou velmi ovlivněny principem obrazového senzoru, technologií výroby, použitými materiály i způsobu aplikace dle spektrální odpovědi.

Obecně lze říci, že CMOS obrazové senzory mají nižší kvantovou účinnost než CCD senzory. To je dáno rozdílem v architektuře čipu, kdy CMOS mají nižší faktor zaplnění aktivní plochy pixelu z důvodu zaplnění pixelu tranzistory. Jejich faktor zaplnění lze zvýšit již zmiňovanými mikročočkami.

Zvýšit kvantovou účinnost a tedy citlivost detektoru je možné několika způsoby.

Kvůli snížení signálu stíněním např. v Interline Transfer zařízeních, kde maximální faktor zaplnění je 50%, je příhodné osvětlovat sensor ze zadní strany, tedy ze strany substrátu. Tento princip se nazývá **Back-side Illuminated (BI)**. Použitím této technologie je možné docílit více než 90% faktor zaplnění, neboť počet fotonů přicházejících zezadu není snižován obvody a světelnými štíty. Je nutné povrch křemíkového substrátu pokrýt anti-reflexní vrstvou, protože křemík je pro sledované vlnové délky světla neprostupný. Také musí být vrstva substrátu mnohem tenčí, než u klasických senzoru, aby vytvořené elektrony mohly difuzí docestovat a být zachyceny v ochuzené zóně. Kvůli tomuto ztenčení až na tloušťku 10 μm je stavba čipu velmi křehká a z toho vyplývá i omezené použití.

Senzor této konstrukce může dosahovat až 100% faktoru zaplnění, a tedy i vyšší kvantové účinnosti. Obrazové senzory založené na principu osvětlení ze zadní strany nesou název **Bi-CCD** nebo **Bi-CMOS**.

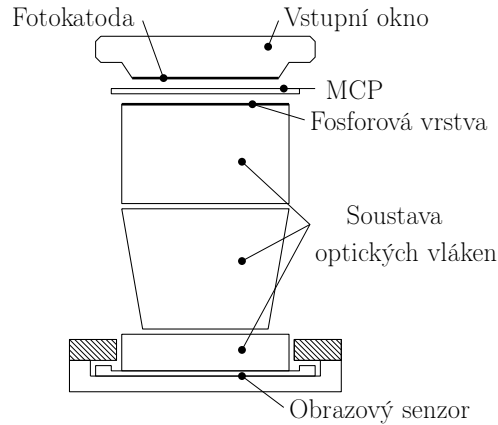


Obr. 2.6: a) klasický senzor, b) back-side iluminated senzor. Kvůli náročnému procesu výrobě a křehkosti konstrukce jsou BI optické senzory používány výhradně pro vědecké účely. Převzato a upraveno z [26].

Další možností jak zesílit citlivost obrazových senzorů je **Intensified** CCD nebo CMOS (**ICCD, ICMOS**). Tento *obrazový zesilovač* dokáže zvýšit počet detekovaných fotonů i o několik řádů.

I-senzory jsou sestaveny z fotokatody, na kterou dopadají pozorované fotony. Při dopadu fotonu na *fotokatodu* jsou uvolněny elektrony, které jsou vyraženy směrem k *microchannel plate* (MCP). Zhruba 80% z nich vstoupí do MCP, které je složeno z tisíců paralelně uložených skleněných trubiček (kanálek) o průměru 10 μm . Elektrony, které vstoupí do kanálek, narazí do jejich povrstvené stěny a vyrazí sekundární elektrony. Takto produkované elektrony jsou urychlovány vysokým potenciálem mezi MCP. Opakovanými srážkami se stěnami MCP je elektronový zisk i několik tisíc. Elektrony jsou urychleny směrem k fosforové vrstvě, kde při nárazu vyzáří světlo, které je sbíráno soustavou optických vláken a usměrňováno na obrazový čip. Nastavením urychlovacího napětí na MCP je nastavována i úroveň zesílení. Nevýhodou této metody je složitost výroby soustavy optických vláken pro přenos světla z fosforové vrstvy na čip. Je možné použít místo optických vláken soustavu čoček, díky kterých je pak možné takový zesilovač přidat i k už stávajícímu obrazovému senzoru. Avšak použití čoček v tomto případě snižuje zisk zesílení až 10x.

Pro zvýšení citlivosti v oblasti UV záření je možné využití **Lumogenu**, tenkého filmu UV fluorescenčního fosforu, který je nanesen přímo na strukturu pixelů. Lumogen emituje záření o vlnové délce 0,54-0,58 μm , když je excitován UV zářením o vlnové délce 0,12-0,45 μm . Pro viditelné světlo je transparentní a tedy neovlivňuje citlivost pro viditelné spektrum. S využitím lumogenu je šířka spektrálního pásu, pro které je optický senzor citlivý, 0,12-1,1 μm . [26]



Obr. 2.7: Schéma obrazového zesilovače. Převzato a upraveno z [26].

2.5 Šum

V digitálních obrazových senzorech hraje šum významnou roli, neboť přímo ovlivňuje kvalitu výsledného produktu - snímku. Šum rozlišujeme dle způsobu a místa vzniku na šum tepelný, výstřelový, vyčítací, kvantizační a vzorový. Tyto druhy šumu mají odlišné způsoby vzniku a projevu ve snímku. Výsledný šum snímku je odmocninou součtu kvadrátů šumu dle

$$N_{\text{šum}} = \sqrt{A^2 + B^2 + C^2 + D^2 + \dots}, \quad (2.3)$$

a tedy převládají dominantní zdroje šumu.[26]

Způsobem redukce šumu v přístrojích (ne pouze obrazových senzorech) je zabýváno již od doby, kdy byl šum detekován a vyhodnocen jako nežádoucí. Ovšem z podstaty vzniku ne všechny zdroje šumu lze potlačit či odstranit.[28]

Tepelný šum

Vznik tepelného šumu je připisován tepelným vibracím mřížek a nosičům náboje v materiálu v obrazovém senzoru. Je produkován nejen ve fotocitlivých vrstvách pixelů, ale v celém pixelu. Tepelný šum je generován několika způsoby: tepelnými vibracemi a rozptylem v neutrální zóně substrátu, tepelnými vibracemi v ochuzené zóně a tepelnými vibracemi na rozhraní křemík-oxid křemičitý kvůli povrchovým stavům. Výsledná hodnota šumu ve snímku je tedy závislá na teplotě čipu a délky expozice.

Potlačení tepelného šumu je prováděno snížením teploty senzoru. Je možné chladit čipy kamery i tekutým dusíkem, který dokáže zchladit na teplotu i -200 °C. Ovšem s tak nízkou teplotou vyvstávají problémy s mobilitou nosičů náboje, a tedy i celkovou funkčností přístroje. [26]

Výstřelový šum

Podstatou tohoto druh šum je diskrétní podstata elektronu jako nosiče náboje a časově závislé fluktuace proudu protékající vodičem. Tyto kolísající změny jsou původem zachycených elektronů při záznamu obrazu. [29]

Tento šum není teplotně závislý jako tepelný šum a z podstaty vzniku jej tedy nelze potlačit. Ovšem ovlivnění obrazu tímto šumem je závislé na způsobu snímání neboť úroveň tohoto šumu je obecně velmi nízká je patrný pouze ve snímcích s nízkou intenzitou (počtem dopadnutých fotonů). Se zvyšující se intenzitou výstřelový šum je méně patrný, až zaniká.

Vyčítací šum

Po vyčtení naměřené hodnoty pixelu snímku je ochuzená zóna pixelu vynulována MOS tranzistorem. To je způsobené tepelným šumem generovaným rezistivitou MOS tranzistoru při vynulování, který paralelně s kondenzorem generuje elektrony, které tak zůstanou v ochuzené zóně. Tato nepřesnost po vynulování je vyčítacím šumem.

Přestože vyčítací šum lze snížit chlazením obrazového čipu, tak proces vyčtení (a vynulování) vytváří a stanovuje minimální detekční limit senzoru. [30]

Kvantizační šum

Rozlišení A/D (*analog to digital*) převodníku je definováno dynamickým rozsahem $DR = 2^b$, kde b je počet bitů použitého A/D převodníku. Převod ze spojitě hodnoty napětí, které je vyčteno ze senzoru na diskrétní hodnotu (digitální výstup), způsobí kvantizační šum. Tedy přesné hodnotě napětí přiřadí nejbližší diskrétní hodnotu z úrovně dynamického rozsahu. Pro zvýšení bitové hloubky o 1 se sníží kvantizační šum oproti předchozí úrovni o faktor 2. [26]

Snížení kvantizačního šumu je možné zvýšením úrovně počtu bitů A/D převodníku.

Vzorový šum

Tento typ šumu je ovlivněn tepelným šumem a je pozorovatelný při delších expozicích tmavých snímků, kdy určité pixely produkují trochu vyšší hodnotu intenzity než ostatní. Tyto pixely pak spolu tvoří vzor, dle kterého je šum ve snímku tvořen.

Vzorový šum je možné potlačit či zcela odstranit odečtením určité hodnoty pozadí nebo numerickým dopočtením dle referenčního snímku.

3 TERMOELEKTRICKÝ JEV

Termoelektrický jev [31] je přímou konverzí mezi rozdílem teploty a elektrického napětí. Této podstaty se využívá v termoelektrických člancích (termočlánky), jako je Seebeckův článek a Peltierův článek.

Při kontaktu dvou různých kovů (resp. polovodičů) vzniká rozdíl napětí - tzv. kontaktní napětí. To závisí na chemické reaktivitě použitých kovů a rozdílu jejich teplot. Toho využil již roku 1800 italský fyzik Alessandro Volta při konstrukci Voltova elektrického článku [32].

Z pohledu moderní fyziky se kovy řadí podle výstupní práce, což je energie potřebná k vyražení elektronu z kovu. Proto kovy s nižší hodnotou výstupní práce se nabíjejí záporně více, než kovy s vyšší výstupní prací [33].

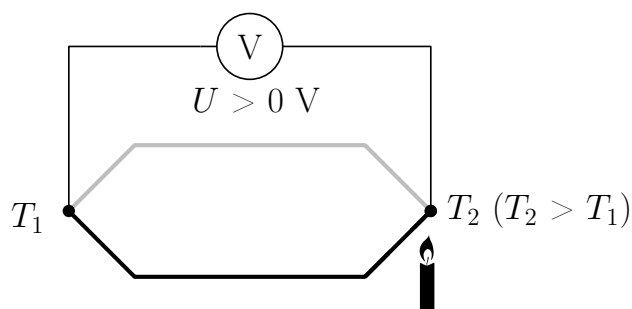
Termoelektrický jev se dá rozdělit dle fyzikálního principu na

- Seebeckův jev
- Peltierův jev

3.1 Seebeckův jev

Seebeckův jev objevil roku 1821 německý fyzik Thomas Johann Seebeck (1770-1831) [34]. Vyznačuje se převodem rozdílu teploty na elektrické napětí. To se děje za podmínky, že při kontaktu dvou různých kovů ve dvou místech 1 a 2 můžeme při vytváření teplotního rozdílu mezi těmito body sledovat i rozdíl kontaktních napětí U_1 a U_2 , a tím měřit i celkové napětí ΔU .

$$\Delta U = \alpha_{12}(T_2 - T_1) \quad (3.1)$$



Obr. 3.1: Seebeckův jev [35]

Koeficient α_{12} je Seebeckův koeficient [$\text{V}\cdot\text{K}^{-1}$], který závisí pouze na dané dvojici kovů a jejich materiálovým vlastnostem¹. Výsledné termoelektrické napětí ΔU tím pádem závisí pouze na rozdílu teplot T_1 a T_2 a materiálových vlastnostech daných kovů. Tyto materiálové vlastnosti jsou vyjádřeny právě seebeckovým koeficientem α jako

$$\frac{\nabla E_F}{q} = \alpha_{12} \nabla T, \quad (3.2)$$

kde E_F je Fermiho energie (a $E_F/q = \phi_F$ je elektrochemický potenciál) a ∇T je teplotní gradient spoje 1 a 2.

Bylo prokázáno, že pro dva totožné kovy Seebeckův jev nemůže nastat, a to z důvodů symetrie. Protože tento jev závisí na materiálové vlastnosti, ale ne na způsobu provedení kontaktu dvou materiálů [34].

3.2 Peltierův jev

Peltierův jev je jevem opačným Seebeckovu jevu [34]. Přiložením rozdílného potenciálu ΔU na dva spoje dvou různých kovů 1 a 2 vzniká stejnosměrný tok proudu I_{12} i převod tepla \dot{Q} mezi těmito spoji dle

$$\dot{Q} = \Pi_{12} I_{12}, \quad (3.3)$$

kde Π_{12} je peltierův koeficient pro kontakt dvou materiálů 1 a 2. Peltierův koeficient Π je možné vyjádřit seebeckovým koeficientem α jako

$$\Pi_{12} = \alpha_{12} T. \quad (3.4)$$

Takto definovanými koeficienty lze vyjádřit teplo převedené za jednotku času elektrickým proudem skrze kontakt dvou materiálů jako

$$\dot{Q} = \alpha_{12} T I. \quad (3.5)$$

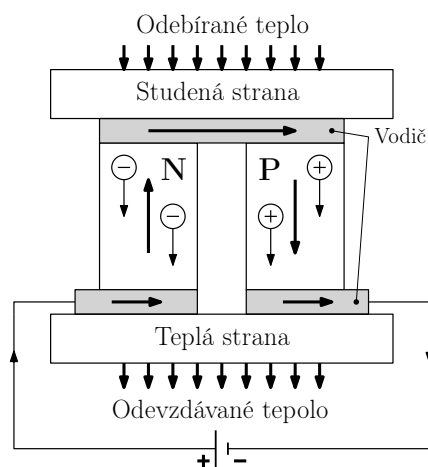
Zvolíme-li vhodně materiály pro stavbu peltierova článku, například polovodičové dopanty typu P² a N³, tak při průchodu proudu se v polovodiči typu N začnou volné elektrony pohybovat směrem ke kladné elektrodě a v polovodiči typu P díry směrem k záporné elektrodě (viz obr. 3.2).

¹Materiálovými vlastnostmi se myslí elektroreaktivita, počet volných elektronů, u polovodičů jestli je n resp. p dotovaný a s tím související šířku zakázaného pásu E_G a hodnotu fermiho energie E_F .

²Polovodiče typu P obsahují díky dotováním příměsmi více děr ve vodivostním pásu, které se chovají jako volné elektrony, pouze z kladným nábojem [36].

³Polovodiče typu N obsahují díky dotováním příměsmi více volných elektronů ve valenčním pásu.

S navržením vhodné konstrukce struktury polovodičů P a N je možné vytvořit chladicí článek, jenž při průchodu proudu na jedné straně chladí a na druhé hřeje.



Obr. 3.2: Peltierův článek tvořený dvěma polovodiči typu N a P spojené vodivým kontaktem (vyznačen šedou). Šipky ve vodičích znázorňují směr protékajícího stejnosměrného proudu I . Při tomto zapojení je z horní plochy článku absorbováno teplo \dot{Q} a je polovodiči přenášeno do plochy spodní, kde je teplo odevzdáno [37].

4 SMĚRODATNÁ ODCHYLKA FÁZE

V této části textu je popsána metodika experimentu a i samotné měření, která autor provedl pro stanovení směrodatné odchyly fáze - porovnávaného parametru obrazových senzorů. Tento parametr jsem se rozhodl sledovat v závislosti na dvou kritériích - bitové hloubce záznamu a délce expozice snímku.

Následující text lze rozdělit chronologicky podle vykonaných úkonů takto:

- Přehled kamer
- Černý snímek
- Syntetický hologram
- Zpracování
- Výsledky

4.1 Přehled kamer

Pro daný problém jsem otestoval celkem šest kamer dostupných na Oboru optiky a přesné mechaniky Ústavu fyzikálního inženýrství na VUT v Brně. Některé kamery bylo možné proměřit vícekrát z důvodu možnosti zvolení bitové hloubky záznamu obrazu.

Údaj „Bitová hloubka“ obsahuje pouze ty hodnoty, pro které jsem dané kamery testoval. Obecně mohou mít více hodnot.

Tab. 4.1: Přehled měřených kamer a jejich parametry.

Výrobce	Označení	Technologie	Rozlišení [px]	Velikost pixelu [$\mu\text{m} \times \mu\text{m}$]	Bitová hloubka [bit]
Ximea	MR285MC-BH	CCD	1360 × 1024	6,45 × 6,45	12,14
Nikon	D810	CMOS	7380 × 4928	4,87 × 4,87	14
Sony	α A5000	CMOS	5456 × 3632	4,25 × 4,25	12
Ximea	MA85	CCD	1376 × 1038	6,45 × 6,45	12
Jenoptik	ProgRes-MF	CCD	1360 × 1024	6,45 × 6,45	12
Basler	acA2040-180km	CMOS	2048 × 2048	5,5 × 5,5	12

4.2 Černý snímek

K měření vybraných vlastností optických senzorů jsem jednotlivými kamerami snímal tzv. černý snímek (v ang. překladu *darkframe*). Ten je vytvořen za podmínky, že na světlocitlivý čip (obrazový senzor kamery) nedopadne žádný foton. To je docíleno zaslepením čipu krytem.

Podíváme-li se na černý snímek, tak z teoretického hlediska by měla být všude naměřena nulová hodnota, jelikož na čip nedopadl žádný foton. Avšak skutečnost je taková, že po změření je snímek zatížený šumem. Takovýto šum je složený z termického šumu, vyčítacího šumu, šumu na zesilovači a A/D převodníku.

Délka expozice

Pro každé měření kamery jsem nasnímal sérii snímků, složenou z 6 setů dle délky expozice, po desíti snímcích. Délka expozice byla pro měření všech kamer vždy stejná, a to 0,05 s, 0,1 s, 0,125 s, 0,25 s, 0,5 s a 1 s. Hodnoty expozice byly stanoveny pro přehlednost měření.

4.2.1 Vyhodnocení černého snímku

Výše vytvořené černé snímky jsou reprezentovány jako matice o velikosti pole $N = I \times J$ px, kde každý pixel je reprezentovaný diskretní hodnotou z intervalu $\langle 0; 2^b - 1 \rangle$.

S tímto vědomím jsem vytvořil algoritmus v programovacím prostředí Matlab R2011b, který načte snímky jednoho setu¹ do paměti a každému snímku přiřadí odpovídající matici hodnot. Pro každou takto vytvořenou matici vypočítá průměrnou hodnotu k -té matice μ_k a následně směrodatnou odchylku k -té matice $\sigma_{D,k}$, definované jako:

$$\mu_k = \frac{\sum_{i,j}^{I,J} x_{k,i,j}}{N} \quad (4.1)$$

a

$$\sigma_{D,k} = \sqrt{\frac{\sum_{i,j}^{I,J} (x_{k,i,j} - \mu_k)^2}{N}}, \quad (4.2)$$

kde $x_{k,i,j}$ reprezentuje hodnotu prvku i -tého řádku a j -tého sloupce k -té matice. Posledním krokem je vypočtením směrodatné odchylky celého setu σ_D jako průměrné hodnoty všech směrodatných odchylek $\sigma_{D,k}$ k -tých matic.

Je důležité zachovat pořadí jednotlivých operací při výpočtu směrodatné odchylky. Kdybychom nejdříve vypočítali průměr všech matic setu (sečetli všechny matice (snímky) v jednu a podělil deseti (počtem snímků v setu)) a až poté směrodatnou odchylku této jedné matice, výsledná hodnota by nebyla odpovídající skutečnosti.

Představím zde extrémní případ. Existuje určitá pravděpodobnost, že by mohly dvě na sobě nezávislé plochy šumu mít přesně opačné hodnoty. Jejich součtem bych

¹Jak již bylo zmíněno výše, jeden set obsahuje deset snímků se o stejné délce expozice.

získal konstantní hodnotu a to by poté odpovídalo nulové hodnotě směrodatné odchylky. Proto snímky nejsou sčítány v jeden.

Saturovaný snímek

Tento snímek je vytvořen opačným způsobem, než černý snímek. Místo abychom se snažili fotonům zabránit v dopadu na optický senzor, vystavíme senzor zdroji světla tak, aby se jednotlivé pixely (potenciálové jámy pixelů) zcela naplnily, a tím se „saturovaly“.

Při následné analýze takového snímku mě zajímala nejvyšší hodnota matice snímku, která reprezentuje maximální hodnotu, které snímek může nebýt. Tato hodnota je rovna $S = 2^b - 1$, kde b udává bitovou hloubku v bitech. Tento saturovaný snímek jsem připravil pro každou kameru a vypočetl pomocí hodnoty S procentuální zastoupení směrodatné odchylky šumu σ_D ve snímku

$$\sigma_{\%} = \frac{\sigma_D}{S} \cdot 100\%. \quad (4.3)$$

Směrodatnou odchylku $\sigma_{\%}$ počítám z důvodu, že výstup některých kamer neodpovídal nastavené bitové hloubce senzoru. Uvedu příklad: Kamera Jenoptik ProgRes-MF snímá v 12 bitovém režimu, ale saturovaný snímek této kamery má hodnotu $S = 2^{14} - 1 = 16383$ ADU, což odpovídá 14 bitovému záznamu. Pro zjednodušení následného výpočetního procesu je nejdříve vypočteno $\sigma_{\%}$ a z této hodnoty generován dle nastavení odpovídající šum v syntetickém hologramu viz 4.3.1.

4.3 Hologram

V holografickém mikroskopu hologram vzniká interferencí dvou mimoosových svazků předmětové a referenční větve v předmětové rovině výstupního mikroobjektivu [13]. Přes něj je zobrazen do obrazové roviny na čip optického senzoru, kde je obraz zaznamenán.

Interference

Takto zaznamenaný interferenční obrazec lze popsat za podmínek, že na detektor dopadají dvě rovinné vlny pod úhlem θ [38]

$$\begin{aligned} A_1(\vec{r}, t) &= A_1 e^{-i(-\vec{k}_1 \cdot \vec{r} + \varphi_1)} \\ A_2(\vec{r}, t) &= A_2 e^{-i(-\vec{k}_2 \cdot \vec{r} + \varphi_2)}, \end{aligned} \quad (4.4)$$

kde A_i je amplituda vlny, \vec{k}_i vlnový vektor a φ_i posunutí fáze i -té vlny. Interference těchto dvou rovinných vln vytvoří vzor proužků, který lze popsat intenzitou

$$I(\vec{r}) = |A_1(\vec{r}) + A_2(\vec{r})|^2 = [A_1(\vec{r}) + A_2(\vec{r})] \cdot [A_1^*(\vec{r}) + A_2^*(\vec{r})] = A_1^2 + A_2^2 + A_1A_2 \cdot e^{i((\vec{k}_1 - \vec{k}_2) \cdot \vec{r} + (\varphi_2 - \varphi_1))} + A_2A_1 \cdot e^{-i((\vec{k}_1 - \vec{k}_2) \cdot \vec{r} + (\varphi_2 - \varphi_1))} + A_2^2, \quad (4.5)$$

kde $\vec{\Delta k} = \vec{k}_1 - \vec{k}_2$ a $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$. Za podmínky $\sin(\theta) = -\sin(-\theta)$ pro dopadající vlny pod úhlem θ pak platí

$$\vec{k}_1 = k_0 \sin(\theta), \vec{k}_2 = k_0 \sin(-\theta), \\ \vec{\Delta k} = \vec{k}_1 - \vec{k}_2 = k_0 \sin(\theta) + k_0 \sin(\theta) = 2k_0 \sin(\theta). \quad (4.6)$$

Výsledné rozložení intenzity hologramu v rovině detektoru je

$$I(\vec{r}) = A_1^2 + A_2^2 + A_1A_2 \frac{2}{1} \cdot \frac{e^{i(\vec{\Delta k} \cdot \vec{r} + \Delta\varphi)} + e^{-i(\vec{\Delta k} \cdot \vec{r} + \Delta\varphi)}}{2} = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\vec{\Delta k} \cdot \vec{r} + \Delta\varphi) \quad (4.7)$$

$$I(\vec{r}) = [A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(k_0 2 \sin(\theta) \cdot \vec{r} + \Delta\varphi)]. \quad (4.8)$$

4.3.1 Generování syntetického hologramu

Je časově i konstrukčně velmi náročné každou proměřovanou kameru připojit k holografickému mikroskopu, abychom nasníмали a proměřili vytvořené hologramy. Proto jsem napsal algoritmus, který vytvoří umělý hologram (syntetický hologram) a zatíží šumem. Takto vytvořený umělý hologram je odvozen z interferenčního vztahu 4.8, také popsaném v [15] a interpretován maticí

$$I_T(x, y) = M(x, y) + \frac{c2^b - 1}{4} \cdot [A_1^2(x, y) + A_2^2(x, y) + 2A_1(x, y)A_2(x, y) \cos(2\pi \frac{x \sin \xi + y \sin \xi}{L} + \varphi(x, y) + \varphi_0)], \quad (4.9)$$

kde matice $M(x, y)$ vyjadřuje generovaný náhodně rozdělený šum [39] podle směrodatné odchylky $\sigma = \sigma\% \cdot (2^b - 1)/100\%$ a střední hodnoty $\mu = 0$. Člen $c2^b - 1$ určuje maximální hodnotu interferenčních proužků v hologramu, kde c je využití bitové hloubky a nabývá hodnoty $< 0; 1 >$. Matice $A_1^2(x, y)$ a $A_2^2(x, y)$ amplitudu dopadajících vln. V argumentu funkce \cos vystupuje úhel ξ jako pootočení orientace proužků vůči ose y a L perioda proužků. Matice $\varphi(x, y)$ udává fázový posun každého bodu snímku a φ_0 počáteční fázový posun celého snímku.

Tímto způsobem jsem vygeneroval hologramy pro každou hodnotu směrodatné odchylky šumu $\sigma\%$ dané kamery, tedy šest setů po desíti hologramech na bitovou hloubku kamery podle délky expozice. Tyto hologramy reprezentují rovinu (konstantní hodnotu), ke které je přičten šum dle dané kamery.

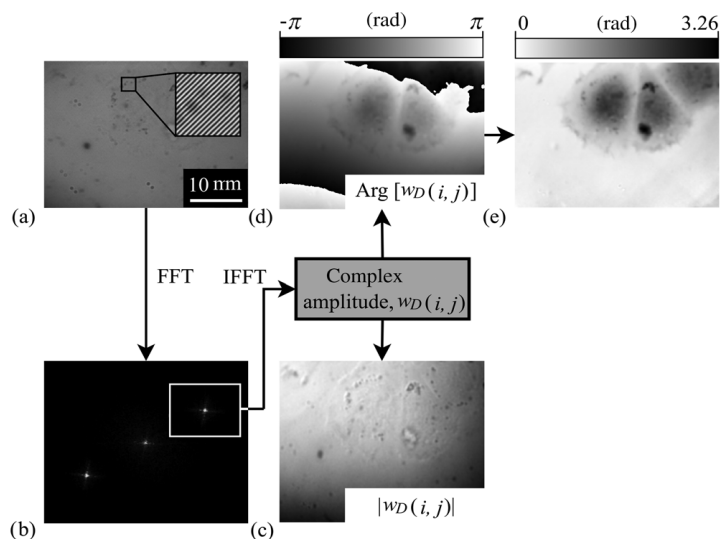
K tomu jsem vytvořil ke každé kameře podle počtu proměřovaných bitových hloubek několik „referenčních“ snímků. Tyto snímky mají stejné rozměrové parametry jako syntetické hologramy kamer, pouze nejsou zatíženy šumem ($M(x, y) = 0$). Jsou vytvořeny, pro následné použití při zpracovávání k vyrovnání plochy zobrazené fáze.

4.4 Zpracování hologramu

Stejně jako jsou zpracovávány reálné hologramy nasnímané při pozorování předmětů holografickým mikroskopem, jsou i syntetické hologramy zpracovány stejným způsobem.

Q-Phase

Každý z vytvořených hologramů byl zpracován pomocí programu Q-Phase, který je vytvořen pro obsluhu holografického mikroskopu založeném na principu CCHM (Coherence Controlled Holographic Microscope), který byl vyvinut na Ústavu fyzikálního inženýrství FSI VUT v Brně [13] ve spolupráci s firmou TESCAN ORSAY HOLDING a.s.. Tento program také umožňuje vkládat již vytvořené snímky hologramů a dále s nimi pracovat.



Obr. 4.1: Diagram zpracování obrazu: (a) hologram živé buňky, (b) spektrum prostorových frekvencí s výběrovou operací okolo nosné frekvence f_c , (c) obraz amplitudy (intenzity), (d) obraz fáze a (e) kvantitativní fázový obraz. Převzato z [16].

Navržená procedura snímky zpracovává v několika krocích. Rychlá fourierova transformace (FFT) vypočítá spektrum prostorové frekvence hologramu, ty jsou

vybrány a vyříznuty kruhovým polem (definovaným optickými vlastnostmi optické soustavy a použité vlnové délky světla) se středem v bodu nosné frekvence f_c , která je určena nejvyššími hodnotami součtů fourierovy řady. Následnou zpětnou fourierovou transformací (IFFT) vybrané části snímku prostorových frekvencí získáme dva obrazy, kvadrát amplitudy a fázi snímaného objektu. Kvadrát amplitudy je obraz intenzity objektu, nebo-li obraz, který bychom viděli optickým mikroskopem. Zato snímek fáze vypovídá o informacích, které pouhým okem nezjistíme. Po numerickém vyrovnání fáze (odečtení plochy, která obraz pozadí fáze naváže a vyrovná), kvantitativní fázový obraz zobrazuje rozložení hmoty snímaného objektu, tedy optickou hustotu. Ze známých parametrů, jakými jsou změna fáze a vlnová délka použitého světla, lze vypočítat tloušťku objektu.[16]

Vyrovnání fáze referenčním snímkem

Aby obraz fáze vydával nezkreslené informace, je nutné provést kompenzaci fáze (vyrovnání). Obraz fáze je totiž numericky upraven a navázán tak, aby hodnoty z intervalu $\langle -\pi; \pi \rangle$ na sebe hladce navazovaly. To vytvoří ve snímku fáze pokřivenou plochu. Pro vytvoření obrazu kompenzované fáze se od snímku fáze odečítá v ideálním případě hodnota takové plochy, kterou je snímek fáze pokřiven.

Po zpracování syntetických hologramů, které prakticky reprezentují rovinu s přidáním šumem, byly snímky navázané fáze deformovány. Proto byly vytvořeny referenční snímky (nezatížené šumem), které také prošly procesem zpracování stejným způsobem jako ostatní hologramy. Avšak tím, že snímky mají stejné parametry jako ty zatížené šumem, tak i plocha kterou jsou deformovány při navázání fáze je stejná. Proto jsem referenční snímky využil k odečtení od těch zatížených šumem, a tím vytvořil kompenzované (vyrovnané) snímky fáze hologramů zatížených šumem, z kterých jsem vypočítal směrodatnou odchylku šumu ve fázi σ_φ .

Přepočet na reálný rozměr

Z velikosti směrodatné odchylky šumu ve fázi je možné spočítat reálnou tloušťku odpovídající směrodatné odchylce šumu σ_φ^h , respektive nejmenší změnu tloušťky objektu, který sledujeme. Má-li tedy pozorovaný objekt změnu $h > \sigma_\varphi^h$, mělo by být možno ji rozpoznat.

$$\sigma_\varphi^h = \frac{\lambda\sigma_\varphi}{2\pi\Delta n} \quad (4.10)$$

Tuto hodnotu bychom mohli také nazvat jako prahové rozlišení tloušťky vzorku dané kamery.

4.5 Výsledky

Pro porovnávání výsledků jsem vybral několik kritérií, podle kterých jsem výsledky seřazoval a třídil. Hlavním kritériem měření je hodnota směrodatné odchylky šumu v černém snímku a její poměr k maximální hodnotě daného snímku v procentech $\sigma\%$. Tento parametr lze porovnat pro všechny kamery nezávisle na bitové hloubce. Právě bitová hloubka je kritérium, podle kterého jsem rozdělil kamery do dvou tříd, 12 bit a 14 bit.

Pro všechna měření snímků všech kamer byla podstatná délka expozice snímku. Ta byla dělena do šesti hodnot: 1 s, 0,5 s, 0,25 s, 0,125 s, 0,1 s, 0,05 s. Pro každou z těchto hodnot byly nasnímány a proměřeny černé snímky kamer a z nich určeny hodnoty σ_D a následně vypočteny $\sigma\%$, z kterých byl vytvořeny série syntetických hologramů. Ty byly zpracovány v programu Q-Phase a přepočteny v snímky rekonstruovaného fázového obrazu. Odečtením referenčního snímku byla vyrovnána plocha snímků zatížených šumem a následně vypočteny směrodatná odchylka fáze σ_φ a směrodatná odchylka tloušťky ve fázi σ_φ^h .

Chlazení

Při snímání černých snímků kamerou Basler acA2040-180km jsem zpozoroval, že při nepřetržitém snímání kamera velmi hřeje a teplota vystoupala nad 40 °C . Z vypočtených hodnot získaných snímků bylo i patrné, že zvyšující se teplota kamery při snímání negativně ovlivňovala jejich výsledek.

Z těchto důvodů bylo provedeno nové měření této kamery s využitím chlazení peltierovým článkem (viz oddíl 5.1.1) a pasivním chladičem s ventilátorem. Takto se podařilo s obtížemi zchladit kameru až k 11°C, ale pouze na omezenou dobu. To bylo dáno ne příliš vhodnou konstrukcí chlazení, která nemohla efektivně odvádět teplo z kamery. Výsledky měření jsou uvedeny v tabulce 4.2.

Pro srovnání efektu chlazení na hodnoty směrodatných odchylek šumu kamery Basler acA2040-180km byla vybrána kamera Ximea MR285MC-BH, která má integrované chlazení snímacího čipu peltierovým článkem. Tato kamera je použita jako detektor mikroskopu v CCHM², a proto je vhodným kandidátem pro srovnání. Výsledky měření jsou uvedeny v tabulce 4.3.

²V prostorách Ústavu fyzikálního inženýrství FSI v Brně.

Vyhodnocení

Naměřené a vypočtené výsledky kamer Basler acA2040-180km a Ximea MR285MC-BH jsou uvedeny v tabulkách 4.2 a 4.3 respektive. Výsledky σ_φ v teplotní závislosti jsou zobrazeny v obrázcích grafů 4.2 a 4.3.

Celkové porovnání výsledků všech měřených kamer pro 12bit a 14bit hodnotu je uvedeno v tabulkách 4.4 a 4.5.

Z výsledků teplotních závislostí lze vyčíst, že pro vyšší teploty kamera Basler vykazuje až o řád vyšší hodnoty σ_φ než kamera Ximea, která zároveň pro všechny zkoumané teploty vykazuje pro kratší expozice (0,05, 0,1 a 0,125 s) podobnou úroveň hodnot. Avšak pro delší expozice hodnota σ_φ narůstá i v závislosti na vzrůstající teplotu.

Pro nižší teploty (11 °C a 14,3 °C) však kamera Basler z naměřených dosahuje lepších výsledků, než kamera Ximea, a to v celém rozsahu zkoumané délky expozice.

V porovnání 12bit kamer je chlazená Basler acA2040-180km svými výsledky nejlepší z porovnávaných zařízení.

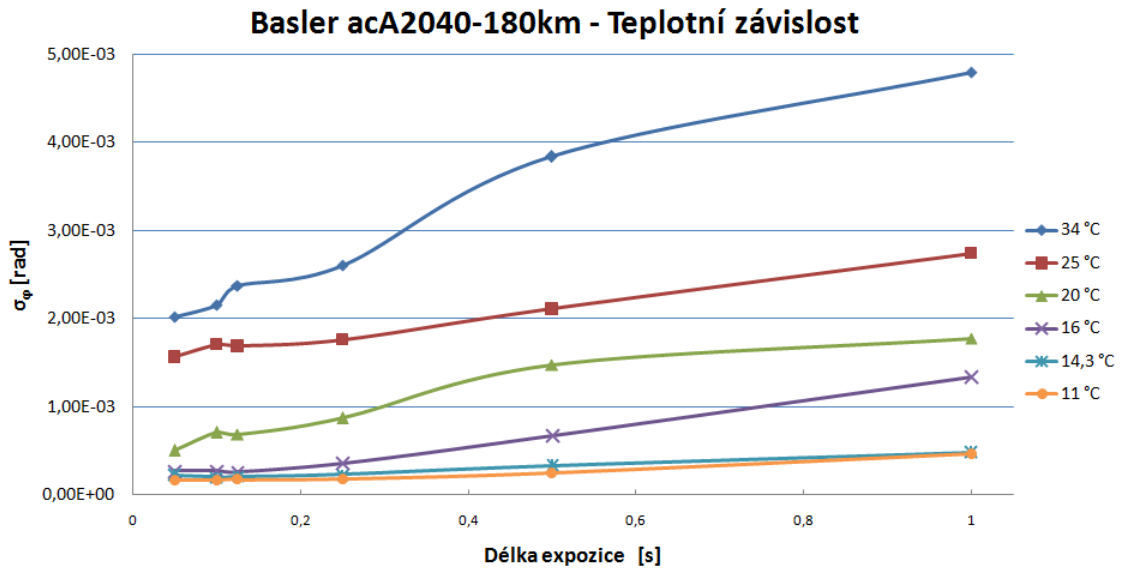
V porovnání 14bit kamer vykazuje nejlepší výsledky fotoaparát Nikon D810. Tato profesionální DSLR kamera však nemůže být přímo srovnávána, neboť při zpracování snímků po záznamu bylo nutné snímky získat ze surového souboru formátu .NEF, který je výstupním formátem snímků. Pomocí programu *DCRAW*, který umožňuje snímky ze surového souboru získat však i odečítal hodnotu pozadí od každého snímku, a tedy ovlivnil i výsledný šum.

Stejný případ s odečtením pozadí také nastal u černých snímků fotoaparátu Sony α A5000, který v celkovém porovnání s ostatními kamerami měl výsledky velmi dobré, avšak ne nejlepší.

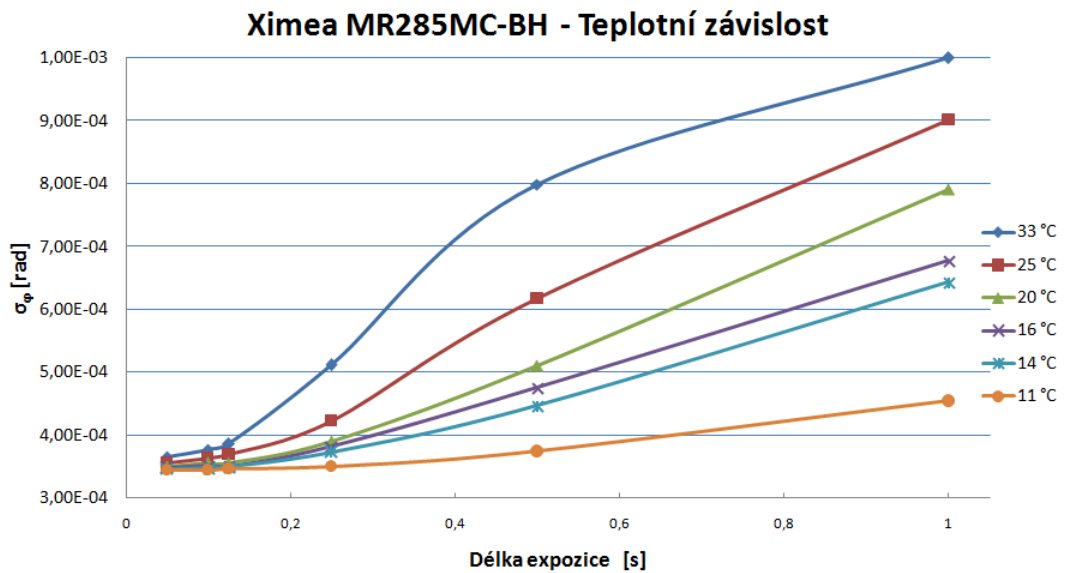
Basler acA2040-180km

Z uvedených výsledků v tabulce 4.2 je možné vidět, že chlazením této kamery bylo dosaženo o řád menších hodnot směrodatných odchylek šumu ve fázi σ_φ oproti výsledkům při teplotě 34 °C. Z porovnávaných zařízení tak dosáhla nejlepších výsledků kamera Basler acA2040-180km. S pomocí chlazení se stala z dostupných kamer nejvhodnějším kandidátem pro použití v holografii.

Pro lepší efekt chlazení a tím i dosažení lepších výsledků šumových vlastností, je další část této práce zaměřena na návrh konstrukce, sestavení a optimalizaci efektivního chlazení pro kameru Basler acA2040-180km.



Obr. 4.2: Chlazená kamera Basler acA2040-180km.



Obr. 4.3: Chlazená kamera Ximea MR285MC-BH.

Tab. 4.2: Basler acA2048-180km měřená v závislosti na teplotě čipu.

Naměřený šum v černém snímku - σ_D [ADU]						
Expozice [s]	Teplota při měření [°C]					
	34	25	20	16	14,3	11
1	15,1197	9,1439	6,3737	4,6164	1,8032	1,7466
0,5	11,2771	7,0802	4,9085	2,3076	1,0214	0,7869
0,25	8,2386	6,2462	3,2398	1,0818	0,6288	0,3929
0,125	7,3281	5,8598	2,3095	0,7095	0,4983	0,3276
0,1	7,2725	5,9019	2,3437	0,7334	0,4692	0,2936
0,05	6,9592	5,7119	1,9922	0,7175	0,5148	0,2531
Přepočteno na procentuální šum - $\sigma_{\%}$ [%]						
Expozice [s]	Teplota při měření [°C]					
	34	25	20	16	14,3	11
1	0,36922	0,22329	0,15565	0,11273	0,04403	0,04265
0,5	0,27539	0,17290	0,11987	0,05635	0,02494	0,01922
0,25	0,20119	0,15253	0,07912	0,02642	0,01536	0,00959
0,125	0,17895	0,14310	0,05640	0,01733	0,01217	0,00800
0,1	0,17759	0,14412	0,05723	0,01791	0,01146	0,00717
0,05	0,16994	0,13948	0,04865	0,01752	0,01257	0,00618
Naměřený šum ve fázi - σ_{φ} [rad]						
Expozice [s]	Teplota při měření [°C]					
	33	25	20	16	14	11
1	4,80e-3	2,74e-3	1,78e-3	1,34e-3	4,79e-4	4,64e-4
0,5	3,84e-3	2,11e-3	1,47e-3	6,70e-4	3,30e-4	2,54e-4
0,25	2,61e-3	1,76e-3	8,71e-4	3,63e-4	2,33e-4	1,85e-4
0,125	2,38e-3	1,69e-3	6,90e-4	2,59e-4	2,11e-4	1,74e-4
0,1	2,16e-3	1,71e-3	7,04e-4	2,74e-4	2,00e-4	1,67e-4
0,05	2,02e-3	1,56e-3	5,03e-4	2,68e-4	2,22e-4	1,59e-4
Přepočteno na reálnou výšku ve fázi- σ_{φ}^h [nm]						
Expozice [s]	Teplota při měření [°C]					
	34	25	20	16	14,3	11
1	0,9932	0,5676	0,3676	0,2774	0,0990	0,0959
0,5	0,7946	0,4367	0,3052	0,1387	0,0682	0,0524
0,25	0,5392	0,3639	0,1803	0,0750	0,0483	0,0383
0,125	0,4916	0,3494	0,1427	0,0537	0,0436	0,0359
0,1	0,4469	0,3529	0,1456	0,0567	0,0413	0,0328
0,05	0,4179	0,3235	0,1040	0,0555	0,0459	0,0328

Tab. 4.3: Ximea MR285MC-BH měřená v závislosti na teplotě čipu.

Naměřený šum v černém snímku - σ_D [ADU]						
Expozice [s]	Teplota při měření [°C]					
	33	25	20	16	14	11
1	16,4503	14,8434	13,0079	11,1502	10,5840	7,2306
0,5	12,7461	7,5768	8,1437	7,5832	7,1321	5,9440
0,25	8,1480	6,0102	6,2166	6,0869	5,9449	5,5700
0,125	6,1280	5,8181	5,6560	5,5780	5,5653	5,4793
0,1	6,0020	5,7725	5,6560	5,5937	5,5417	5,4738
0,05	5,7979	5,6238	5,5572	5,5251	5,4965	5,4686
Přepočteno na procentuální šum - $\sigma\%$ [%]						
Expozice [s]	Teplota při měření [°C]					
	33	25	20	16	14	11
1	0,10041	0,09060	0,07940	0,06806	0,06460	0,04413
0,5	0,07780	0,04625	0,04971	0,04629	0,04353	0,03628
0,25	0,04973	0,03669	0,03795	0,03715	0,03629	0,03400
0,125	0,03740	0,03551	0,03452	0,03405	0,03397	0,03345
0,1	0,36649	0,03523	0,03452	0,03414	0,03383	0,03341
0,05	0,03539	0,03433	0,03392	0,03372	0,03355	0,03338
Naměřený šum ve fázi - σ_φ [rad]						
Expozice [s]	Teplota při měření [°C]					
	33	25	20	16	14	11
1	1,00e-3	9,07-4	7,95-4	6,87-4	6,51-4	4,55-4
0,5	7,99-4	6,18-4	5,11-4	4,76-4	4,47-4	3,75-4
0,25	5,12-4	4,23-4	3,91-4	3,82-4	3,74-4	3,51-4
0,125	3,86-4	3,70-4	3,56-4	3,51-4	3,50-4	3,47-4
0,1	3,78-4	3,63-4	3,56-4	3,52-4	3,49-4	3,45-4
0,05	3,66-4	3,55-4	3,51-4	3,49-4	3,47-4	3,45-4
Přepočteno na reálnou výšku ve fázi- σ_φ^h [nm]						
Expozice [s]	Teplota při měření [°C]					
	34	25	20	16	14,3	11
1	0,2069	0,1867	0,1636	0,1402	0,1331	0,0941
0,5	0,1654	0,0983	0,1057	0,0984	0,0925	0,0775
0,25	0,1059	0,0781	0,0808	0,0791	0,0773	0,0726
0,125	0,0798	0,0758	0,0737	0,0727	0,0725	0,0718
0,1	0,0781	0,0751	0,0736	0,0728	0,0721	0,0715
0,05	0,0758	0,0735	0,0727	0,0722	0,0719	0,0714

Tab. 4.4: Výsledky kamer s hodnotou 12 bitů.

Naměřený šum v černém snímku - σ_D [ADU]						
Expozice [s]	Sony $\alpha\alpha 5000$	Jenoptik ProgRes-MF	Ximea MA85	Ximea MR285MC-BH	Basler (při 34°C) acA2048-180km	Basler (při 11°C) acA2048-180km
1	0,9404	36,3865	837,5516	5,1985	15,1197	1,7466
0,5	0,6961	12,9473	819,6006	3,1943	11,2771	0,7869
0,25	0,6912	12,7275	808,625	2,0057	8,2386	0,3929
0,125	0,6976	9,9369	803,046	1,5847	7,3281	0,3276
0,1	0,6713	9,4892	802,3087	1,5366	7,2725	0,2936
0,05	0,6704	8,7729	833,0071	1,4806	6,9592	0,2531
Přepočteno na procentuální šum - $\sigma_\%$ [%]						
Expozice [s]	Sony $\alpha\alpha 5000$	Jenoptik ProgRes-MF	Ximea MA85	Ximea MR285MC-BH	Basler (při 34°C) acA2048-180km	Basler (při 11°C) acA2048-180km
1	0,02296	0,22210	1,27802	0,12695	0,36922	0,04265
0,5	0,01700	0,07903	1,25063	0,07800	0,27539	0,01922
0,25	0,01688	0,07769	1,23388	0,04898	0,20119	0,00959
0,125	0,01704	0,06065	1,22537	0,03870	0,17895	0,00800
0,1	0,01639	0,05792	1,22424	0,03752	0,17759	0,00717
0,05	0,01637	0,05355	1,27109	0,03616	0,16994	0,00618
Naměřený šum ve fázi - σ_φ [rad]						
Expozice [s]	Sony $\alpha\alpha 5000$	Jenoptik ProgRes-MF	Ximea MA85	Ximea MR285MC-BH	Basler (při 34°C) acA2048-180km	Basler (při 11°C) acA2048-180km
1	2,91e-4	2,00e-3	1,30e-2	1,00e-3	4,80e-3	4,64e-4
0,5	2,35e-4	8,26e-4	1,30e-2	8,18e-4	3,84e-3	2,54e-4
0,25	2,35e-4	8,14e-4	1,20e-2	5,28e-4	2,61e-3	1,85e-4
0,125	2,36e-4	6,44e-4	1,20e-2	4,29e-4	2,38e-3	1,74e-4
0,1	2,31e-4	6,14e-4	1,20e-2	4,16e-4	2,16e-3	1,67e-4
0,05	2,31e-4	5,73e-4	1,30e-2	4,04e-4	2,02e-3	1,59e-4
Přepočteno na reálnou výšku ve fázi- σ_φ^h [nm]						
Expozice [s]	Sony $\alpha\alpha 5000$	Jenoptik ProgRes-MF	Ximea MA85	Ximea MR285MC-BH	Basler (při 34°C) acA2048-180km	Basler (při 11°C) acA2048-180km
1	0,0603	0,4138	2,6897	0,2069	0,9932	0,0959
0,5	0,0487	0,1709	2,6897	0,1692	0,7946	0,0524
0,25	0,0485	0,1683	2,4828	0,1093	0,5392	0,0383
0,125	0,0488	0,1332	2,4828	0,0887	0,4916	0,0359
0,1	0,0479	0,1270	2,4828	0,0861	0,4469	0,0346
0,05	0,0478	0,1185	2,6897	0,0835	0,4179	0,0328

Tab. 4.5: Výsledky kamer s hodnotou 14 bitů.

Naměřený šum v černém snímku - σ_D [ADU]			
Expozice [s]	Nikon D810	Ximea (při 33°C) MR285MC-BH	Ximea (při 11°C) MR285MC-BH
1	1,2915	16,4503	7,2306
0,5	1,3162	12,7461	5,9440
0,25	1,3473	8,148	5,5700
0,125	1,6039	6,1280	5,4793
0,1	1,5969	6,002	5,4738
0,05	1,5898	5,7979	5,4686
Přepočteno na procentuální šum - $\sigma_\%$ [%]			
Expozice [s]	Nikon D810	Ximea (při 33°C) MR285MC-BH	Ximea (při 11°C) MR285MC-BH
1	0,00788	0,10041	0,04413
0,5	0,00803	0,07780	0,03628
0,25	0,00822	0,04973	0,03400
0,125	0,00979	0,03740	0,03345
0,1	0,00975	0,03664	0,03341
0,05	0,00970	0,03539	0,03338
Naměřený šum ve fázi - σ_φ [rad]			
Expozice [s]	Nikon D810	Ximea (při 33°C) MR285MC-BH	Ximea (při 11°C) MR285MC-BH
1	1,10e-4	1,00e-3	4,55e-4
0,5	9,22e-5	7,99e-4	3,75e-4
0,25	9,39e-5	5,12e-4	3,51e-4
0,125	1,09e-4	3,86e-4	3,47e-4
0,1	1,08e-4	3,78e-4	3,46e-4
0,05	1,08e-4	3,66e-4	3,45e-4
Přepočteno na reálnou výšku ve fázi- σ_φ^h [nm]			
Expozice [s]	Nikon D810	Ximea (při 33°C) MR285MC-BH	Ximea (při 11°C) MR285MC-BH
1	0,0227	0,2069	0,0941
0,5	0,0191	0,1654	0,0775
0,25	0,0194	0,1059	0,0726
0,125	0,0224	0,0798	0,0718
0,1	0,0223	0,0781	0,0715
0,05	0,0223	0,0758	0,0714

5 KONSTRUKCE CHLAZENÍ KAMERY BASLER ACA2040-180KM

Z výsledků předchozích měření jsem vyhodnotil kameru Basler aca2040-180km při dostatečném chlazení jako nejvhodnější z testovaných zařízení. Tato kamera by zároveň měla být použita při testování v ústavem nově vyvíjenem fluorescenčním holografickém mikroskopu jako detektor. Proto následující části této práce jsou zaměřeny na návrh konstrukce, sestavení a testování chlazení této kamery.

Způsob chlazení

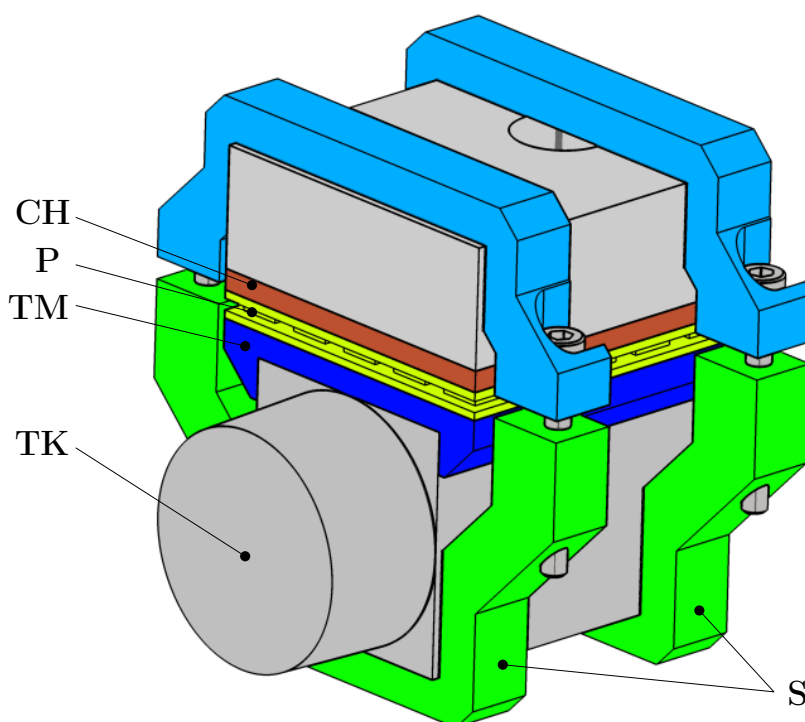
Efektivní chlazení kamery spočívá v chlazení snímacího senzoru kamery, jelikož zde můžeme nejvíce potlačit termální šum.

Velmi účinným chlazením je použití peltierova článku, kterého jsem využil již v předchozím měření černých snímků, a je stručně popsáno v odstavci 4.5. Toto zařízení je velmi efektivní, jelikož úroveň chlazení je přímo ovládaná řídicím napětím. Avšak při použití samostatného peltierova článku nastává problém, že je nutné nahromaděné teplo odvádět z teplé strany článku pryč. To je možné aktivním chlazením (pasivní kovový chladič s ventilátorem, jaký jsem také použil v předchozím měření). Ovšem při potřebě dosažení teplot nižších 10 °C po dobu delší než přibližně 1 minuty, nebylo možné produkované teplo peltierovým článkem dostatečně odvádět.

Další úskalí je, že rotor větráku vytváří určitou úroveň vibrací. V případě, kdy ventilátor je připevněn přímo k chladiči, a tedy i kameře, jsou vibrace nežádoucí. Proto jsem zvážil využití jiného typu chlazení a to na principu proudění kapaliny - vodní chlazení.

5.1 Návrh konstrukce vodního chlazení

Primární chlazení čipu kamery je tvořeno peltierovým článkem P o velikosti plochy $40 \times 40 \text{ mm}^2$. Pro odvod tepla z primárního členu jsem navrhnul blok vodního chlazení CH o stejné ploše. Chladicí strana peltierova článku P je přiložena k tělu kamery TK pomocí tepelného mostu TM, díky kterého je spojena větší plocha těla kamery s chladičem. Tímto způsobem je ochlazován CMOS čip (i integrované obvody kamery). Pro lepší tepelnou vodivost jsou veškeré styčné plochy pokryty tenkým filmem tepovodivé pasty. Vše je upevněno a staženo dvěma plastovými svorkami S.



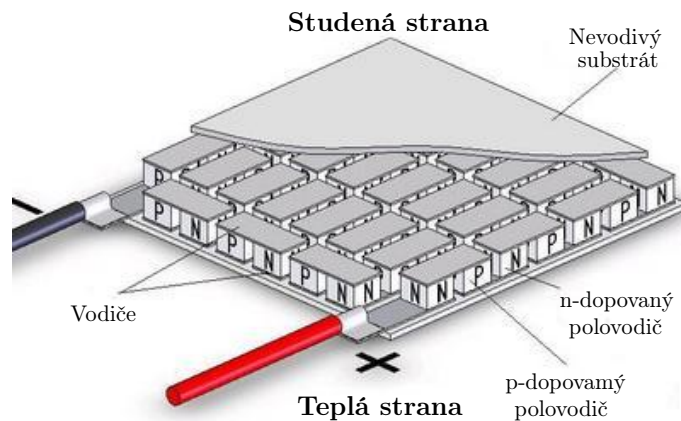
Obr. 5.1: Sestavené chlazení kamery. Tělo kamery TK, tepelný most TM, peltierův článek P, chladič blok CH, svorky S.

Následující text je rozdělen do několika částí popisujících jednotlivé díly chlazení.

- Peltierův článek
- Vodní chlazení
- Tepelný most
- Tělo kamery
- Svorky

5.1.1 Peltierův článek - Termoelektrický chladič

Moderní termoelektrické články jsou tvořeny mnoha do série zapojených peltierových článků. V takovýchto zařízeních se jako materiály používají N a P dotované polovodiče propojené měděnými kontakty. Ty bývají zakryty nevodivou vrstvou Al_2O_3 , která ovšem dobře vede teplo. Takto do série poskládané články mají větší účinnou plochu a jsou i robustní. Na obrázku 5.2 je takový článek popsán. Princip tohoto zařízení je popsán v kapitole 3.



Obr. 5.2: Chladič složený z mnoha do série spojených peltierových článků. Vše je skryto dielektrickým materiálem, který zároveň slouží jako odvod tepla (studená strana) a vývod tepla (teplá strana). Převzato a upraveno z [40].

V experimentu s chlazením rychlostní kamery acA2040-180km firmy BASLER jsem použil peltierova článku s označením TEC1-12710 (ThermoElectric Cooler) firmy Hebei I.T. (Shanghai) Co., Ltd (viz příloha). Ten je stavěn na maximální proud $I_{max} = 10,5 \text{ A}$ a napětí $U_{max} = 17,4 \text{ V}$. Tyto údaje se uvádí právě kvůli maximální teploty, které při překročení by došlo k poškození článku. Ta je v případě použitého článku $T_{max} = 138 \text{ }^\circ\text{C}$ kvůli použitému materiálu BiSn (Bismuth Tin), který se při této teplotě začíná tavit, a tím by se chladič znehodnotil [41].

5.1.2 Vodní chlazení

Základní myšlenkou je proudění kapaliny okolo chladiče, přijmutí jeho tepla a odvedení jej na jiné místo. To je nejčastěji provedeno cirkulací kapaliny, která z povrchu teplejšího chladiče tepelným vedením mezi povrchem chladiče a kapalinou, přijme

teplo a následně jej předá jinému chladnějším tělesu. Tento jev je mnohokrát opakován právě cirkulací kapaliny pomocí čerpadla, a proto může být odvedení tepla z daného místa velmi efektivním.

Použití vodního chlazení je v dnešní době velmi rozšířeno v chlazení komponent stolních počítačů (např. procesor, grafická karta, RAM). Právě možnost efektivně odvádět teplo z potřebných míst pomocí systému vodního chlazení, které se skládá z chladících bloků, hadiček, pumpy, radiátoru (součást oběhu, kde se kapalina ochlazuje a předává teplo okolí) a expanzní nádoby.

Chladící blok

Návrh a konstrukce chladícího bloku vodního chlazení, což je součást, která se plochou přímo dotýká chlazeného předmětu, byla odvozena od rozměrů použitého peltierova článku ($40 \times 40 \text{ mm}^2$), od kterého má odebírat produkované teplo.

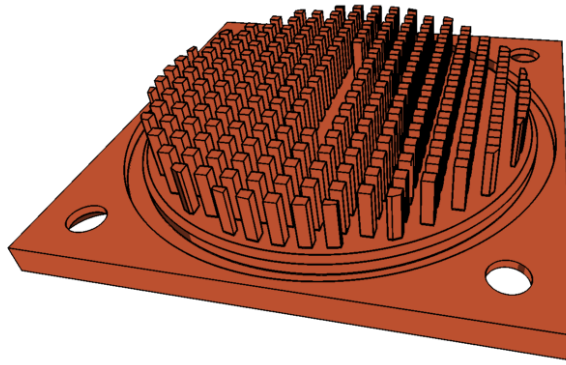
Pro lepší odvádění tepla z bloku chladiče na protékající kapalinu je povrch chladiče, který je s kapalinou v kontaktu, výrazně zvětšen. To je provedeno vyfrézováním mnoha kolíků čtvercového profilu $1 \times 1 \text{ mm}^2$ a výškou 4 mm. Tyto kolíky jsou od sebe vzdáleny 1 mm v ose x i y . Jejich výšku 4 mm jsme určili podle úvahy, kdy hodnota průřezu v nejužším místě chladiče by měla odpovídat průřezu vstupní i výstupní hadice, to je $50,26 \text{ mm}^2$ (průměr hadice je 8 mm). Vytvoříme-li pomyslnou rovinu v nejužším místě chladiče (střed), budeme mít 12 štěrbin o šířce 1 mm, kterými v této rovině může kapalina protékat. Proto, abychom se přiblížili hodnotě průřezu přítoku a odtoku, zvolili jsem výšku kolíků 4 mm. Tím jsme dosáhli v nejužším místě chladiče průřezu 48 mm^2 . Tedy z původní plochy $855,3 \text{ mm}^2$ jsme pomocí 214 kolíků vytvořili plochu velikou $4233,86 \text{ mm}^2$, což je 4,95 násobek původní hodnoty.

Na obrázku 5.3 lze vidět strukturu kolíků. Uprostřed tohoto chladiče je mezera, která je určena přepážce vsazené do protikusu (krytu). Ta zabraňuje přímému průtoku a nutí kapalinu proudit okolo co nejvíce kolíků takovým způsobem, aby byla ve styku s největší možnou plochou, a tím odebírala z chladiče více tepla.

Tato přepážka i struktura kolíků jsou navrženy tak, aby bylo možné chladič za daných podmínek vyrobit, ale také aby proudící kapalina neměla při průtoku ustálený laminární průběh. To by mělo být díky tvaru a umístění přepážky i kolíků splněno. Takto proudící kapalina by se v okolí každého z kolíků měla díky turbulencím proudění promíchávat a tím lépe odebírat teplo z chladiče.

Na spodní části chladiče (styčná plocha s peltierovým článkem) je navržena drážka pro uložení teplotního čidla, které může měřit teplotu uprostřed teplé strany peltierova článku.

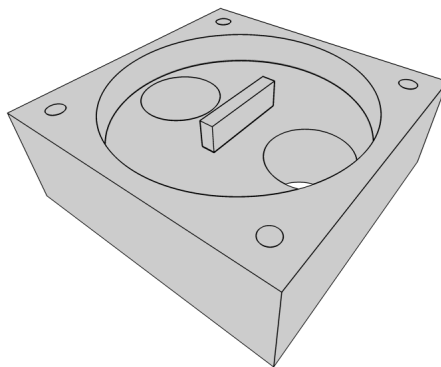
K výrobě byla vybrána měď E-Cu57 (DIN 2.0060), která má nejvyšší tepelnou vodivost $386 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.



Obr. 5.3: Tělo chladícího bloku.

Kryt chladícího bloku

Pro uzavření prostoru okolo kolíků na těle chladícího bloku byl navržen kryt chladiče. V něm je vytvořena výše zmiňovaná přepážka, která slouží k zabránění přímému průtoku kapaliny chladičem, a tím zvětšení plochy, odkud je efektivně odebíráno teplo. Kryt je vyroben z průhledného materiálu polymethylmethakrylát (PMMA). Spojení s chladičem je zajištěno čtyřmi šrouby se závitem v krytu chladiče. Utěsnění mezery mezi krytem a chladičem je provedeno o-kroužkem z nitrilového kaučuku, který je z části zapuštěn v drážce v těle chladiče a z druhé strany přitlačen krytem chladiče. Pro připojení přívodu a odvodu chladící kapaliny jsou navrženy dva závity G1/4.



Obr. 5.4: Kryt těla chladícího bloku.

5.1.3 Tepelný most

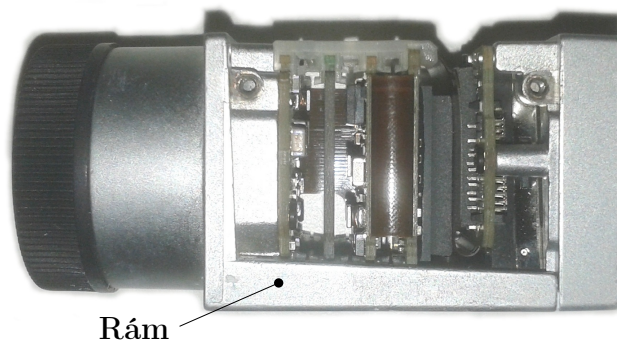
Tato část je vytvořena pro lepší tepelný kontakt chladicí strany Peltierova článku a těla kamery. Použitím této tepelné spojky můžeme využít celou plochu Peltierova článku, protože bez ní by bylo využito pouze 72,5 % z celé plochy. Zároveň tato součástka těsně obklopuje tělo kamery a tím z něj může lépe odebírat teplo.

Na vrchní části chladiče (styčná plocha s peltierovým článkem) je navržena drážka pro uložení teplotního čidla, které může měřit teplotu uprostřed chladné strany peltierova článku.

Z dostupných materiálů k výrobě byla vybrána měď E-Cu57 (DIN 2.0060).

5.1.4 Tělo kamery

Chlazeným objektem je tělo kamery Basler aca2040-180km. Takto označujeme rám kamery, který je odlit ze slitiny hliníku, a je hlavním (nosným, oporným, konstrukčním) prvkem celé stavby kamery viz obr. 5.5.



Obr. 5.5: Boční pohled na rám a uložení vnitřních částí kamery Basler aca2040-180km. Zadní část těla kamery (na obrázku vpravo) pro připojení datových kabelů Camera link k počítači.

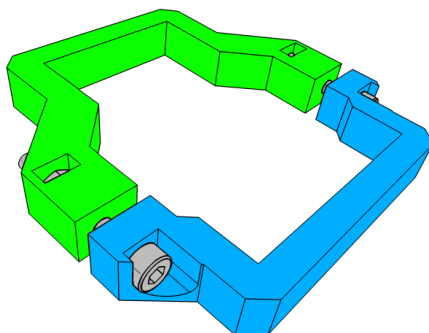
Tento rám slouží hlavně jako uchování a uchycení CMOS čipu a integrovaných obvodů kamery (pro zpracovávání obrazu, digitalizace a jiné). Z konstrukčního hlediska je v ose CMOS čipu objektivový závit C-mount a také má ze spodní strany závity pro upevnění ke stativu.

Chlazení čipu

K odvádění tepla z CMOS čipu je použito právě tělo kamery, které je čipu nejbližší. Zároveň spodní strana (kde jsou uloženy závity pro připevnění ke stativu) je dostatečně velkou rovinnou plochou pro přiložení chladiče (s tepelným mostem).

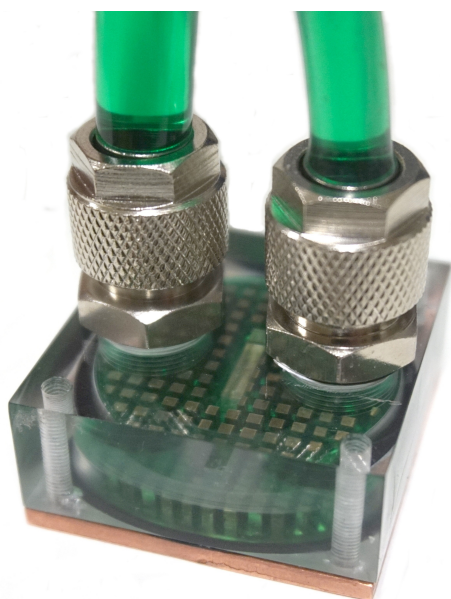
Pro upevnění všech částí chlazení (vodního bloku, peltierova článku a tepelného mostu) ke kameře byly vyrobeny pomocí 3D tisku dvě svorky. Jsou navrženy a složeny ze dvou kusů, které stahují všechny části k sobě a zároveň je udržují v požadované poloze. Tyto svorky jsou přitaženy každá dvěma šrouby s matkami.

Svorky byly vytisknuty na 3D tiskárně z bioplastu PLA (kyselina polymléčná), který má teplotu tavení 180°C. Rovina tisku výrobku byla nastavena podle roviny, ve které jsou svorky vystaveny silám při stažení šrouby, z důvodu, že pevnost ve směrech roviny je mnohokrát větší, než kolmo na ni. To je způsobeno izomorfními vlastnostmi součástky při výrobě.



Obr. 5.6: Svorky složené z dvou částí stažených šrouby.

5.2 Sestavení vodního chlazení



Obr. 5.7: Navržený chladicí blok připojený k okruhu vodního chlazení.

Z návrhu v předchozí sekci textu byly vyrobeny jednotlivé části chlazení (chladicí blok, tepelný most a svorky) dle výkresové dokumentace obsažené v příloze.

Oběh vodního chlazení se skládá z:

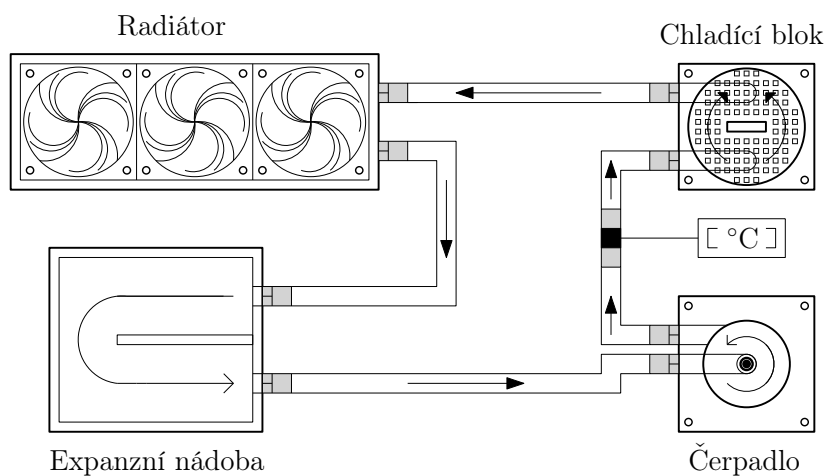
- navržený chladicí blok (viz obrázek 5.7)
- čerpadlo *LAING DDC-1T plus* s přidáním krytem *Alphacool Laing DDC Plexi*
- radiátor *Alphacool NexXoS PRO III rev2* osazen třemi 120mm ventilátory *ARCTIC F12 120mm*.
- expanzní nádoba *Alphacool Repack Dual Bayres 5,25"Clear*
- průtokový teploměr *Alphacool In-Line thermometer* s LCD displejem

Ke všem součástem obvodu chlazení jsou přimontovány kovové *fitinky*¹ se závitem G1/4 a jsou propojeny pružnými hadičkami z polyuretanu (PUR) o vnějším/vnitřním průměru 10/8 mm, které zároveň tlumí případné vibrace mezi jednotlivými částmi oběhu.

Jako chladicí kapalina je použita *Aqua Computer Double Protect Ultra*, založena na bázi eltylen-glykolu, která dobře přenáší teplo a ochraňuje kovové části před korozi.

¹Fitink je slangový název pro koncový šroub se závitem a redukcí pro hadice.

Oběh vodního chlazení (čerpadlo a ventilátory) je napájen zdrojem o výstupním napětí 12 a 5 V s redukcí MOLEX.



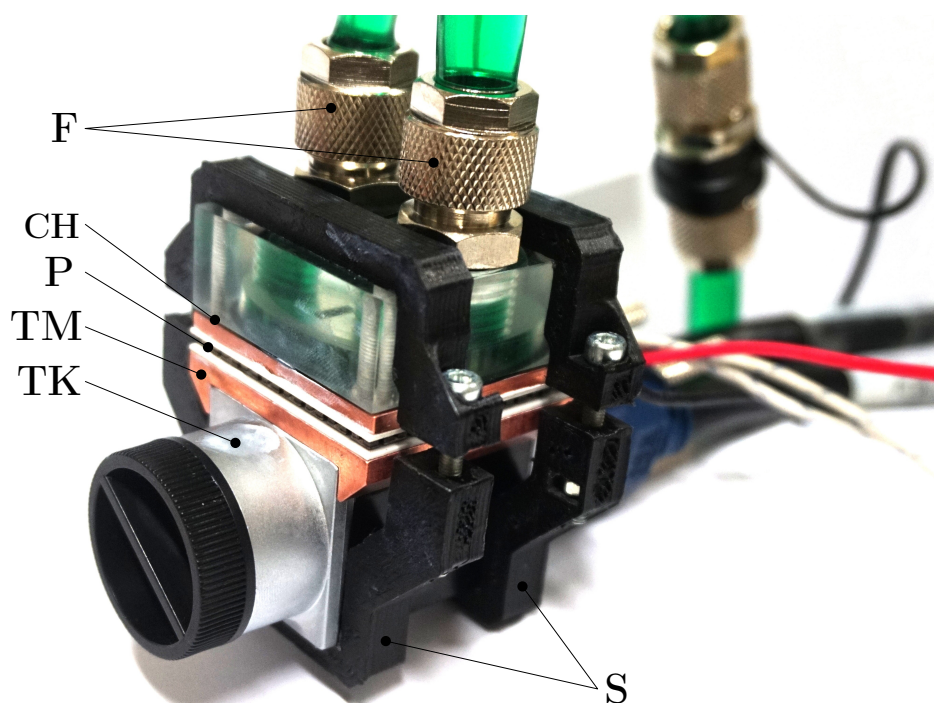
Obr. 5.8: Schéma oběhu vodního chlazení. Šipky označují směr toku chladicí kapaliny. Znak °C označuje LCD displej průtokového teploměru.

Chladicí blok je propojen k ostatním částem systému delšími hadicemi a to o délce 1 m. To dovoluje uložit ostatní části systému na oddělené místo, a tak i separovat od vibrací čerpadla a ventilátorů připojených k radiátoru.

5.3 Sestavení chlazení kamery Basler acA2040-180km

Navržené a vyrobené komponenty spolu s peltierovým článkem (primární chlazení) a systémem oběhu vodního chlazení (sekundární chlazení) byly spojeny v jeden celek - chlazení kamery Basler acA2040-180km, viz 5.9.

Kontaktní plochy mezi tělem kamer TK, tepelným mostem TM, peltierovým článkem P a chladícím blokem CH jsou pokryty tenkou vrstvou teplovodivé pasty, která zvyšuje kvalitu kontaktu styčných ploch, a tím i prostup tepla. Pro následná sledování teploty peltierova článku během testování byla do předem připravených drážek v těle chladícího bloku CH a tepelného mostu TM vložena teplotní čidla.



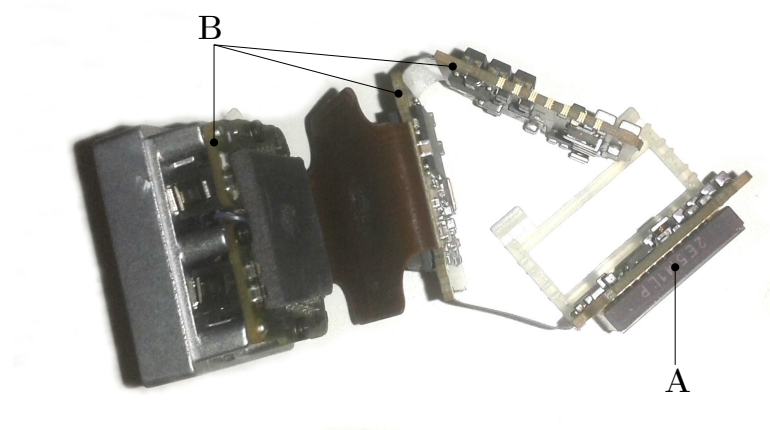
Obr. 5.9: Kamera Basler acA2040-180km chlazená kombinací peltierova článku a vodního chlazení. Teplo je z těla kamerykamery TK odebíráno přes tepelný most TM k peltierovu článku P a chladícímu bloku CH, odkud je kapalinou odváděno do okruhu vodního chlazení přívodem a odvodem kapaliny F. Vše je staženo k sobě dvěma svorkami S.

5.4 Návrh přímého chlazení čipu

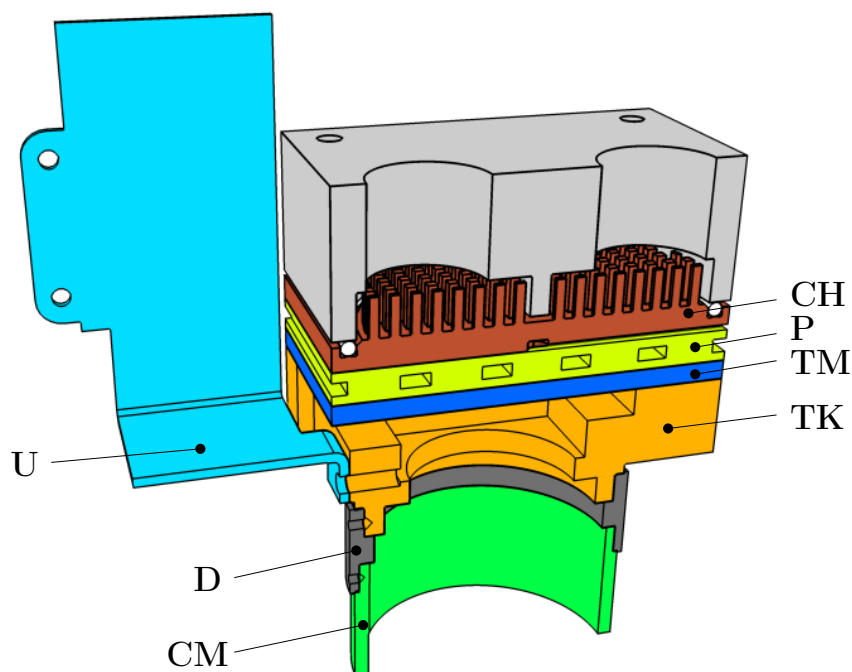
Pro přímé chlazení čipu kamery je nutné přejít k návrhu, kdy je snímací čip se všemi obvody vyjmut z těla kamery. Jelikož je možné s určitým omezením (díky pružným kontaktům) přeskupit vnitřní části kamery od plošného spoje, kde je uložen CMOS čip viz obrázek 5.10.

Pro tyto možné změny v uspořádání vnitřních částí kamery jsem navrhnul konstrukci těla kamery TK, které přímo obklopuje snímací čip. Ten je mnohem blíže chladiči, a tím z něj odvádí teplo ještě účinněji. K chlazení čipu je použit stejný systém, jako v návrhu bez úpravy kamery. Tedy peltierův článek P chlazený blokem CH s vodním chlazením.

Usazení čipu v těle kamery je těsné tak, aby plochy těla kamery doléhaly ze všech čtyř stran na plochy CMOS čipu kamery. Tím je dosažena i osová symetrie středové osy objektivu, objímky těla kamery a středové osy čipu kamery. Zbytek vnitřních součástí kamery (na obrázku 5.10 s označením B) je uchycen mimo chlazenou část na uchycení U , který je k tělu TK přišroubován.



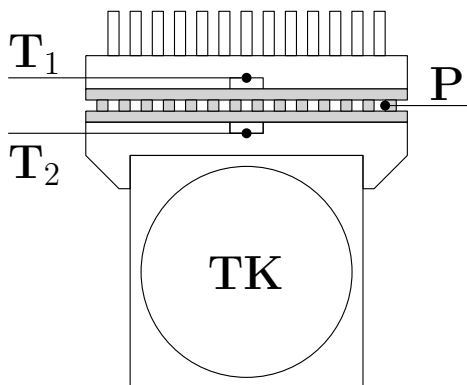
Obr. 5.10: Vyjmuté vnitřní části kamery z těla kamery. V pravé části obrázku lze vidět plošný spoj s CMOS čipem A. V levé části obrázku je zadní část kamery B, kde jsou konektory pro připojení k počítači.



Obr. 5.11: Řez návrhem přímého chlazení čipu pro kameru Basler acA2040-180km. Chlazený CMOS čip A je uložen v těle kamery TK a zadní část kamery B je vyvedena mimo chlazenou část a upevněna na uchycení U. Chlazení je provedeno stejným způsobem jako v předchozím návrhu. Peltierův článek P chlazený chladícím blokem CH odvádí teplo vedené tepelným mostem TM z těla kamery TK. Celý systém kamery může být připojen k dalšímu zařízení pomocí spojky CM s objektivovým závitem typu C-mount, která je tepelně izolována od těla kamery TK distanční podložkou D.

6 TESTOVÁNÍ CHLAZENÍ KAMERY

Sestavené chlazení spojené s kamerou Basler acA2040-180km bylo testováno z pohledu stability teploty kamery při dlouhodobé zátěži a možné úrovně chlazení. Měření teploty bylo provedeno dvěma teplotními čidly T_1 a T_2 , připojenými k multimetru. Ta byla uložena v drážkách, v blízkosti teplé a studené strany peltierova článku P viz obrázek 6.1.



Obr. 6.1: Schéma chlazení kamery s vyznačenými teplotními čidly T_1 v drážce chladičského bloku a T_2 v drážce tepelného mostu. P vyznačuje peltierův článek a TK tělo kamery.

Test dlouhodobé zátěže

Po dobu dvou hodin byla kamera v provozu při rychlosti snímání 38 snímků za vteřinu. Nevyužití chlazení by vedlo k zahřívání a vystoupaní teploty až k možným $50\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Před začátkem testu bylo zapnuto sekundární chlazení (oběh vodního chlazení), které mělo teplotu kapaliny $27\text{ }^{\circ}\text{C}$. Při spuštění záznamu obrazu kamerou byl patrný nárůst teploty na obou tepelných čidlech a to na úroveň $25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Při zapnutí primárního chlazení (peltierův článek) a nastavení procházejícího proudu na $1,5\text{ A}$ a napětí $2,7\text{ V}$ byl patrný okamžitý pokles teploty na čidlo T_2 . Tento pokles se ustálil po době jedné minuty na teplotu $7,8\text{ }^{\circ}\text{C}$. Teplota na čidlo T_1 ukazovala stále hodnotu $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ a méně. Teplota kapaliny se pohybovala po celou dobu testu okolo $27\text{ }^{\circ}\text{C}$.

V průběhu testu nebyly zaznamenány žádné výkyvy měřených teplot, a tedy lze prohlásit, že systém chlazení je stabilní.

Test úrovně chlazení

Tento test je určen ke stanovení nejnižší teploty, na kterou je možné se klesnout a stabilně udržet. Postupným zvyšováním výkonu peltierova článku bylo bez obtíží dosaženo na čidlo T_2 teploty $0\text{ }^\circ\text{C}$, a to při proudu $2,5\text{ A}$ a napětí $4,3\text{ V}$.

Při teplotě $11\text{ }^\circ\text{C}$ bylo dosaženo (za dané vlhkosti a teploty okolí) rosného bodu, kdy na povrchu chladiče i pláště kamery začala kondenzovat vzdušná vlhkost. Při dalším snižování teploty bylo orosení více patrné. Z důvodu obavy o funkčnost kamery nebyla teplota dále snižována. Pro kontrolu bylo sejmuto krycí víčko senzoru kamery, zda není také pokryt zkondenzovanou vodou. Při bližším ohledání voda na senzoru nebyla. Proto bylo dalším teplotním čidlem změřena teplota snímacího senzoru. Přestože čidlo T_2 zaznamenávalo teplotu $0\text{ }^\circ\text{C}$, teplota senzoru se pohybovala okolo $15\text{ }^\circ\text{C}$.

Výsledek testu je dvojnásobný. Za úspěšnou lze považovat část, kdy systém chlazení bez obtíží zvládá zchladit kameru za provozu i na nižší teploty. Méně úspěšným je zjištění, že chladič nemůže efektivně odvádět teplo za provozu přímo z čipu kamery, která se takto i přes nižší teplotě peltierova článku udržuje na vyšší hodnotě. K odstranění tohoto nedostatku je nutno použít přímé chlazení navržené v oddílu 5.4.

Měření černých snímků

Během testu úrovně chlazení byla nasnímána série černých snímků při teplotě tepelného čidla $T_2\text{ }0\text{ }^\circ\text{C}$. Ty byly zpracovány a vyhodnoceny dle postupu popsaném v kapitole 4. Hodnoty měření jsou uvedeny v tabulce 6.1.

Výsledky těchto snímků vykazují ještě nižší hodnoty směrodatné odchylky šumu ve fázi σ_φ než bylo naměřeno v předchozích měřeních, a to o řád. Je tedy možné říci, že navržený systém chlazení je funkční.

Tab. 6.1: Výsledky chlazení kamery Basler acA2040-180km při teplotě chladiče 0 °C a k porovnání při teplotě 34 °C.

Expozice [s]	σ_D [ADU]	$\sigma_{\%}$ [%]	σ_{φ} [rad]	σ_{φ}^h [nm]
Při teplotě 0 °C (nové měření)				
1	0,4858	0,01186	3,70e-4	0,0766
0,5	0,1598	0,00390	2,38-4	0,0493
0,25	0,0628	0,00153	1,58-4	0,0328
0,125	0,0434	0,00106	1,33-4	0,0274
0,1	0,0399	0,00097	1,27-4	0,0263
0,05	0,0410	0,00100	1,29-4	0,0267
Při teplotě 34 °C (původní měření)				
1	15,1197	0,36922	4,80e-3	0,9932
0,5	11,2771	0,27539	3,84e-3	0,7946
0,25	8,2386	0,20119	2,61e-3	0,5392
0,125	7,3281	0,17895	2,38e-3	0,4916
0,1	7,2725	0,17759	2,16e-3	0,4469
0,05	6,9592	0,16994	2,02e-3	0,4179

7 ZÁVĚR

Dle vybraných vlastností obrazových sensorů bylo navrženo a provedeno měření dostupných kamer pro vhodnost použití v holografii. Byly nasnímány série černých snímků s ohledem na délku expozice. Tyto snímky byly analyzovány a byly vypočteny hodnoty směrodatné odchylky šumu.

V programu Matlab R2011b byly vytvořeny syntetické hologramy zatížené šumem vypočteným z černých snímků. Tyto hologramy byly zpracovány programem Q-Phase, který z nich fourierovskými metodami vypočítal obrazy intenzity a rekonstruované fáze. Odečtením zpracovaných referenčních snímků od obrazu rekonstruované fáze byla vytvořena kvantitativní fázová zobrazení, z kterých byla vypočtena směrodatná odchylka fáze - porovnávací parametr obrazových sensorů. Ze získaných výsledků byla vyhodnocena jako nejvhodnější pro holografii kamera Basler acA2040-180km.

Pro tuto kameru byl navržen a optimalizován systém chlazení vytvořený z primárního členu, peltierova článku, a sekundárního členu, vodního chlazení. Testováním systému chlazení na kameře Basler acA2040-180km byly zjištěny velmi dobré výsledky jak ve stabilitě systému, tak i úrovni chlazení. Testování také odhalilo nedostatky ve stávajícím řešení chlazení tělem kamery. Ty mohou být odstraněny použitím návrhu konstrukce přímého chlazení obsaženém v této práci.

Z výsledků experimentálního měření a porovnání vybraných vlastností obrazových sensorů byl pro nejvhodnější kameru následně navržen, optimalizován a otestován systém chlazení. Tímto byly splněny cíle bakalářské práce. Pro vylepšení stávajícího systému chlazení je možné použít návrhu pro přímé chlazení, což již ale není obsahem této práce.

LITERATURA

- [1] BHUDARI, M. M. B.; WANG, R.; ZHU, R.; POPESCU, G. *Progress in Optics*, ch. Quantitative Phase Imaging, 133–217. Elsevier (2012).
- [2] ZERNIKE, F. Phase-contrast, a new method for microscopic observation of transparent objects. Part I. *Physica*, 1942, vol. 9, no. 7, pp. 686–698.
- [3] NOMARSKI, G. Differential microinterferometer with polarized waves. *Journal de Physique et Le Radium*, 1955, vol. 16, no. 9, 9S–13S.
- [4] HOFFMAN, R., GROSS, L. Modulation contrast microscope. *Applied Optics*, 1975, vol. 14, no. 5, pp. 1169–1176.
- [5] BORN, M.; WOLF, E. *Principles of optics. 7th ed.* Cambridge: Cambridge university press, 2002. 959 s. ISBN 0-521-478449-2.
- [6] KRUG, W.; LAU, E. An interference microscope for observations in transmitted and vertical illumination. *Annalen der Physik (Leipzig)*, 1951, vol. 8, pp. 329.
- [7] HORN, W. Mikro-interferenz II. *Jahrbuch für Optik und Feinmechanik*, 1958, vol. 3.
- [8] DAVIS, H. G.; WILKINS, M. H. F.; CHAYEN, J.; LA COUR, L. F. The use of the interference microscope to determine dry mass in living cells and as a quantitative cytochemical method. *Quarterly Journal of Microscopical Science*, 95(3), 271-304.
- [9] MALACARA, Zacarias; SERVIN, Manuel. *Interferogram analysis for optical testing*. CRC press, 2005.
- [10] YAMAGUCHI, I.; ZHANG, T. Phase-shifting digital holography, *Optics Letters* 22, 1268-1270 (1997).
- [11] CUCHE, E.; MARQUET, P.; DEPEURSINGE, C. Simultaneous amplitude-contrast and quantitative phase-contrast microscopy by numerical reconstruction of Fresnel off-axis holograms. *Applied Optics*, 1999, vol. 38, no. 34, 6994–7001.
- [12] CHMELÍK, R. Three-dimensional scalar imaging in high-aperture low-coherence interference and holographic microscopes. *Journal of Modern Optics*, 2006, vol. 53, no. 18, s. 2673–2689.
- [13] KOLMAN, P. *Koherencí řízený holografický mikroskop*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 72 s. Vedoucí disertační práce doc. RNDr. Radim Chmelík, Ph.D.

- [14] LEITH, E. N.; UPATNIKES, J. Holography with achromatic-fringe systems, *J. Opt. Soc. Am.* 57, 975–979 (1967).
- [15] SLABÝ, T. *Koherenci řízený holografický mikroskop nové generace*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 91 s. Vedoucí dizertační práce prof. RNDr. Radim Chmelík, Ph.D.
- [16] DOSTAL, Z, et al. Automated alignment method for coherence-controlled holographic microscope. *Journal of Biomedical Optics*, 2015, 20.11: 111215-111215.
- [17] WICKLIFF, G.A. Light Writing: Technology Transfer and Photography to 1845. *Technical Communication Quarterly*, Summer, 2006, vol. 15, no. 3. pp. 293-313 ProQuest Central. ISSN 10572252.
- [18] GRAVES, Robert *Řecké mýty*, 2004, ISBN 80-7309-153-4
- [19] GERNSHEIM, Helmut; GERNSHEIM, Alison *The history of photography: from the camera obscura to the beginning of the modern era*. 1969.
- [20] ROSENBLUM, Naomi *A world history of photography*. New York: Abbeville Press, 1997.
- [21] WALLACE, Kurt F. *Electron beam readout system*. U.S. Patent No 3,317,713, 1967.
- [22] MCCORD, Thomas B.; WESTPHAL, James A. Two-dimensional silicon vidicon astronomical photometer. *Applied optics*, 1972, 11.3: 522-526.
- [23] JANESICK, James R. *Scientific charge-coupled devices*. Bellingham: SPIE press, 2001.
- [24] Boyle, W.S.; SMITH, G.E. Charge coupled semiconductor devices, *Bell System Technical Journal*, 1970, vol. 49, issue 4, pages: 587 - 593.
- [25] SANGSTER, F. L. J.; TEER, K. Bucket-brigade electronics: new possibilities for delay, time-axis conversion, and scanning. *Solid-State Circuits, IEEE Journal of Solid-state Circuits*, 1969, 4.3: 131-136.
- [26] HOLST, Gerard C.; LOMHEIM, Terrence S. *CMOS/CCD sensors and camera systems*. Bellingham: SPIE press, 2011.
- [27] DAVIDHAZY, Andrew. The focal plane shutter artifact in certain digital cameras. In: Andpph.com [online] [cit. 2016-04-31]. Dostupné z: <https://people.rit.edu/andpph/text-focal-plane-artifacts-in-digital-cameras.html>

- [28] OTT, Henry W.; OTT, Henry W. *Noise reduction techniques in electronic systems*. New York: Wiley, 1988.
- [29] DE JONG, Marc. Sub-Poissonian shot noise. *Physics World*, 1996, 22.
- [30] FOWLER, Boyd; GODFREY, Michael D.; MIMS, Steve. Reset noise reduction in capacitive sensors. *Circuits and Systems I: Regular Papers, IEEE Transactions on*, 2006, 53.8: 1658-1669.
- [31] SEGAL, Dvira. Thermoelectric effect in molecular junctions: A tool for revealing transport mechanisms [online] [cit. 2016-05-10]
Phys. Rev. B 72, 165426 (2005), American Physical Society, dostupné z: <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevB.72.165426>.
- [32] DIBNER, B. *Alessandro Volta and the electric battery*. Franklin Watts, 1964.
- [33] HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J.; OBDRŽÁLEK, J.; LENCOVÁ B.; DUB, P. *Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky. část 5, Moderní fyzika*. 1. české vyd., 2. dotisk. V Brně : Praha: Prometheus ; Vysoké učení technické v Brně - Nakladatelství VUTIUM, 2006, vii, 1034-1198, [30] : il. ; 26 cm. ISBN 80-214-1868-0.
- [34] VAN HERWAARDEN, A. W.; SARRO, P. M. *Thermal sensors based on the Seebeck effect*. *Sensors and Actuators*, 1986, 10.3: 321-346.
- [35] REICHL, J.; VŠETIČKA, M. *Encyklopedie fyziky* [online] [cit. 2016-04-23], dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main/article/view/910-seebeckuv-jev> .
- [36] YU, Peter Y.; CARDONA, Manuel. *Fundamentals of semiconductors*. Springer, 2005.
- [37] KENNEDY, Suzanne; OSWALD, Nick (ed.). *PCR Troubleshooting and Optimization: the essential guide*. Horizon Scientific Press, 2011.
- [38] BURROW, Guy M.; GAYLORDo, Thomas K. Multi-beam interference advances and applications: nano-electronics, photonic crystals, metamaterials, subwavelength structures, optical trapping, and biomedical structures, *Micromachines* 2.2 (2011): 221-257.
- [39] FAJMON, Břetislav; RŮŽIČKOVÁ, Irena. *Matematika 3. Skriptum FEKT VUT v Brně*. [PDF], 2005.

- [40] The Renewable Energy Website [online] [cit. 2016-03-11], dostupné z: <http://www.reuk.co.uk/What-is-a-Peltier-Cooler.htm>.
- [41] BRÁZDIL, Marian. *Peltierův článek pro chlazení malých výkonů* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, [Bakalářská práce], 2009. 57 s.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

QPI	<i>quantitative phase imaging</i> - kvantitativní fázové zobrazení
PSI	<i>phase-shifting interferometry</i> - interferometry s řízenou změnou fáze
DHM	digitální holografické mikroskopy
CCHM	<i>coherence-controlled holographic microscope</i> - koherencí řízený holografický mikroskop
LS	zdroj světla
AS	aperturní clona
F	filtr
RL	kolektor
BS	delič svazku
M	zrcadlo
C	kondenzor
SP	vzorek
RO	referenční objekt
O	objektiv
DG	difrakční mřížka
OL	výstupní objektiv
OP	výstupní rovina
D	detektor
LST	<i>large space telescope</i> - velký vesmírný teleskop
NASA	<i>National aeronautics and space administration</i> - národní úřad pro letectví a kosmonautiku
WF/PC I	<i>wide field planetary camera I</i> - širokoúhlá planetární kamera I
JPL	<i>jet propulsion laboratory</i> - laboratoře pro tryskový pohon

CCD	<i>charge-coupled device</i> - zařízení s vázanými náboji
UV	<i>ultra violet</i> - ultra fialové
MBM	<i>magnetic bubble memory</i> - magnetická bublinová paměť
RAM	<i>random acces memory</i> - paměť s přímým přístupem
MOS	<i>metal-oxide-semiconductor</i> - kov-oxid-polovodič
px	pixel
FF	<i>full frame</i> - plný snímek
FT	<i>frame transfer</i> - posun snímku
IT	<i>interline transfer</i> - posun uvnitř sloupců
CMOS	<i>complementary metal-oxide-semiconductor</i> - doplňující se kov-oxid-polovodič
CIS	<i>CMOS imaging sensor</i> - obrazový CMOS senzor
APS	<i>active pixel sensor</i> - senzor s aktivními pixely
A/D	<i>analog to digital</i> -
ERS	<i>electronic rolling shutter</i> - elektronické postupné vyčítání
BI	<i>back-side iluminated</i> - osvětleno ze zadní strany
I	<i>intensified</i> - zesílený
MCP	<i>microchannel plate</i> - mikrokanálová deska
ADU	<i>analog to digital unit</i> - jednotka digitálního převodu
FFT	<i>fast fourier transformation</i> - rychlá fourierova transformace
IFFT	<i>inverse fast fourier transformation</i> - zpětná rychlá fourierova transformace
DSLR	<i>digital single lens reflex</i> - digitální jedno čočková reflexní
DIN	<i>deutche industrie norm</i> - německá výrobní norma
PMMA	polymethylmethacrylát
3D	třídimenzionální
PLA	kyselina polymlečná
PUR	polyuretan

CH	chladící blok	
P	peltierův článek	
TM	tepelný most	
TK	tělo kamery	
S	svorka	
F	fitink	
U	uchycení	
D	distanční podložka	
CM	spojka s objektivovým závitem C-mount	
exp	expozice	[s]
λ	vlnová délka	[m]
	rozlišení	[px]
h	planckova konstanta	[J·s]
ν	frekvence	[hz]
Φ_0	výstupní práce	[eV]
E_k	kinetická energie	[eV]
l	délka	[m]
V_{gate}	napětí brány	[V]
V_1, V_2, V_3	napětí	[V]
	faktor zaplnění	[%]
t	čas	[s]
V_{max}	maximální napětí	[V]
E_{max}	síla dielektrického pole	[V·m ⁻¹]
t_{oxid}	tloušťka oxidu křemičitého	[m]
n_{FE}	počet fotoelektronů	[-]
Q	náboj	[C]

C	kapacita	[F]
$n_{j\acute{a}ma}$	počet elektronů v potencionálové jámě	[-]
q	elementární náboj	[C]
ε_{oxid}	permitivita oxidu křemičitého	[F·m ⁻¹]
A_{gate}	plochy brány	[m ²]
QE	kvantová účinnost	[%]
d	průměr	[m]
$N_{\acute{s}um}$	celkový šum	[e ⁻]
t	teplota	[°C]
DR	dynamický rozsah	[ADU]
b	bitová hloubka	[bit]
U	napětí	[V]
α	seebeckův koeficient	[V·K ⁻¹]
T	teplota	[K]
E_F	fermiho energie	[eV]
ϕ_F	elektrochemický potenciál	[V]
\dot{Q}	tok tepla	[K·m ⁻¹]
Π	peltierův koeficient	[V]
I	proud	[A]
E_G	šířka zakázaného pásu	[eV]
μ	průměrná hodnota	[-]
σ	směrodatná odchylka	[-]
σ_φ	směrodatná odchylka šumu fáze	[rad]
σ_D	směrodatná odchylka šumu	[ADU]
$\sigma\%$	procentuální směrodatná odchylka šumu	[%]
S	maximální hodnota saturovaného snímku	[ADU]

$I_T(x, y)$	matice hodnot syntetického hologramu	[ADU]
$M(x, y)$	matice hodnot šumu	[ADU]
c	využití bitové hloubky	[-]
ξ	úhel pootočení interferenčních proužků	[°]
φ	fázový posun	[rad]
L	šířka periody proužků	[m]
f_c	nosná frekvence	[rad·s ⁻¹]
n	index lomu	[-]
h	výška	[m]
σ_φ^h	směrodatná odchylka šumu výšky ve fázi	[m]
	tepelná vodivost	[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1: Výrobní výkresová dokumentace

Příloha 2: Datasheet TEC1-12710