

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

Petr Páta

Nobelova cena za fyziku 2009

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 55 (2010), No. 1, 12--18

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/141933>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 2010

Institute of Mathematics of the Academy of Sciences of the Czech Republic provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.

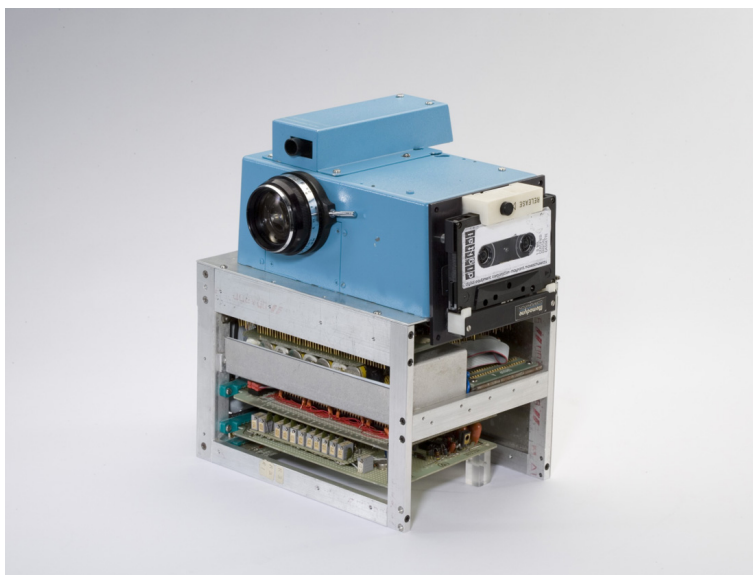


This paper has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://project.dml.cz>

Nobelova cena za fyziku 2009

Petr Páta, Praha

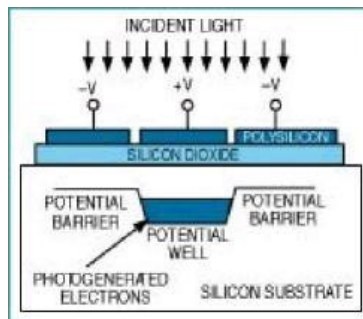
Polovina Nobelovy ceny za fyziku byla v roce 2009 udělena W. S. Boylovi a G. E. Smithovi za objev CCD technologie, která umožnila mohutný rozvoj snímací obrazové techniky a její rozvoj do prakticky všech oblastí našeho života. První pokusy se zobrazením reálné scény probíhaly již ve starověkých kulturách. K zobrazení se využívala tzv. dírková komora (latinsky camera obscura, anglicky pinhole), která má jako objektiv otvor o malém průměru a projekcí vytváří obraz na stínítku přístroje, který není zatížen zkreslením a jinými obrazovými vadami. Znatelnou nevýhodou je ovšem extrémně nízká světelnost a tedy nutnost využívat dlouhé expoziční časy. V současné době se dírkové komory využívá např. k zobrazování v rentgenovém a gama oboru elektromagnetického záření. První pokusy se záznamem latentního obrazu probíhaly v první polovině 19. století. J. Niepce využil v roce 1826 dírkovou kameru (8hodinová expozice) a asfaltový proces k zachycení stálého obrazu. Dále následoval rychlý rozvoj dnes již klasické fotografie. Z mnoha důležitých událostí je možné za mezník vybrat např. objev negativního procesu W. H. F. Talbota (1841). Již v druhé polovině 19. století probíhalo velké množství experimentů vedoucích k zachycení barevného obrazu. Jeden takový přístup založený na interferenci světla byl v roce 1908 oceněn Nobelovou cenou za fyziku (G. Lipman).



Obr. 1. První digitální kamera (fotoaparát) KODAK Vintage 1975 z roku 1975, [6].

Doc. Mgr. PETR PÁTA, Ph.D., Katedra radioelektroniky, FEL ČVUT v Praze.

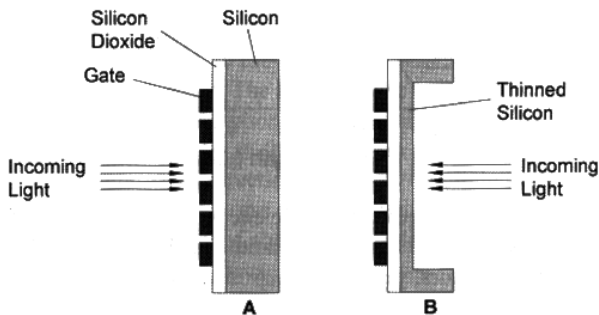
Je pozoruhodné, jak převratné nápady jsou ve svém principu jednoduché. Základní myšlenku CCD snímače formulovali Willard S. Boyle a George E. Smith 17. října 1969 během diskuse trvající zhruba hodinu. Pak stačilo myšlenku pouze realizovat. Tento objev znamenal významný mezník v oblasti obrazové techniky a fotoniky vůbec. Umožnil masivní rozšíření digitálního zpracování obrazu a snímací obrazové techniky do mnoha odvětví vědy a běžného života. První kamera s CCD senzorem byla vyvinuta v roce 1970 v Bellových laboratořích. První fotoaparát využívající tuto technologii si v roce 1972 nechala patentovat firma Texas Instruments. Na konci roku 1975 firma Kodak vyvinula první digitální televizní kameru Vintage 1975 (viz obr. 1), která interpolovaný obraz (100 řádků do televizní normy NTSC) zaznamenávala na magnetofonový pásek. Mezníkem v použití digitálních fotoaparátů bylo zavedení barevného snímání. Ve stejném roce (1975) Bryan Bayer (Kodak) načrtl princip jednočipového barevného snímání obrazu založeného na poli barevných filtrů. Vysoká kvantová účinnost a vhodná spektrální citlivost předurčila CCD senzory k použití ve vědeckých aplikacích, především v astronomii. První použití CCD technologie pro snímání obrazu v astronomii se datuje do roku 1983. Díky této oblasti použití bylo vyvinuto mnoho pokročilých metod zpracování obrazu a technologických vylepšení. Jeden z největších CCD senzorů se v současné době používá pro systém PAN-STARRS (Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System na Havaji). Zde je použita mozaika CCD čipů o celkové velikosti 5 gigapixelů.



Obr. 2. MOS struktura je základem obrazového bodu, pixelu, CCD senzoru, [7].

CCD (Charge-Coupled Device) jsou zařízení postavená na bázi MOS (Metal-Oxide Semiconductor), který se může použít jako světlocitlivý prvek. Oproti klasickým snímacím technikám umožňuje přímé zaznamenávání dopadajícího záření do elektronické podoby. Jsou ve svém principu základním pilířem obrazové fotoniky. CCD technologie využívá vnitřního fotoelektrického jevu. Princip vnějšího fotoelektrického jevu vysvětlil A. Einstein v roce 1905 a v roce 1921 za tento objev získal Nobelovu cenu za fyziku. Základním stavebním kamenem CCD senzoru je obrazový bod (pixel). Na obr. 2 je zobrazen řez jedním obrazovým bodem. V křemíkovém polovodiči, např. typu P, se pomocí přiložených elektrod vytváří charakteristický průběh potenciálu. Pod každým pixelem je vytvořena potenciálová jáma a přiložené elektrody jsou od polovodiče odizolované vrstvou oxidu křemičitého (SiO_2). Po přivedení kladného napětí na tuto elektrodu dojde k odpuzení kladně nabitých nosičů, děr, k druhé elektrodě

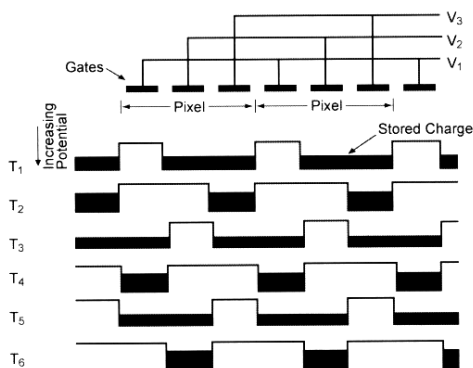
na opačné straně obrazového bodu. Jestliže do této oblasti dopadne foton s energií větší, než je šířka zakázaného pásu, dojde k uvolnění páru elektron-díra. Elektron zůstává zachycen v oblasti potenciálové jámy. Díry jsou naopak odpuzeny směrem k elektrodě na spodní části pixelu. Potenciálová jáma má ovšem omezenou kapacitu a pro typické materiály se pohybuje zhruba na úrovni 1500 elektronů/ μm^2 pro každý pixel. V běžných senzorech se velikost obrazové elementu pohybuje okolo $10 \times 10 \mu\text{m}$. V případě překročení maximální kapacity pixelu dojde k přetečení (tzv. blooming) náboje do okolních obrazových bodů. V případě použití elektronické ochrany proti přetečení náboje se sníží citlivost CCD senzoru. Účinnost přeměny dopadnuvšího fotonu na pár nosičů se nazývá kvantová účinnost a závisí především na vlnové délce dopadajícího záření. Pro typické CCD prvky se pohybuje mezi 40 – 80 % ve viditelné části spektra elektromagnetického záření. Běžné CCD prvky jsou provozovány v režimu, kdy dopadající záření dopadá ve směru kladně nabitě elektrody, které stejně jako izolační vrstva jsou průhledné. Toto uspořádání se označuje jako zřepředu ozářené (front-side illuminated CCD). V případě otočení CCD senzoru zadní stranou směrem k dopadajícímu záření (back-side illuminated CCD) je možné docílit vyšší kvantové účinnosti a efektivnějšího poměru mezi fotocitlivou a ostatní plochou (fill factor) CCD prvku. Hloubka vniku fotonu ovšem závisí na vlnové délce. Ve viditelném oboru elektromagnetického vlnění se pohybuje mezi $0,19 \mu\text{m}$ pro vlnovou délku 400 nm a $16 \mu\text{m}$ pro vlnovou délku 750 nm.



Obr. 3. Srovnání zřepředu (A) a zezadu (B) ozářených CCD prvků, [8].

Z tohoto důvodu ovšem zezadu dopadající fotony mohou vytvořit pár elektron–díra ve velké vzdálenosti od potenciálové jámy. Potom může nastat zpětná rekombinace tohoto páru dříve, než je elektron zachycen v potenciálové jámě. CCD senzory používané v tomto režimu mají proto zadní stranu Si vrstvy ztenčenou na asi $10 \mu\text{m}$ (viz obr. 3). Toto ztenčení s sebou ovšem přináší vyšší nároky na výrobu a pevnost CCD prvku. Zezadu ozářené CCD prvky se proto využívají především ve vědeckých aplikacích, které vyžadují vysokou kvantovou účinnost. Odrazivost Si povrchu je problematická, proto se také využívají speciální antireflexní vrstvy.

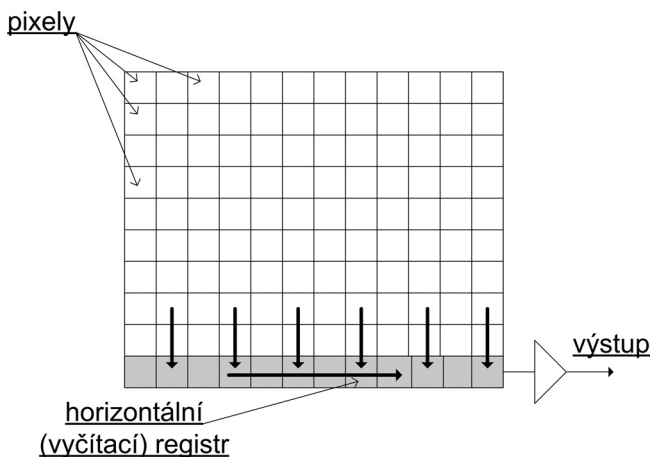
Po skončení expozice je pod každým obrazovým bodem akumulovaný náboj úměrný ozáření pixelu. Nyní je třeba tento náboj odvést z CCD struktury do vyčítacího registru. K přesunu mezi jednotlivými pixely se využívá modelování potenciálu skupinami elektrod. Podle počtu použitých elektrod se toto vyčítání označuje jako dvou-, tří- nebo



Obr. 4. Přesun nábojového balíku ve třífázovém uspořádání CCD prvku, [8].

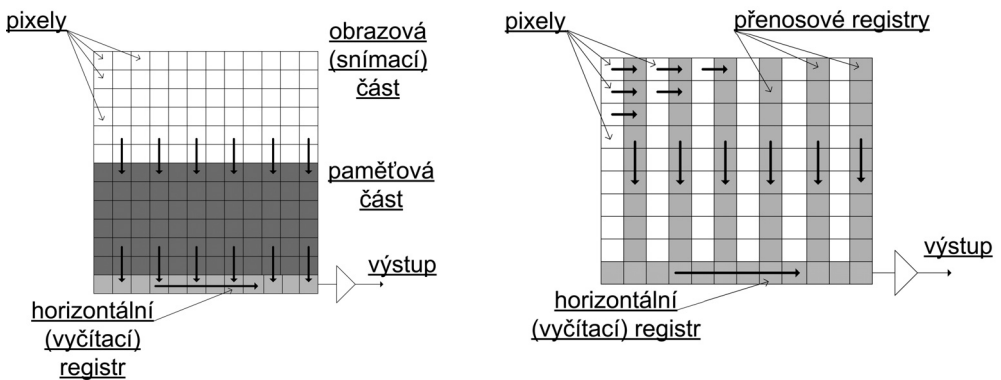
čtyřfázové vyčítání. Na obr. 4 jsou zakresleny jednotlivé kroky přesunu nábojového balíku pro třífázové uspořádání. Celý proces se provede v šesti krocích. Nejprve se omezí šířka potenciálové jámy (krok T_2), která byla připravena v první fázi (T_1). Tak dojde k lokalizaci nosičů náboje pod příslušnou elektrodou. V dalším kroku se opět potenciálová jáma rozšíří (T_3) atd. Stále je třeba dbát na to, aby mezi nábojovými balíky byla dostatečná potenciálová bariéra. Při použití čtyřfázového taktování je třeba k přesunutí náboje osm kroků. U dvoufázové technologie je nezbytné využít technologickou úpravu tloušťky izolační vrstvy SiO_2 , aby nedošlo ke splnutí náboje ze sousedních obrazových bodů. Uvedené přístupy k vyčítání náboje z pixelu se liší rychlostí a dosaženým činitelem plnění (poměr mezi světlocitlivou a celkovou plochou pixelu). Ten je ovlivněn především plochou elektrod vytvářejících nezbytný izolační potenciál mezi pixely.

Základní architektura celého CCD senzoru je na obr. 5. Nábojový balík se postupně přesouvá na okraj CCD struktury do vyčítacího posuvného registru, kde se velikost zachyceného náboje převádí na úroveň elektrického napětí, zesílí a případně digitalizuje.



Obr. 5. Full frame architektura CCD senzoru.

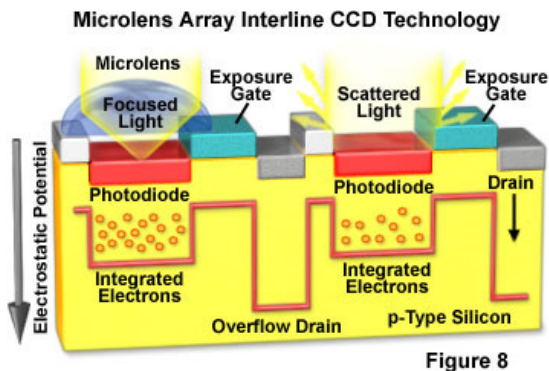
Uspořádání uvedené na obr. 5 se označuje jako full-frame. Tento přístup se využívá především ve vědeckých kamerách. Při jeho použití je třeba počítat s relativně dlouhou dobou nezbytnou k přesunu náboje do vyčítacího registru. Proto se obvykle používá mechanická závěrka, která na dobu vyčítání náboje zamezí dopadu dalších fotonů do struktury, což by vedlo k poškození zachyceného obrazu a jeho rozmazání. Výhodou je naopak vysoký číselný poměr plnění. Obdobné uspořádání je označováno jako frame transfer (obr. 6a). Zde je využita polovina plochy CCD čipu jako aktivní, světlocitlivá, a druhá je zakryta. Ta slouží jako paměťová část. Po expozici se nashromážděný náboj relativně rychle přesune do paměťové části. Z ní se vyčte obdobným způsobem jako u předchozího uspořádání. Nevýhodou jsou především vyšší cena vyplývající z dvojnásobné plochy CCD a nároky na jeho výrobu. V multimediálních aplikacích se obvykle využívá třetí typ konstrukce, označovaný jako interline transfer (obr. 6b). Mezi světlocitlivými sloupci obrazových bodů jsou zakryté pixely, sloužící jako posuvné registry k vyčítání náboje. Po expozici se náboj velice rychle přesune do sousední paměťové části a následně ve vertikálním směru přesune ze CCD struktury. Výhodou interline transfer konstrukce je její vysoká rychlost, která je vhodná především pro televizní a video aplikace. Naopak zřetelným omezením je snížení plnění v horizontálním směru.



Obr. 6. a) frame transfer uspořádání

b) interline transfer uspořádání

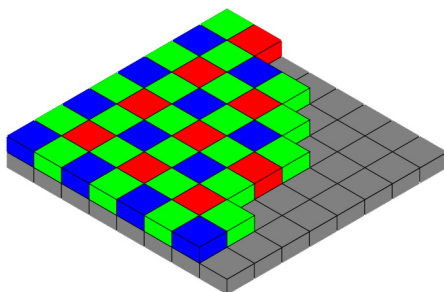
Omezení způsobené snížením plnění je možné částečně eliminovat použitím tzv. mikročoček, které jsou umístěny nad pixely (obr. 7). Tyto optické členy zvýší plochu, ze které vnikají fotony do CCD struktury. Tohoto přístupu se využívá především v digitálních fotoaparátech a prakticky všech video zařízeních s interline přenosem náboje. Dalším důležitým krokem je postup zachycení barevného obrazu. Z hlediska prostorové rozlišovací schopnosti se jeví jako neúčinnější využívat pro každý barevný kanál zvláštní senzor. Toto uspořádání se označuje jako tříčipová CCD (3 CCD) technologie a setkáme se s ní např. u profesionální videotechniky. V ostatních aplikacích a digitálních fotoaparátech se využívá Bayerovo pole barevných filtrů (tzv. CFA – Color Filter Array). V tomto případě se nad pixely umísťují barevné filtry (nejčastěji R, G, B) a každý pixel je určen pro snímání ve zvláštním barevném kanálu (viz obr. 8). Informace o barvě není tedy obsažena v každém bodě digitalizovaného obrazu. Tuto informaci je třeba získat interpolací z okolních obrazových bodů. V případě použití



Obr. 7. Použití mikročočky zvýší činitel plnění CCD prvku, [9].

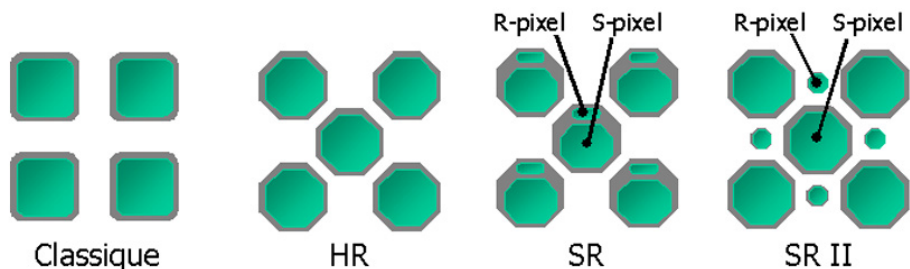
červeného, zeleného a modrého filtru se s největší hustotou používá zelený barevný kanál, který svou spektrální citlivostí je blízký spektrální citlivosti lidského zraku. Oko má v tomto barevném kanálu vysokou prostorovou rozlišovací schopnost.

V devadesátých letech se v obrazové fotonice objevily nové snímací prvky označované jako CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor). V současné době již prakticky nahradily CCD prvky ve spotřební elektronice. Jejich velkou výhodou je nižší cena, menší nároky na spotřebu, nabízejí rychlejší přístup k zaznamenanému obrazu a možnost do obrazových elementů přímo integrovat pomocné elektronické obvody.



Obr. 8. Uspořádání barevných filtrů (CFA) nad CCD senzorem.

Tyto pomocné obvody umožňují provádět jednoduché operace přímo na obrazovém senzoru. Problematická je ovšem neniuniformní citlivost a komplikovaný profil citlivosti obrazových bodů. S tím souvisí zpravidla nižší činitel plnění. Pro uvedené limity se CMOS technologie rozšiřuje do multimediální oblasti. Naopak vědecké aplikace vyžadující vysokou a opakovatelnou přesnost měření zůstávají doménou klasické CCD techniky. Firma FUJI v roce 1999 zavedla nový přístup k CCD sensorům, který využívá osmiúhelníkového tvaru pixelů. Jejich rozložení na tomto typu čipu je zobrazeno na obr. 9. Tento přístup umožňuje dosáhnout vyššího činitele plnění a efektivnějšího využití pole mikročoček. Super CCD nové generace využívají rozdělení osmiúhelníkového obrazového elementu na dva pixely s odlišně nastavenou citlivostí. V nové technologii označované jako Super CCD EXR se navíc využívá vhodného střídání barevných filtrů s výraznějším zastoupením zeleného kanálu. To by mělo vést ke kvalitnějšímu



Obr. 9. Osmiúhelníkové pixely senzoru SuperCCD (FUJI). Postupně klasické čtvercové, osmiúhelníkové pixely a super CCD I. a II. generace využívající dva pixely s různou citlivostí v rámci jednoho obrazového elementu, [10].

zobrazení komplikovaných barevných scén, především hran v obraze. Další zajímavou technologií, kterou je vhodné na tomto místě uvést, je patent FOVEON X3. Tento senzor založený na bázi CMOS technologie umožňuje přímé barevné snímání bez použití Bayerova pole barevných filtrů. Základní myšlenka vychází ze závislosti hloubky vniku fotonu do křemíku na vlnové délce. Fotony s kratší vlnovou délkou jsou pohlceny v menší hloubce proti fotonu s delší vlnovou délkou. Je tedy možné vhodným průběhem potenciálu v křemíkovém substrátu docílit zachycení fotonů s různou vlnovou délkou, tedy barvou, v různé hloubce. Nespornou výhodou uvedeného přístupu je vyloučení nutnosti použít dalšího zpracování, především interpolačních algoritmů, k dopočítání barevného obrázku. Naopak problematická je barevná věrnost a vysoká technologická náročnost výroby tohoto prvku.

Objev CCD technologie přinesl možnost masivního rozvoje obrazové fotoniky a jejímu rozšíření do prakticky všech oblastí našeho života. Zásadně ovlivnil rozvoj snímací techniky a umožnil vznik mnoha nových vědních oblastí. V současné době se s důsledky tohoto pokroku potkáme v telekomunikační a multimediální technice. Samozřejmostí je již využití CCD senzorů ve vědeckých experimentech, a to nejen v astronomii, která se bezesporu zasloužila o rozvoj této myšlenky.

L i t e r a t u r a

- [1] HOLST, G. C., LOMHEIM, T. S.: *CMOS/CCD Sensors and Camera Systems*. SPIE Press, 2007.
- [2] NAKAMURA, J.: *Image Sensors and Signal Processing for Digital Still Cameras*. CRC Press, 2006.
- [3] *Nobel Prize, Two Revolutionary Optical Technologies*. [http://http://nobelprize.org](http://nobelprize.org), 2009.
- [4] BOYLE, W. S., SMITH, G. E.: *Bell Systems Technical Journal* 49, 587, 1970.
- [5] AMELIO, G. F., TOMPSETT, M. F., SMITH, G. E.: *Systems Technical Journal* 49, 593, 1970.
- [6] <http://stevesasson.pluggedin.kodak.com/default.asp?item=687843>
- [7] <http://www.phys.ksu.edu/personal/mnakarmi/detector/detector.html>
- [8] HOLST, G. C., LOMHEIM, T. S.: *CMOS/CCD Sensors and Camera Systems*. SPIE Press, 2007.
- [9] <http://www.microscopyu.com/articles/digitalimaging/ccdintro.html>
- [10] http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/0f/CCD_Sensor_Layout_Evolution.png