

## Principy digitálního záznamu obrazu

Oldřich Zmeškal, Miroslav Buchniček, Ondřej Sedlák  
Fakulta chemická, Vysoké učení technické v Brně  
Purkyňova 118, 612 00 Brno  
e-mail: zmeskal@fch.vutbr.cz

### 1. Úvod

Počátky digitální fotografie souvisejí s vynálezem integrovaných obvodů umožňujících zaznamenat obraz pomocí elektrických signálů. Princip záznamu spočívá v konverzi světelného záření dopadajícího na jednotlivé obrazové elementy (pixely) světlocitlivého senzoru na elektrický náboj. Počet lokálně generovaných elektronů přitom odpovídá intenzitě dopadajícího světelného záření.

Se světlocitlivými senzory se můžeme setkat v různých vědních oborech a oblastech spotřební elektroniky, např.

- v přenosných zařízeních (videokamery, kapesní počítače, digitální fotoaparáty, videotelefony),
- v domácnostech (PC kamery, domácí videotelefony, skenery, digitální televize),
- ve veřejných službách (profesionální TV kamery, mikrokamery, kamery v dopravních prostředcích a na veřejných prostranstvích, čtečky čárového kódu),
- ve vědeckovýzkumných pracovištích (astronomické teleskopy, meteorologické a satelitní kamery, radary, optická čidla robotů, zařízení pro rozpoznání znaků),
- v zábavním průmyslu (hračky a hry).

Tento široký rozsah aplikací klade na záznamové prvky značné, mnohdy protichůdné nároky. Pro některé aplikace je nutná miniaturizace, pro jiné vysoké rozlišení, citlivost či rychlost odezvy. Nemalou roli hraje také cena zařízení. Proto jsou používány různé principy záznamu informace, které se liší jak strukturou záznamového prvku, tak i celkovou konstrukcí záznamového zařízení.

Tato zařízení jsou v mnoha případech využívána jako vstupní zařízení osobních počítačů, a podporují rozvoj nových vědních oborů (počítačové vidění, digitální zpracování obrazů apod.) V tomto příspěvku bude věnována pozornost především digitálním fotoaparátům (kamerám) pro běžné a profesionální použití.

### 2. Principy záznamu obrazové informace

V současné době se používají k záznamu obrazu dvě technologie, které si navzájem konkurují, a to CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductors) a CCD (Charge Coupled Devices). Postupem doby si tyto technologie našly svoji oblast aplikací, pro které se používají. V obou případech lze proces záznamu obrazu rozdělit do pěti kroků, jimž odpovídají jednotlivé prvky soustavy

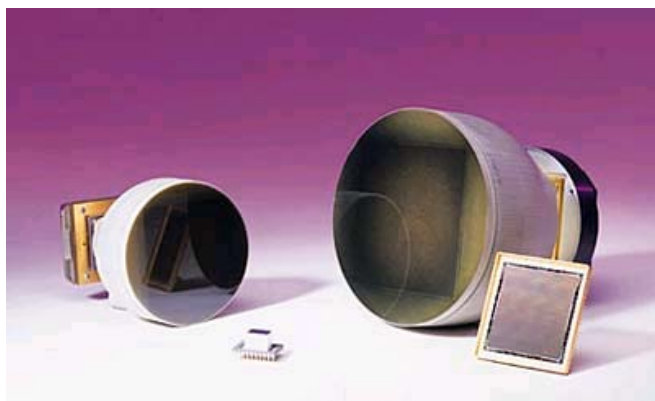
- vytvoření a transformace obrazu pomocí čoček, zrcadel, svazků optických vláken,
- separace barevných složek pomocí vhodných optických filtrů (např. RGB, CMY),
- zaznamenání barevných složek obrazu pomocí světlocitlivých senzorů (CCD nebo CMOS)
- generace elektrických signálů pro jednotlivé obrazové body (pixely) a barevné složky,
- transformace elektrických signálů na digitální data kvantováním na definovaný počet úrovní (A/D převodníky).

### Vytvoření a transformace obrazu

Ve většině zařízeních určených k digitálnímu záznamu obrazu dopadá světlo na záznamový prvek prostřednictvím optických systémů složených z čoček, zrcadel nebo jiných optických prvků. Jejich cílem je zvětšení nebo zmenšení obrazu, separace barevných složek obrazu, konverze do oblasti vlnových délek viditelného spektra nebo zesílení optického signálu.

Vstupní část digitálních fotoaparátů tvoří zpravidla objektivy. Slouží k vytvoření zmenšeného (někdy zvětšeného) obrazu na záznamové ploše světlocitlivého senzoru. Jsou charakterizovány ohniskovou vzdáleností, tj. zvětšením (optickým zoomem) a světelností ( $f/11 \dots f/2$ ). Zaostření do roviny senzoru může být realizováno automaticky nebo ručně (zpravidla od 60 cm do nekonečna, v makrorežimu od 12 – 60 cm). Pro připojení k mikroskopu lze použít zvětšující objektivy ale lépe objektivy mikroskopu (zpravidla 5 $\times$ , 10 $\times$ , 20 $\times$ , 40 $\times$  nebo 100 $\times$ ).

V mnoha aplikacích je výhodné použít optické prvky vyrobené z optických vláken (*obr. 1*). Lze je využít k přímému připojení světelného zdroje k senzoru. Mohou mít různé zvětšení (1 $\times$ , ..., 6 $\times$ ) jejich maximální rozměr dosahuje až 160 mm. Tyto objektivy mají mnohem větší



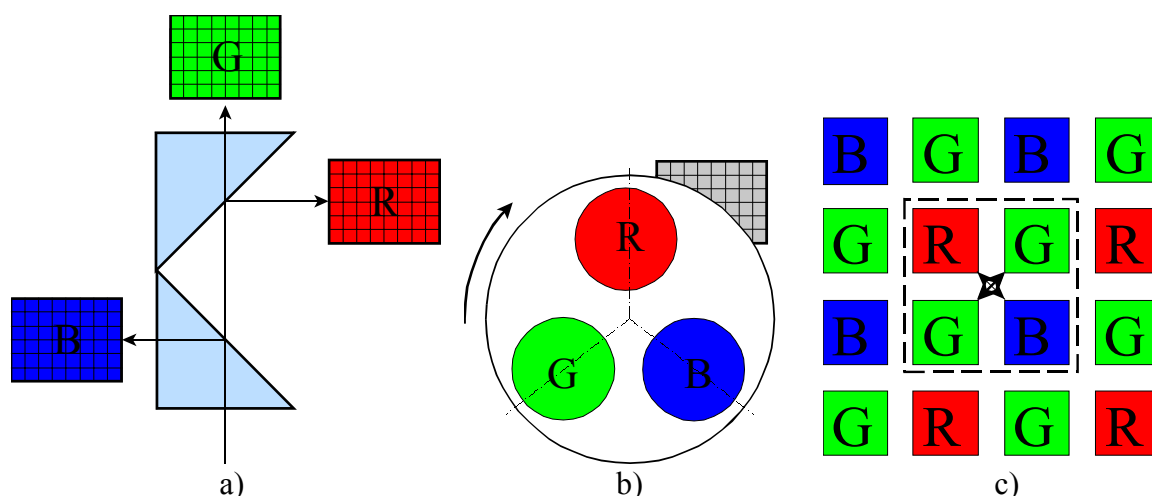
Obr. 1 Objektivy tvořené svazky optických vláken

světelnost než objektivy tvořené čočkami (pro objektivy  $f/1,2$  může být zisk až 10 $\times$  větší). Zobrazovací vláknová optika je běžně využívána k záznamu obrazu z rentgenových nebo neutronových scintilačních obrazovek, chemoluminiscenčních zdrojů, obrazových zesilovačů nebo zářičů.

K separaci barevných složek obrazu se zpravidla používají speciální optické filtry se spektrálními charakteristikami odpovídajícími charakteristikám lidského oka, polopropustná zrcadla nebo hranoly.

### Separace barevných složek

Z hlediska vlastní realizace zařízení pro záznam obrazu mohou být některé prvky sloučeny. Tak např. u profesionálních TV kamer se provádí barevné separace (do složek RGB) pomocí polopropustných zrcadel nebo hranolů a záznam obrazu se provádí pomocí tří oddělených „jednobarevných“ světlocitlivých senzorů (*obr. 2a*). Při tomto uspořádání jsou všechny tři



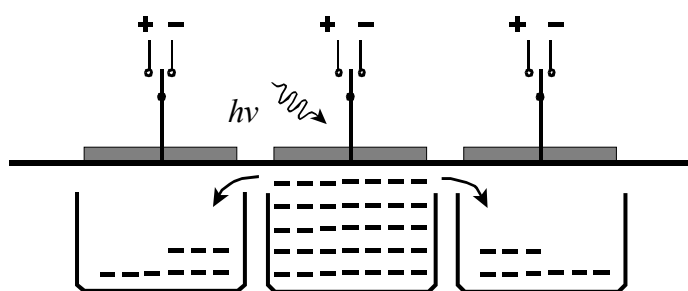
Obr. 2 Principy záznamu obrazu pomocí světlocitlivých senzorů a) bez multiplexu b) časově multiplexované systémy, c) prostorově multiplexované systémy (RGBG filtr)

barevné složky snímány současně, takže se dosahuje jak vynikající kvality záznamu obrazu, ostrosti, barevného souběhu obrazu tak i vysoké záznamové rychlosti. Druhá možnost spočívá v použití jednobarevného senzoru a barevné složky jsou snímány postupně (časový multiplex, obr. 2b). V tomto případě trvá záznam obrazové informace delší dobu, ale na druhé straně lze při použití interferenčních filtrů dosáhnout velmi vysoké kvality záznamu obrazu.

U digitálních fotoaparátů a spotřebních kamer jsou světlocitlivé senzory tvořeny zpravidla maticí čtvercových obrazových bodů, nad kterou jsou umístěny barevné filtry (např. RGBG). Jejich možné uspořádání je znázorněno na obr. 2c. Z něho je zřejmé, že zelené světlo je snímáno dvojnásobným počtem pixelů než obě zbývající (červené a modré). Toto uspořádání bylo zvoleno s ohledem na spektrální charakteristiky lidského oka, které má dominantní citlivost v oblasti vlnových délek 500 nm. Na rozdíl od předcházejících způsobů, se dosahuje nižší kvality zaznamenaného obrazu, protože výsledná barva je dána interpolací barev sousedních obrazových bodů, a horší rozlišovací schopností, protože na stejné ploše jsou umístěny obrazové body pro všechny barevné složky. Naopak rychlost záznamu obrazu je srovnatelná s prvním způsobem.

### Zaznamenání barevných složek obrazu

Dopadající světelné záření způsobuje u všech tří principů lokální generaci elektrického náboje (pár elektron/díra) v místech obrazových bodů. Maximální množství náboje které je možno v daném místě vygenerovat definuje veličina nazvaná „plnicí kapacita“ (Full Well Capacity). Pro nízké koncentrace nábojů je závislost mezi dopadajícím světelným zářením a množstvím vygenerovaného náboje lineární, pro vyšší koncentrace dochází k saturaci, což



Obr. 3 Přetečení náboje do sousedních pixelů - blooming

vede k přetečení náboje do sousedních pixelů způsobenému přexponováním, viz obr. 3 (tzv. blooming). Plnicí kapacita souvisí tedy s velikostí pixelů a určuje tzv. *dynamický rozsah* (resp. amplitudu odpovídajícího analogového signálu). Udává se počtem elektronů, které mohou být v pixelu zachyceny, viz tab. 1

Tabulka 1

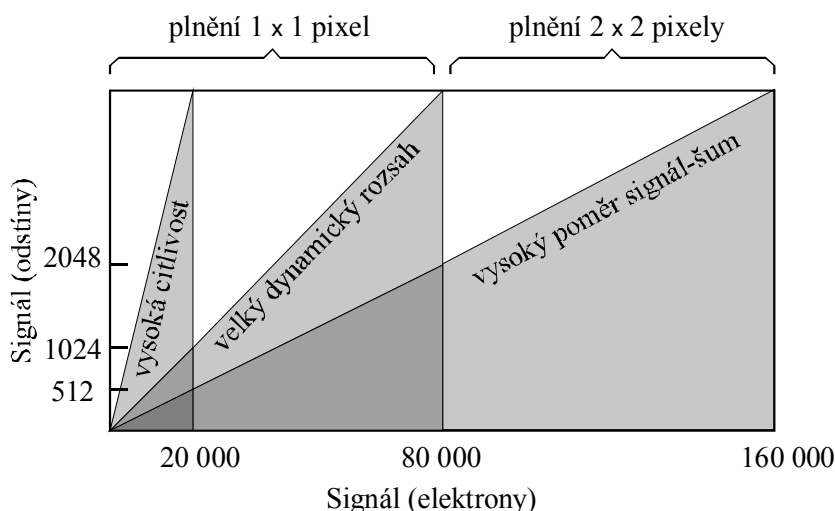
CCD senzor	velikost pixelu ( $\mu\text{m}$ )	plnicí kapacita
Kodak KAF 1400	$6.8 \times 6.8$	45 000 elektronů
EEV CCD37 – 10	$15 \times 15$	160 000 elektronů
Kodak KAF 1000	$24 \times 24$	630 000 elektronů

Digitální fotoaparáty umožňují zpravidla možnost volby záznamu obrazu v některém z následujících módů.

- **Mód s vysokou citlivostí** (High Sensitivity Mode) je nastaven tak, aby rozsah A/D převodníku odpovídal čtvrtině elektronů v pixelech. Tento mód je určen pro záznam obrazů podsvětlených aplikací s pomalými změnami intenzity světla.
- **Mód s velkým dynamickým rozsahem** (High Dynamic Range Mode) je nastaven tak, aby rozsah A/D převodníku odpovídal plné kapacitě pixelů. Tento mód umožňuje záznam obrazů vyznačujících se velkými dynamickými změnami. Pro velké expozice může docházet ke zkreslení obrazu způsobeném přetečením pixelů (blooming).

- **Mód s vysokým poměrem signál – šum** (High Signal to Noise Ratio Mode) slouží k nastavení vyšší úrovně aktivního signálu vzhledem k teplotnímu šumu. Lze toho dosáhnout zvýšením plnicí kapacity sloučením nábojů ze sousedních pixelů (vytvářením tzv. superpixelů, tj. matic  $2 \times 2$ ,  $3 \times 3$  původních pixelů). Čím větší bude plnicí kapacita, tím lepší bude i poměr signál šum. Proces slučování pixelů do superpixelu se nazývá plnění (binning) a snižuje plošné rozlišení senzoru (rozlišovací schopnost).

Na obr. 4 je vynesena závislost výstupního signálu 12 bitového A/D převodníku (odpovídajícího rozlišením odstínům zaznamenaného obrazu) na plnicí kapacitě senzoru (počtu fotoelektronů jednotlivých pixelů, resp. superpixelů) pro možné pracovní módy CCD senzoru KAF 0400 CCD.

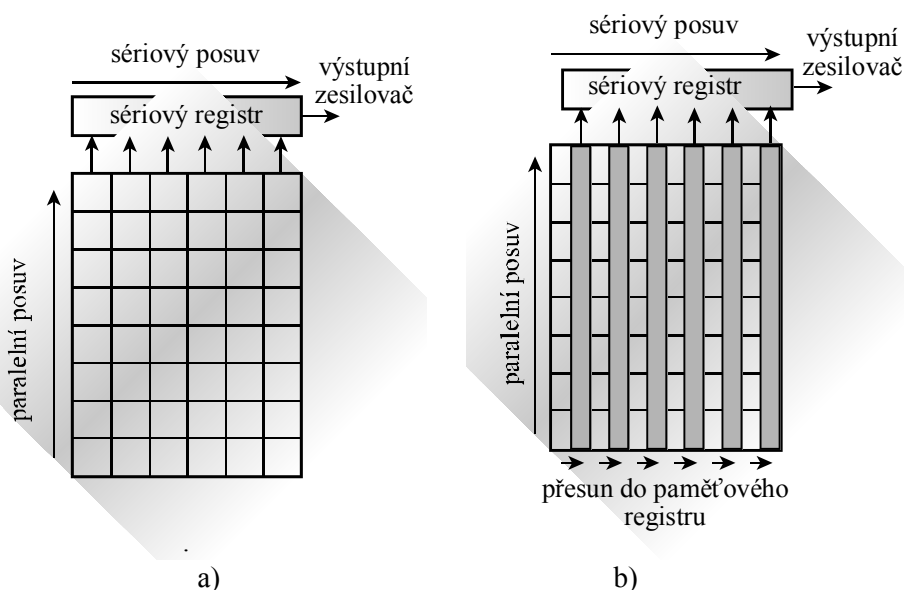


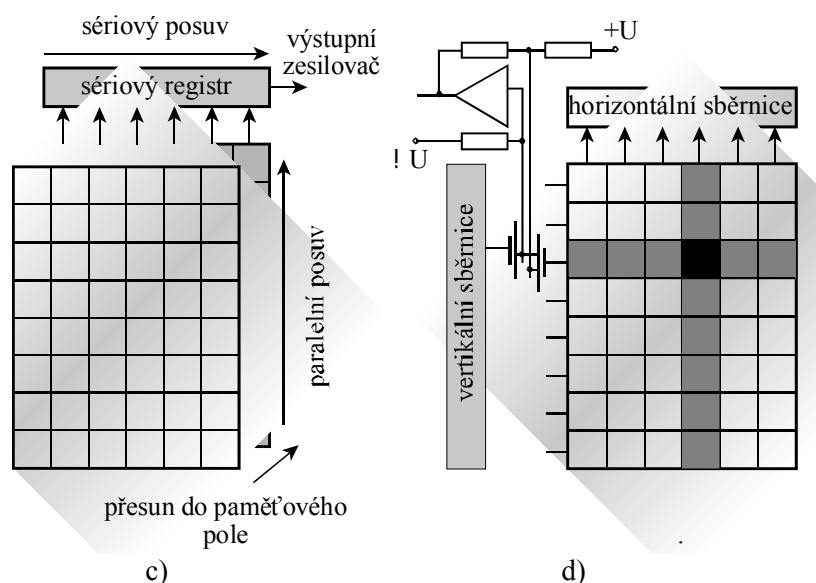
Obr. 4. Plnicí kapacita v různých módech záznamu obrazu

### Přenos elektrického náboje

Po expozici jednotlivých pixelů obrazového senzoru dochází k transportu generovaného elektrického náboje strukturou do A/D převodníku, kde dochází k digitalizaci odpovídajícího elektrického signálu. Používají se čtyři odlišné principy (viz obr. 5)

- s mechanickou uzávěrkou (Full Frame CCD),
- s meziřádkovým přenosem náboje (Interline-Transfer CCD),
- s přenosem snímků (Frame - Transfer CCD),
- s přímou adresací pixelů (Charge Injection Devices – CID).



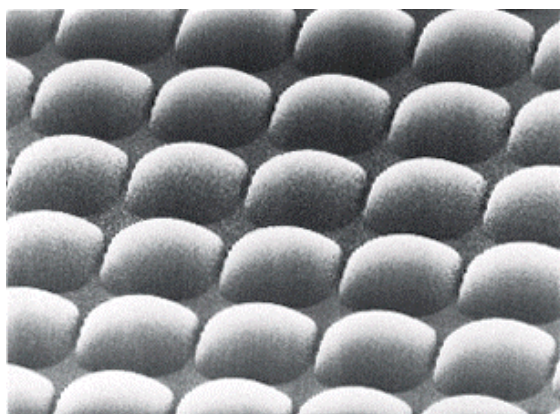


Obr. 5 Systém a) s mechanickou uzávěrkou, b) s mezipřenosem, c) s přenosem snímků, d) s přímou adresací pixelů

**Systémy s mechanickou uzávěrkou** (progresivní sken, obr. 5a) mají velmi jednoduchou architekturu. Využívají stejné obrazové pole pro expozici fotonem, integraci náboje i jeho přenos. K řízení expozice a blokování dopadu světla na senzor během čtení je použita mechanická uzávěrka. Pixely jsou zpravidla čtvercové, takže nedochází ke zkreslení obrazu při detekci. Sensory je možné osvětlovat jak z čelní tak i zadní strany. Zařízení s osvětlením se zadní strany mají větší kvantovou účinnost, protože není třeba, aby se světlo šířilo přes celou strukturu fotocitlivé vrstvy detektoru.

**Systémy s mezipřenosem** (prokládaný sken, obr. 5b) mají paralelní registr rozdělen na pruhy tak, že neprůhledný paměťový registr se nachází mezi sloupci pixelů. Elektronický obraz se akumuluje na exponované ploše paralelního registru. Během čtení CCD se celý obraz přesune prostřednictvím mezipřenosové masky do skrytého posuvného registru. CCD s mezipřenosem vykazují relativně špatnou citlivost, protože velká část každého pixelu je pokryta neprůhlednou maskou. Ke zvýšení kvantové účinnosti lze použít mikročočky (obr. 6), které soustřeďují světlo z velké plochy na fotodiodu.

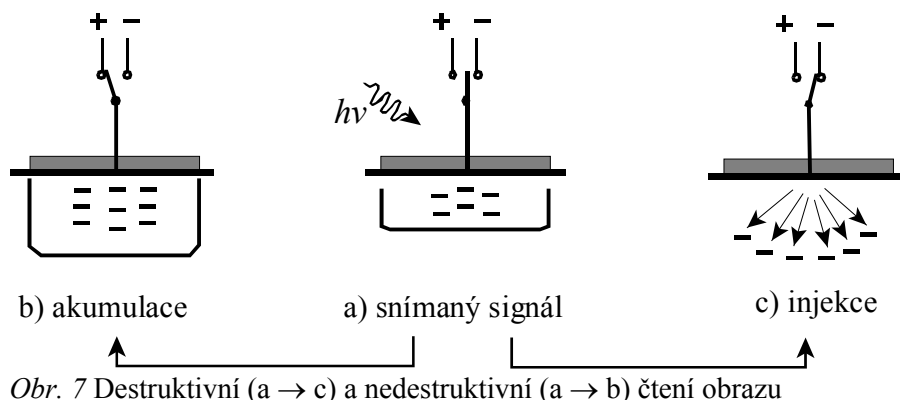
**Systémy s přenosem snímků** (plošný sken, obr. 5c) mají oddělené obrazové a paměťové pole. Zaznamenaný latentní obraz je nejprve přesunut z obrazového pole do paměťového pole a během další expozice obrazového pole rychle přesunut ( $\sim 300 \mu\text{s}$ ) k okraji senzoru, kde je digitalizován. Paměťové pole má obvykle stejnou velikost jako obrazové pole a je odděleno neprůhlednou maskou jako štít proti osvětlení pixelů. Tento typ CCD umožňuje přenášet obraz spojitě bez uzávěrky a to vysokou přenosovou rychlostí. CCD s přenosem snímků mohou být také užity ve spojení s mechanickou uzávěrkou k rychlému zaznamenání dvou po sobě následujících snímků. Toho lze využít např. při záznamu dvou obrazů s rozdílnou excitací nebo emisní vlnovou délkou při některých obrazových experimentech.



Obr. 6 Kondenzory (soustava mikročoček)



**Systémy s přímou adresací pixelů** (obr. 5d) umožňuje přímý přístup k jednotlivým pixelům senzoru. Elektrický náboj je generován v pixelech sestávajících ze dvou kolmých elektrod (MOS tranzistorů), které slouží k uložení i přenosu fotogenerovaného náboje. Tento princip, využívaný jak v CCD, tak i v CMOS senzorech, umožňuje destruktivní (elektrický náboj je injektován do kontaktu) nebo nedestruktivní (náboj zůstává v pixelu a je možné provádět další expozici) čtení obrazu, viz obr. 7.



### Digitalizace signálu

Vlastní digitalizace signálu se provádí pomocí A/D převodníku (Analog Digital Unit – ADU). Počet kvantovacích úrovní digitalizovaného signálu určuje tzv. barevnou hloubku zaznamenaného obrazu, ze které vyplývá počet různých barev, které lze na obrázku rozlišit. Nejčastěji se provádí záznam obrazů ve 24 bitové nebo 36 bitové barevné hloubce (na každý barevný kanál RGB připadá 8 bitů, resp. 12 bitů), pomocí které lze rozlišit až 16,7 milionů (68,7 miliard) barev. U digitálních fotoaparátů je informace ukládána v paměti (např. v Compact Flash 1, 2) buď ve formátech definovaných výrobcem (např. RAW) nebo ve formátech využívaných u osobních počítačů (např. formát s bezztrátovou kompresí TIFF, resp. ztrátovou kompresí JPEG).

## 3. Vlastnosti CCD a CMOS senzorů

### CCD senzory

K záznamu obrazové informace se využívají světlocitlivé senzory, jejichž vývoj započal v Bellových laboratořích již koncem 60. let (George Smith a Willard Boyle). Tyto senzory, známé pod označením CCD (Charge Coupled Devices), se využívají v televizních kamerách a skenerech od roku 1975. V polovině 80. let byly s nimi vyrobeny první digitální fotoaparáty, jejich kvalita se velmi rychle zvyšovala. Poměrně dlouhý vývoj a rozsáhlé využívání v aplikacích umožnily optimalizaci technologických procesů a finálních vlastností senzorů tak, aby dosahovaly co nejvyšší kvality.

Profesionální TV kamery využívají k záznamu obrazové informace tři samostatné senzory (obr. 2a) a přenos náboje je realizován prostřednictvím paměťového pole (obr. 5c). U digitálních fotoaparátů a uživatelských kamer se zpravidla (s ohledem na jejich hmotnost) k záznamu obrazu používá systém s časovým nebo prostorovým multiplexem (obr. 2b, 2c), přenos náboje je realizován u nejlevnějších systémů prostřednictvím paměťových registrů (obr. 5b), pro speciální použití nebo jako zadní kryty digitálních klasických fotoaparátů se používají systémy s mechanickou uzávěrkou (obr. 5a). V poslední době se začínají vyrábět systémy umožňující adresné čtení obsahu jednotlivých pixelů (obr. 5d). Tento způsob umožňuje individuální čtení jednotlivých obrazových bodů nebo efektivní čtení vymezeného pole senzoru.



Obr. 8 Digitální fotoaparát Nikon D1x  
(CCD senzor 5,33 megapixelů)

parametry nejvýkonnějších digitálních fotoaparátů, které se v současné době komerčně vyrábějí (2001).

Výroba CCD senzorů je poměrně drahá a časově náročná, protože vlastní záznamové prvky jsou vyráběny odlišnou technologií než ostatní podpůrné obvody (posuvné registry, A/D převodníky, apod.) a je třeba zabezpečit transport náboje přes čip bez zkreslení. Na druhé straně však dosahují vynikajících parametrů

- vytvářejí velmi kvalitní nízkošumový obraz (hladinu teplotního šumu lze snížit jednak chlazením senzorů, příp. sdružováním pixelů do tzv. superpixelů)

- mají vynikající světelnou citlivost, protože jejich konverzní účinnost je velmi vysoká (nedochází k ohřevu senzorů)

- v současné době dosahují vyšší kvality a lepšího plošného rozlišení.

V následující tabulce jsou uvedeny základní

Tabulka 2

výrobce typ fotoaparátu	typ senzoru	rozlišení/kapacita* (pixely/megapixely)	Poznámka	Poznámka
Canon PowerShot G2	CCD	(2272 × 1704) 4 (3,87)	RGB (dříve CMYG)	CCD filtrace
Canon EOS-1D	CCD	(2464 × 1648) 4,48 (4,06)	5 barevných prostorů	10 módů pro vyrovnaní bílé
Minolta Dimage 7	CCD	(2560 × 1920) 5,2 (4,92)	RGB (Adobe RGB)	optický zoom 7× (28 – 200 mm)
Nikon D1x	CCD	3008 × 1960 5,9 (5,33)	12 bitový A/D	3 snímky/s (max 9 snímků)
Olympus CAMEDIA C-4040	CCD	(2272 × 1704) 4,13 (3,87)	světelnost f/1,8 – f/2,6	optický zoom 3×
Olympus E10	CCD	(2240 × 1680) 4 (3,76)		optický zoom 4× (35 – 140 mm)
Sony DSC F707	CCD	(2560 × 1920) 5 (4,92)	světelnost f/2,0 – 2,4	optický zoom 5×
Sony DSC S85	CCD	(2272 × 1704) 4,1 (3,87)	14 bitový A/D	optický zoom 3×
Toshiba PDR-M81	CCD	(2400 × 1600) 4,2 (3,84)		optický zoom 3× (35 – 98mm)
Canon EOS D30 SLR	CMOS	(2226 × 1460) (3,25)	ISO 100, 200, 400, 800, 1600	3 snímky/s

\* v závorce je uvedeno efektivní prostorové rozlišení/kapacita senzoru

### CMOS senzory

CMOS senzory byly v digitálních fotoaparátech poprvé použity v roce 1996. Jeden z prvních digitálních fotoaparátů využívající tyto senzory byl vyroben firmou Canon (EOS D30 SLR, *obr. 9*) s kapacitou 3,25 megapixelů ( $2226 \times 1460$  pixelů). Umožňuje nastavení citlivosti podle ISO 100, 200, 400, 800, 1600, zaznamenaná až 3 snímky/s.

V současné době (rok 2001) se objevily na trhu první kamery s čipem vyrobeným 18 mikronovou technologií, jejichž kapacita je větší než 5 milionů obrazových bodů (pixelů). Výrobce UMC Taiwan uvádí, že se mu podařilo vyvinout technologii, která umožňuje vyrobit A/D převodník, obrazový procesor a světlocitlivý senzor v jednom technologickém procesu. K záznamu obrazové informace je využit senzor s filtry RGBG (*obr. 2c*), přenos náboje je prováděn výhradně prostřednictvím přímé adresace pixelů (*obr. 5d*).

CMOS senzory mají nižší kvalitu, menší rozlišení a menší světelnou citlivost. Na druhé straně mají však podstatně menší spotřebu elektrické energie, a tedy delší životnost baterií. Postupem času se stanou konkurentem CCD senzorů.

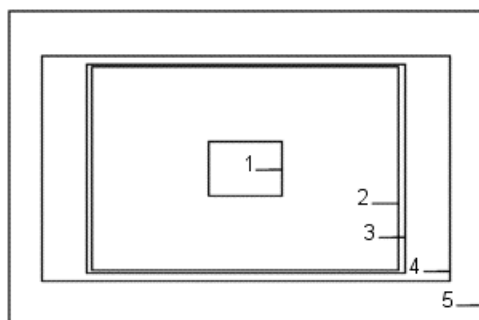
Z uvedených skutečností vyplývá, že výroba CMOS senzorů je podstatně levnější a technologicky méně náročná než u CCD (až 100×). Také provoz je v porovnání se CCD senzory podstatně levnější a tedy výhodnější. Nevýhodou CMOS senzorů je malý poměr signál/šum a nižší světelná citlivost (část energie fotonu se spotřebuje na nežádoucí ohřev CMOS senzorů). V průběhu technologického procesu je možné optimalizovat fototranzistory na citlivost na různé vlnové délky světla, čímž lze zaznamenat informace o barvě (kterou lze zpětně rekonstruovat). CMOS senzory se vyznačují také širokým dynamickým rozsahem. Na *obr. 10* je zobrazena průmyslová kamera firmy C-Cam Technologies s obrazovým senzorem  $1280 \times 1024$  pixelů, mající dynamický rozsah odpovídající 5 dekadám intenzit světla).



*Obr. 9* Digitální fotoaparát Canon EOS D30 SLR (CMOS senzor 3,25 megapixelů)



*Obr. 10* Průmyslová kamera CCI<sub>4</sub> CMOS firmy C-Cam Technologies



*Obr. 11* Porovnání velikostí CCD a CMOS čipů

- 1) 1/1,8" spotřební CCD – 5,52 × 4,14 mm, 2) Canon EOS D 30 CMOS – 22,7 × 15,1 mm
- 3) Nikon D1/Fuji S1 Pro CCD 23,6 × 15,5 mm, 4) APS film 30,2 × 16,7 mm
- 5) 35 mm film – 35,0 × 23,3 mm



Na obr. 11 je provedeno srovnání velikostí různých typů senzorů (CMOS, CCD) s klasickými záznamovými médii (APS a 35 mm film). Vpravo jsou zobrazeny dva typy senzorů (spotřební CCD a CMOS) .

### **Závěr**

V příspěvku jsou shrnuty principy CCD a CMOS obrazových senzorů používaných v digitálních fotoaparátech a kamerách. Jsou porovnány jejich vlastnosti v závislosti na principu záznamu, přenosu a digitalizaci zaznamenaného obrazu. Jsou zde shrnuty jejich výhody a nevýhody. Celá problematika je mnohem obsáhlejší, další detaily budou prezentovány v přednášce na symposiu.

### **Literatura**

- [1] Gonzales R. C.: Digital Image Processing, *Addison-Wesley Publishing Company*, Reading, USA, 1987
- [2] Giorgiany E. J., Madden T. E.: Digital Color Managment, *Addison-Wesley Publishing Company*, Reading, USA, 1997
- [3] Chovancová V.: Kolorimetria farebných monitorov, Bakalářský projekt, katedra polygrafie a aplikovanej fotochémie CHTF STU, Bratislava, 2000
- [4] Encyklopedia, *Roper Scientific, Inc.*, 2000 – 2001, [www.roperscientific.com](http://www.roperscientific.com)
- [5] CMOS versus CCD, *Imaging Resource, Inc.*, 2000 – 2001, [www.imaging-resource.com](http://www.imaging-resource.com)
- [6] Digital Cameras, *Imaging Resource*, 2001, <http://imaging-resource.com/digcam01.htm>