Snímací obvody CCD

Tímto článkem volně navazujeme na článek o principech digitální fotografie z minulého Fontu. Pojednáme v něm o technických detailech nezbytných k pronikunutí do nitra digitální fotografie.

Snímací obvod je rozhraním, na kterém začíná digitální fotografie, protože vytvoření obrazu zůstává doménou fotografické práce, nelišící se od snímání na jiná zobrazovací media. Jeho konstrukce určuje odlišné vlastnosti záznamu a zpracování obrazové informace, rozšiřující výrazně možnosti využití fotografie. Tak jako musí fotograf znát vlastnosti fotografické citlivé vrstvy, měl by být digitální fotograf seznámen s postupy, jakými se mění obraz na elektrický signál ve snímacím obvodu CCD a vlivy této přeměny a jejích podmínek na kvalitu zobrazení. Tento požadavek podmiňuje možnost zpracování získaného obrazového signálu, pro které je nutná hlubší znalost vztahu výsledného obrazu a charakteristik zobrazení. Kvalita snímacích obvodů již umožňuje nahradit obraz, získaný fotochemicky, obrazem pořízeným digitálním záznamem.

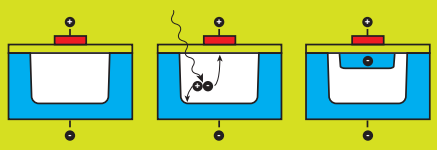
První obvody CCD (Charge Coupled Devices – obvody vázané nábojem) vznikaly koncem 60-tých let jako posuvné a paměťové registry pro výpočetní techniku, teprve později bylo využito k formování náboje na jednotlivých elementech obvodu fotodiod a vznikl snímací obvod CCD. Název prvních typů BBD (Bucket Brigade Devices), ukazuje princip přenosu dat v registru. „Bucket Brigade" je řada hasičů, předávajících si nádoby s vodou od zdroje k místu požáru. To vystihuje princip přenosu nábojů i uvnitř obvodů CCD. Snímací obvody CCD se liší od ryze posuvných soustav tím, že náboj je generován do každého prvku soustavy vloženou fotodiodou.

Ve fotodiodě (obr. 1) se uvolňuje dopadem fotonu v okolí zpětně předpjatého přechodu p-n elektron, který je přitahován ke kladné elektrodě, kde se akumuluje jako náboj, úměrný dopadlé světelné energii. Náboj z fotodiody se převede do elementu posuvného registru (obr. 2), kde přiložené napětí vytváří potenciálovou jámu, do které se elektrony ukládají. Skutečný řez obvodem (obr. 3) ukazuje složitost soustavy, která svědčí i o složitosti technologie obvodů CCD. Posuv nábojů při jejich vyvádění z obvodu se zajišťuje trojitou soustavou elektrod (obr. 4), na které se přivádí vhodně tvarované napětí. Tím vznikají postupně posunuté potenciálové jámy, do kterých se náboje přelévají a tak postupují od jednoho elementu snímacího obvodu k druhému. Nesmí při tom docházek ke ztrátám, neboť náboj je analogovým modelem obrazu, který je úrovňově digitalizován až na výstupu v analogově-digitálním převodníku. Teprve digitalizovaný signál je odolný proti poruchám.

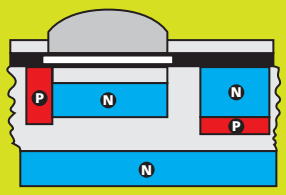
Objem potenciálové jámy je omezen a proto po jejím „naplnění" nemůže být další signál akumulován, obraz je v tomto místě nasycen (bílý). Přebytečné elektrody mohou přetékat do sousedních elementů (tzv. blooming – obr. 5), který vede k mežádoucímu zvýšení jasu sousedních elementů („rozzáření"), může poškodit i barevné podání. Jednou z obran je zapojení, které svádí nadbytečný náboj tak, aby nepronikal do sousedních prvků. Tím se ovšem nezabrání přesvětlení v obrazu, vytvářející někdy nepřirozeně světlá místa. K omezení tohoto jevu přispívá i elektronická závěrka (obr. 6), která vhodným časovým připojením napětí řídí dobu, po kterou se náboj akumuluje. Ten pak nemůže překročit přípustnou mez.

Zobrazení předpokládá přeměnu osvětlení jednotlivých míst obrazu (jasu snímaného objektu) na úměrný signál zobrazený v ideálním případě jako lineární závislost pro obě souřadnice, vynášené v logaritmické stupnici (obr. 7). Počet elektronů, omezující maximální náboj závisí na ploše snímacího obvodu a pohybuje se kolem 105, na dolním konci je signál omezen šumem. Ten vzniká ve všech elektronických obvodech v podstatě v důsledku tepelného pohybu elektronů. Proto je možno úroveň šumu snížit ochlazením snímacího obvodu. Za normální teploty se počet „šumových" elektronů pohybuje kolem několika desítek. Úroveň signálu musí úroveň šumu několikrát překračovat, aby se vliv šumu škodlivě neprojevoval. Úroveň šumu může být různá u jednotlivých RGB barev, protože základní citlivost obvodu (obr. 12) je vyšší v zelené a červené oblasti než v modré. Proto v praxi u mozaikových digitálních fotoaparátů vzniká v modrém kanálu nepříjemný šum.

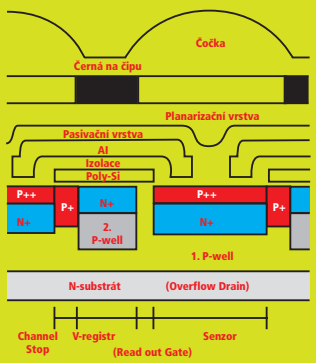
Senzitometrická charakteristika snímacího obvodu probíhá mezi těmito dvěma extrémními stavy. Její linearity lze dosahovat elektronickou opravou průběhu. Překročili signál na dolním konci charakteristiky šum například 7-krát (tj. 350 elektronů), pak je při mezním možném počtu elektronů 90 000 celkový rozsah 257, což odpovídá rozsahu $2^8 = 256$. Zvýšení rozsahu lze dosahovat zvětšením úrovně maximálního signálu (větší plocha elementu snímacího obvodu) nebo snížením šumu (např. chlazením), případně připuštěním určité degradace obrazu šumem. Elektronické zesílení úrovně signálu vede i k zesílení úrovně šumu. „Fotografická šíře" snímacího obvodu CCD je tedy ve srovnání s fotografickými vrstvami nižší, proto je nutno pracovat s přesnou expozicí.



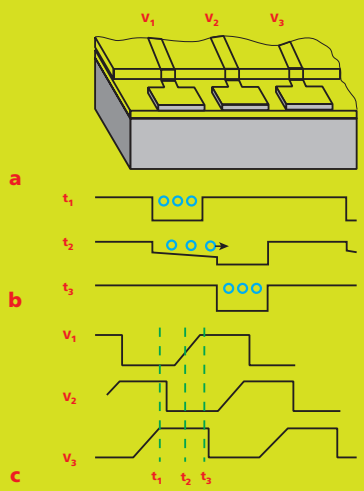
Obr. 1. Schema funkce fotodiody: přiložené napětí polarizuje fotodiodu (vlevo), dopad záření uvolní elektron (uprostřed), elektrony se akumulují u kladného pólu (vpravo).



Obr. 2. Schematický řez elementem snímacího obvodu CCD: vlevo fotodioda s čočkou, vpravo část posuvného registru, ve které se akumuluje náboj elektronů, převedený z fotodiody.

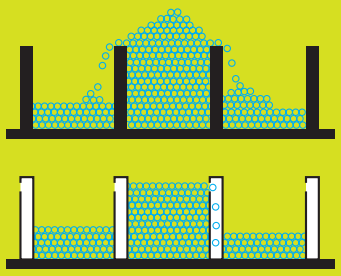


Obr. 3. Řez obvodem ukazuje složitost konstrukce obvodu CCD.

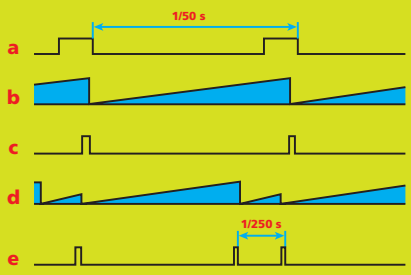


Obr. 4. Schéma přenosu nábojů soustavou elektrod V1–V3 (a), pod kterými vznikají postupně potenciálové jámy, zobrazené v časech t1–t3 (b), v důsledku změn napětí na elektrodách V1–V3 (c).

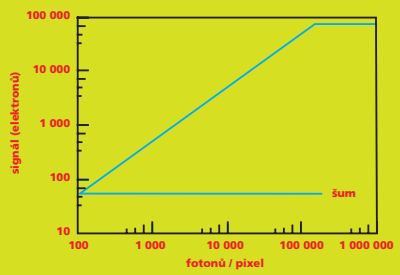
Velikost elementu snímacího obvodu má tedy významný vliv na jeho vlastnosti. Tato velikost je určena rozměry obvodu a počtem snímacích elementů. Rozměry obvodu se udávají podle analogie se snímacími televizními elektronkami tzv. montážním průměrem v palcích, který však nemá přímý vztah k velikosti plochy obvodu (obr. 8). Snaha zmenšovat velikost obvodu (z technologických důvodů) a růst počtu snímacích



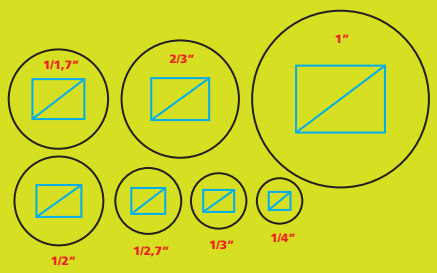
Obr. 5. Přetékání (blooming) náboje do sousedních elementů, kterému se lze bránit odvodem přebytečného náboje.



Obr. 6. Elektronická závěrka (pro snímač video): v době půlsnímku (a) se akumuluje náboj pod snímacími elementy (b), ukončení cyklu je řízeno impulzy (c); v elektronické závěrce se doba akumulace omezí (d) pomocnými impulzy (e).

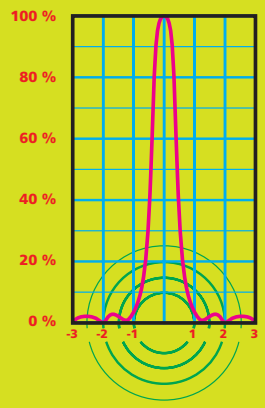


Obr. 7. Zjednodušená charakteristická křivka snímacího obvodu, omezená, na dolním konci šumem, na horním vyplněním potenciálové jámy.

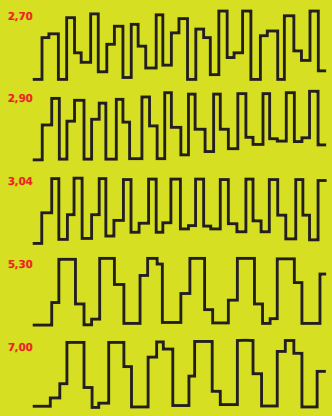


Obr. 8. Rozměry snímacích obvodů pro jednotlivé „montážní" průměry, udávané jako charakteristický rozměr obvodu.

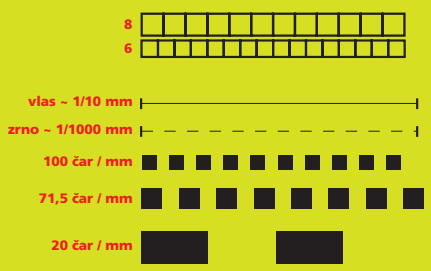
obvodů vede ke snižování jejich rozměru. Tento trend má sice technologickou mez (dnes asi u 3,7÷3,9 μm), ale proti němu stojí optické důvody. I ideální objektiv bez optických vad zobrazuje v důsledku ohybu světla na jeho otvoru bod objektu ve tvaru tzv. ohybové plošky (obr. 9), jejíž průměr závisí jen na clonovém číslu. Aby průměr rozptylového kroužku nepřekročil velikost snímací plošky, nesmí být clonové číslo větší, než 0,8-násobek jeho rozměru v μm. Sní-



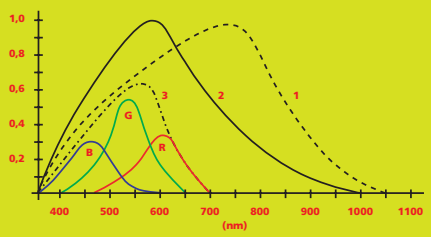
Obr. 9. Rozložení energie v obrazu bodu ideálním objektivem bez optických vad, působené ohybem světla na jeho otvoru.



Obr. 10. Modelování průběhu signálu čárového testu na snímacím obvodu s různým poměrem počtu obrazových elementů na element čárového rastru.



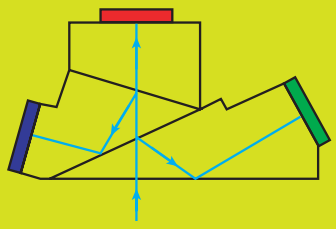
Obr. 11. Vztah rozměru snímacích elementů (6 a 8 μm) k zrnu fotografické vrstvy a čarovým rastrům různé prostorové hustoty.



Obr. 12. Spektrální závislosti: 1 - citlivost elementů obvodu CMOS, 2 - citlivost elementů obvodu CCD, 3 - průběh po odfiltrování infračervené složky, R, G, B - průběhy s jednotlivými filtry.

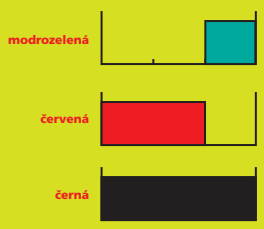
mací element o rozměru 13 μm dovoluje clonit asi do 11; 5 μm asi do 4. Další clonění zhoršuje ostrost zobrazení. Snižování rozměrů citlivé plošky snímacího obvodu a to,

Reklama



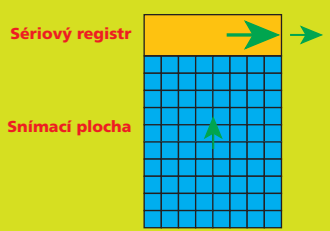
Obr. 13. Dělení obrazového svazku na hranolech s dělicími barevnými filtry na tři samostatné snímací obvody.

Obr. 14. Některé kombinace aditivních a subtraktivních filtrů (O - bez filtru) a výsledné hodnoty jimi získaného signálu.



Obr. 15. Příklad spektrálního průběhu subtraktivního filtru, propouštějícího 2/3 energie spektra a doplňkového aditivního filtru, propouštějícího jen 1/3; spolu nepropouštějí světlo.

Obr. 16. Prokládaný CCD čip.



Obr. 17. Neprokládaný CCD čip.

že nevyplňuje zcela plochu, vede k nutnosti předřazovat před citlivé elementy čočkový rastr (obr. 2 a 3). Ten však může omezovat úhel, ve kterém dopadá světlo na element a tím i zmenšování clony.

Rozlišení podrobností je na rozdíl od náhodného rozložení citlivých elementů fotografické vrstvy závislé na velikosti a pravidelnosti rozložení citlivých elementů. U fotografické vrstvy je nutno vlastnosti měřit, pro digitální zobrazení je lze popsat matematicky. Lze například výpočtem nalézt charakteristiku přenosu kontrastu, ukazující závislost kontrastu zobrazení na hustotě zobrazených proužků sinusového průběhu. Rozbor i měření ukazuje, že pro zobrazení jednoho elementu čárového testu (čára a mezera) je třeba alespoň tří elementů snímacího obvodu (obr. 10). Zjednodušené vztahy některých veličin pro snímací elementy o rozměru 8 a 6 μm jsou na obr. 11. Pravoúhlý tvar fotocitlivé plošky snímacího obvodu má vliv na rozdílné směrové rozlišení, což by se neprojevilo u elementu kruhového tvaru.

Ze změřeného souboru dat lze jejich mezilehlé hodnoty vypočítat interpolací, pro což existují ověřené matematické postupy. Interpolací lze tedy uměle zvýšit i počet snímacích plošek vložením mezilehlých vypočítaných hodnot. Nezískává se tím sice nová informace, výjimečně může docházet i k jejím zkreslení, avšak vyšší hustota bodů uspokojí lépe zrakové vnímání. Volbou vhodných postupů interpolace a jejím využitím v rozumných mezích lze zlepšit vizuální vjem obrazu.

Citlivost k barvám je u snímacích obvodů dána spektrální citlivostí křemíku, jejíž mez leží v infračervené oblasti spektra, poměrně daleko od viditelného rozsahu (obr. 12). Je proto třeba odstranit infračervenou část filtrem před obvodem. Jednotlivá barevná pásma citlivosti v červené (R), zelené (G) a modré (B) se získají barevnou filtrací. Filtry lze zařazovat postupně a soubor dat RGB tak získat třemi snímky, při řádkovacích (skenovaních) postupech snímání se využívá tří snímacích obvodů s příslušnými filtry. Soustavy se třemi obvody a optickým dělením obrazu (obr. 13) se aplikují v profesionálních televizních kamerách, ve statické fotografii jen výjimečně. Jediným obvodem lze snímat hodnoty RGB předřazením mozaikového filtru, jehož jednotku tvoří čtyři prvky (pixel) snímacího obvodu.

Nejužívanějším způsobem uspořádání těchto filtru je tzv. Bayerovo schema (obr. 14), se dvěma zelenými a po jednom červeném a modrém filtru. Všechny hodnoty RGB pro každý snímací element (pixel) se získají interpolací, pravidelně s využitím větší skupiny (např. 4 x 4) snímacích elementů, aby se věrněji reprodukoval průběh barevných hodnot signálu. Každý aditivní filtr R, G, B pohlcuje 2/3 spektra (obr. 15), zatímco subtraktivní filtry jen 1/3, proto je signál pod nimi vyšší a taková filtrace přispívá k zlepšení poměru signálu k šumu. Některé příklady s převody na signál RGB jsou na obr. 14.

Rozdílná je také konstrukce čipů, rozlišujeme čipy prokládané a neprokládané. Prokládané čipy (obr. 16) snímají pouze 50 % plochy čipu, zbylých 50 % obrazu je získáváno dopočtením. Jejich výhoda spočívá v možnosti více rychlých expozicí za sebou. Neprokládané čipy (obr. 17) dávají 90–100 % obrazu (něco zaberou nutné mezery mezi jednotlivými snímacími elementy). Dávají kvalitněší obraz, ale neumožňují exponovat rychle za sebou.

Výroba snímacích obvodů CCD je značně náročná, vyžaduje až 350 dílčích operací, klade vysoké požadavky na bezporuchovost křemíkové destičky, na které se formuje. Proto se cena obvodu podílí 20 až 30 % na ceně digitálního fotografického přístroje. Napájení potřebuje několik úrovní o vyšším napětí, než běžné polovodičové obvody, mimoto je třeba generovat složitý průběh posouvacích napětí (obr. 4). Některé tyto nevýhody nemá snímací obvod CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor), z jehož snímacích elementů se odvádí náboj křížovými vodiči, takže je možný libovolný přístup ke každému snímacímu elementu nebo jejich skupině. Fotodioda je připojena k vodičům spínacím tranzistorem, nebo zesilovačem. Tyto obvody snižují velikost plochy snímacího fotoelementu. Napájení je stejné, jako u polovodičových obvodů. Technologicky je možno celou elektroniku kamery formovat se snímacím obvodem na jednom čipu, a tím dosahovat výrazné miniaturizace. Některé vlastnosti snímacích obvodů CMOS (vyšší šum, omezený počet snímacích elementů) umožňuje zatím jejich využití v méně náročných aplikacích, kde se uplatní i jejich výrazně nižší výrobní náklady (až 1/5 nákladů na obvod CCD).

Základní rozdíly mezi fotografickou vrstvou a snímacím obvodem CCD spočívají v náhodném uspořádání citlivých elementů ve fotografické vrstvě ve srovnání s uspořádaným rozložením elementů snímacího obvodu. V digitální fotografii je oddělen záznam obrazové informace od měniče obrazu na zapisovaný signál, ve fotografii jsou obě funkce sloučeny ve fotografické vrstvě. Oba tyto postupy mají své výhody i nevýhody. Expoziční pružnost digitálního záznamu je omezenější, než fotografického, stejně jako možnost snímat s vyšší citlivostí. Naproti tomu digitální záznam umožňuje kompenzaci vlivu barvy světla, což je v barevné fotografii složitější. Podstatný rozdíl mezi oběma způsoby je v možnosti bezztrátového množení digitálně získané informace a jejího mnohostranného, poměrně snadného zpracování. Přenos fotografického snímku je na rozdíl od digitálního obrazu složitý.

Zajímají-li vás další technické detaily k této problematice naleznete je v časopisech Jemná mechanika a optika (11-12/99, 2, 3, 9/2000) a Sdělovací technika (4/98, 4, 9/2000).

Milič Jiráček,
redakčně upravil Jan Tippman.