

Wykłady Gościnne na pyryficy

Marek Lewandowski

4 listopada 2005

Rozdział 1

O bateriach,

— dla tych, co wierzą, że baterie alkaliczne pogonią ich nową zabawkę — krótki a prosty wywód, dlaczego się mylą.

Weźmy takie dwa ogniwa:

1. Alkaliczne: (ok. 2.5Ah) <http://data.energizer.com/PDFs/e91.pdf>
2. accu NiMH: <http://data.energizer.com/PDFs/nh15.pdf>

Założmy, że aparat poganiany jest z kompletu 4 ogniw, rozładowuje je do ok. 1.0 V/cele (tak powinien, żeby nie psuć zanadto accu) i przy 4 V się wyłącza. Założmy, że aparat ciągnie średnio ca. 1 A, w szczycie potrafi zassać 2 A.

Świeżo naładowana bateria ma R_{in} w okolicy 150 m Ω . Bądźmy optymistami i założmy, że przy rozładowywaniu nie wzrośnie (to nieprawda, wzrośnie i to nawet dwukrotnie). 150 m Ω przy poborze chwilowym 2 A daje spadek napięcia 300 mV. Ponieważ aparat nam się wyłączy, gdy napięcie spadnie do 1.0 V na zaciskach ogniwa, to znaczy, że bez obciążenia napięcie baterii nie może spaść poniżej 1.3 V.

Z datasheetu wynika, że 1.3 V cęła osiągnie po 10 minutach pracy z obciążeniem 1 W (ciągniemy *średnio* 1 A, więc bierzemy nawet więcej, niż 1 W z pojedynczej cęły, ale założmy że tak), lub — dla oszczędniejszego aparatu — po jakimś kwadransie pracy.

$$1 \text{ A} \cdot 10 \text{ minut} = 150 \text{ mAh}$$

$$1 \text{ A} \cdot 15 \text{ minut} = 250 \text{ mAh},$$

czyli z nominalnej pojemności baterii równej 2500 mAh możemy wykorzystać <10%.

Teraz accu:

$$R_{in} = 30 \text{ m}\Omega$$

δU przy poborze 2 A z pakietu: 60 mV accu obciążony średnio 1 A ma napięcie 1.06 V przy praktycznie całkowitym rozładowaniu, czyli po ponad 2 h. Z accu wyciągamy niemal 100% nominalnej pojemności.

Rozdział 2

... a o LiIONkach?

Slon wrote:

> Czy mozesz Marku zrobic podobny wyklad wzgledem aku LiIon?

2.1 No to jedziemy z tym koksem :)

Może nie do końca dlaczego i jak w 1ds mkII, ale ogólniej.

Mity i legendy poziom 1:

- Baterie LiION są lepsze.

Z tym się ciężko polemizuje, więc spróbujmy zdefiniować „lepsze”:

Mity i legendy poziom 2:

- Baterie LiION są lekkie - nie mają efektu pamięci, więc można je doładowywać kiedy się chce! - Mają DUUUUŻĄ pojemność!

No, tu już się można ustosunkować (czyli przypieprzyć).

Zacznijmy od tego, że LiIONek jest trochę i to różnych. Canon pakuje w swoje BP-511 standardowe cele przemysłowe, produkowane m.in. przez GP: <http://www.gpina.com/pdf/GP1750L110.pdf> GP1750L110, czyli średnica 17mm długość 50mm pojemność 110(0)mAh AKA rozmiar A.

Panasonic robi je również, ale w dużo niższej pojemności (800mAh). Sanyo robi podobne cele, o 1mm większe (nie całkiem mieści się w standardzie A, a i do standardowej obudowy BP-511 nie za bardzo wlezie, zamienniki bazujące na Sanyo muszą mieć nieco cieńszą skorupkę) i o połowę większej pojemności, ale Canon ZTCW ma kontrakt z GP, a nie z Sanyo :D

Zresztą, wała im, nie chodzi o to kto komu, tylko dlaczego. GP publikuje najwięcej informacji o swoich celach LiION, więc weźmy je na tapetę. Cele równoważne danej w technologii NiMH to:

- GP250AFH produkcji GP (2500mAh): <http://www.gpina.com/pdf/250AFH.PDF>,
- HHR210A Panasonica (2100mAh): http://www.panasonic.com/industrial/battery/oem/images/pdf/Panasonic_NiMH_HHR210A.pdf

Dalej the best a cat can get w dziedzinie high-capacity-low-drain z NiCd to:

- GP140AFK od GP (1400mAh min, 1500mAh typ.): <http://www.gpina.com/pdf/140AFK.PDF>
- P-140AS Panasonic (1400mAh): http://www.panasonic.com/industrial/battery/oem/images/pdf/Panasonic_NiCd_P-140AS.pdf *UWAGA:* te cele mają ograniczoną zdolność do rozładowywania wysokimi prądami (w stosunku do zwykłych NiCd)

No, zakasaliśmy rękawy, mamy materiał, to bieriom się do roboty: Najpierw sprowadźmy się na ziemię jeśli chodzi o pojemności. mAh to nie jednostka energii, więc trzeba się jakoś doprowadzić do SI (kto chce, może lecieć dalej do interpretacji, bo tu leci stado statystyki): dla wnikliwych jest Tabela 2.1.

2.2 Czytacie jeszcze?

No dobra.

I co z tego wynika?

Na start: NiCd w zastosowaniach foto się skończyły. Serie wysokiej pojemności nie podchodzą z tą pojemnością w pół drogi do NiMH, a jednocześnie tracą swoje obciążalności. Cele wysokich mocy są dostępne w obudowach minimalnie sub-C i nie grzeszą wielkimi pojemnościami (w stosunku do objętości), a foto nie potrzebuje rajdowych mocy które starczą na 5 minut.

Jeśli chodzi o czas życia, czyli całkowity ładunek przechodzący przez celę, to przy łagodnej eksploatacji LiION są warte tyle samo, co NiMH. Ze statystyki wyżej wynika 25% na korzyść LiION, ale tylko przy założeniu, że NiMH nie wytrzymają więcej niż 500 cykli, a te 500 dla LiION podawane jest jako *typowy* czas życia, a dla NiMH *minimalny* czas życia. Zgadnijcie, co to znaczy.

Dalej: Aparaty cyfrowe mają tę upierdliwą wadę, że ciągną sobie spokojnie niewiele prądu, ale przy zoomowaniu, ostrzeniu, robieniu zdjęć potrzebują chwilami dużo mocy. Dla kompaktowych cyfraków nie jest to aż tak widoczne, bo tam LCD, podświetlenie, matryca pracują cały czas. Aparat zasilany typowym BP511 (NP-400 u Minolta, BLM-1 u Olympusa, te same cele) ma do dyspozycji maksymalnie 7.5 W mocy ciągłej i łączny ładunek 8.4 Wh. (btw: jeśli aparat zdycha w krócej niż godzinę, to znaczy, że przeciąża accu lub accu jest do rzyci)

Aparat zasilony taką samą baterią dwóch cel NiMH miałby do dyspozycji 17 W mocy ciągłej przy 6.2 Wh całkowitej pojemności (zakładając, że średni pobór mocy jest dużo mniejszy od tych 17 W). To pół prawdy, bo dla LiION wyższa moc rozładowania robi się niebezpieczna, więc kontroler baterii musi odciąć obciążenie przy max. ca. 10 W. Natomiast NiMH wyżyją i przy wielokrotnie większym obciążeniu, byle by było chwilowe, więc de facto możemy np. pociągnąć i 50 W coby szybciej klapnąć lustrem lub migawką.

Bajki o doładowywaniu LiION bezkarnie należy odstawić na półkę: cykle ładowania dla LiION są względnie ograniczone, więc doładowując co pięć minut zajdziemy celę bardzo szybko, mimo, iż niemal do końca będzie miała (nie gorszą niż zadana 70%) nominalną pojemność. Fajnie i tak z tym doładowywaniem, ale LiION wymaga zaawansowanej elektroniki do kontroli ładowania, rozładowania i ogólnego nadzoru stanu ogniwa. Jeśli tę samą złożoność zaaplikować do baterii NiMH dostajemy ładowarkę mikroprocesorową, która co kilka cykli sama rozładuje accu przed ładowaniem na nowo, więc efektu pamięciowego nie uświadczymy, a cela będzie żyła mimo doładowywania — dłużej :D

Tablica 2.1: trochę statystyki

LiION:	
zakres nominalnych rozładowań:	220 do 1100 mA
przy 220 mA:	
średnie napięcie ogniwa	ca. 3.8 V,
średnia moc oddawana	0.84 W,
całkowita energia oddana:	4.2 Wh = 15 kJ
przy 1100 mA:	
średnie napięcie:	3.4 V
średnia moc oddawana:	3.75 W
całkowita energia oddana:	3.75 Wh = 13.5 kJ (1.5 kJ poszło w ciepłko)
Czas życia nominalnie:	500 cykli — do 70% pojemności.
Pojemność na końcu życia:	2.95 Wh max.
Całkowity ładunek przepompowany przez celę:	$500 \times (4.2 + 2.95) / 2 = 1.8 \text{ kWh}$
NiMH:	
zakres nominalnych rozładowań:	250 - 7500 mA
przy 250 mA:	
średnie napięcie ogniwa:	1.25 V
średnia moc oddawana:	0.3 W
całkowita energia oddana:	3.1 Wh = 11.25 kJ
przy 7500 mA:	
średnie napięcie ogniwa:	1.15 V
średnia moc oddawana:	8.6 W (!)
całkowita energia oddana:	2.6 Wh = 9.3 kJ
Czas życia nominalnie:	powyżej 500 cykli do 80% pojemności
pojemność na końcu życia:	2.5 Wh max.
Całkowity ładunek przepompowany przez celę:	$500 \times (3.1 + 2.5) / 2 = 1.4 \text{ kWh}$
NiCd: zakres nominalnych rozładowań:	
	140 - 4200 mA
przy 140 mA:	
średnie napięcie ogniwa:	1.3 V
średnia moc oddawana:	0.18 W
całkowita energia oddana:	1.8 Wh = 6.6 kJ
przy 4200 mA:	
średnie napięcie ogniwa:	1.18 V
średnia moc oddawana:	5 W
całkowita energia oddana:	1.24 Wh = 4.46 kJ
Czas życia nominalnie:	>500 cykli do 80%
pojemność na końcu życia:	1.45 Wh max
Całkowity ładunek przepompowany przez celę:	$500 \times (1.8 + 1.45) / 2 = 0.8 \text{ kWh}$

Przy NiCd norma życia to wtopa, bo to jest po prostu norma IEC, normalnie NiCd żyją do około 1000 cykli

2.3 Więc czemu tak na prawdę LiION?

Przede wszystkim ładowanie i utrzymanie accu na biegu jest tym łatwiejsze, im mniej cel ma. Elektronika cyfrowa lubi na wejściu mieć tak 3.6 - 4.8 V. NiMH potrzeba 3 cel. LiION wystarczy jedna. Małe aparaty, telefony itd zyskują na tym, bo jedna cela to jedna warstwa izolacji, prostsza ładowarka, dokładniejsza kontrola ładowania. Małe aparaty są powolne, oszczędne z mocami, więc nie ma problemu, że LiION nie dają się przeciążać, że przy -10°C mają 50% pojemności (aparat i tak nie ziębnie niżej zera, bo się go w kieszeni nosi), a niska efektywna żywotność nikomu nie przeszkadza, bo małe kompakty są eksploatowane łagodnie, więc te 500 cykli to pod dwa lata używania, a za dwa lata ten aparat będzie przestarzały.

Natomiast jak weźmiemy takiego 1DMKII z jego 8 klatek na sekundę, w tym samym czasie ostrzającego szkło 800 mm, zasilającego IS szkła, poganiającego Microdrive i procesor, który jest w stanie ten strumień danych obrobić, to mamy sytuację, że w spoczynku aparat ciągnie zerozeronic, a jak naciskamy spust, to nagle elektrownia dostaje po dupie. 1DMKII ma accu 12 V, czyli 10 cel NiMH. Załóżmy, że to te same cele formatu A. W wykonaniu NiMH może na piętnastopniowym mrozie (np. bateria wyciągnięta z bagażnika samochodu) dostać jak potrzebuje prawie 90 W ciągłej mocy, w krótkotrwałym szczycie prawdopodobnie nawet do ćwierć kilowata bez ryzyka uszkodzenia akumulatora. Gdyby go popędzić na baterii LiION nie dostałby nawet połowy ciągłej mocy, zapomnijmy o mrozie i o przeciążeniu powyżej ca. 60 W. Przy tym żywotność akku NiMH jest w takiej eksploatacji większa, bardziej przewidywalna (ostrzeżenie o końcu życia może realnie przyjść odpowiednio wcześniej, a nie pięć cykli przed dwunastą akurat jak reporter siedzi w okopach w Afganistanie).

IMO to jest przyczyna zapakowania NiMH w 1DMKII i LiION we wszystko poniżej o mniejszym apetycie na moce. . .

Rozdział 3

matryce CCD

Przy okazji wątku o A2 się mi napisało, a jako że ma to związek nie tylko z A2, postanowiłem przerzucić kopię „luzem”. Uprasza się o uzupełnianie/prostowanie niejasności i nieścisłości.

Jedziemy. Będzie długaśnie.

Nie mam ochoty na wojnę z ludźmi, którzy uważają, że wystarczy, jak aparat nie szumi przy ISO50 i 1/1000 sekundy, więc nie będę się wypowiadał na temat A2, czy jakiegokolwiek aparatu w szczególności, a naskrobię sobie o CCD i temu podobnych.

Będzie technicznie, ale jakieś wnioski powinno się dać wyciągnąć bez słownika wyrazów obcych i przekleństw egzotycznych.

Zacznijmy od tego, co to jest CCD, ale od tej elektronicznej strony. Ponieważ nie jest to moje źródło utrzymania, moja wiedza może mieć poważne merytoryczne luki, więc, jeśli ktoś tu jest z tematem za pan brat, to proszę ewentualnie o szybką korektę. Jednocześnie zapewniam, że w wyjaśnienie tematu włożyłem więcej niż pogapienie się w sufit, a pewne uproszczenia (nazwijmy to *daleko* idące) są celowe, fizyka półprzewodników nie jest mi całkowicie obca, ale jak wyjedziemy tu z równaniami to się audyencja rozejdzie do domów. Kto ma ochotę na fizykę, niech wrzuci w google parę zapytań typu CCD structure, principle of operation, physics itp. Jest dość literatury na temat. To jest pogadanka dla humanistów ;D

Tak zgrubnie CCD można podzielić na takie, które do pracy potrzebują zewnętrznej migawki i takie, co jej nie wymagają. W życiu pokrywa się to z podziałem na kompakty i lustrzanki¹. Kompakty (z racji na celowanie na LCD) muszą być wyposażone w matryce pozwalającą „nagrywać” „video”, tj. pracować bez kłapania migawką.

CCD to w uproszczeniu jedna wielka dioda krzemowa. Podłoże (tzw. substrat) jest typu p, wierzchnia warstwa typu n. Na takim waflu nałożona jest cieniutka warstwa izolatora, a na to . . . ale o tym dalej. Padające na krzem światło powoduje wybijanie pojedynczych elektronów z ich orbit i tworzenie w ten sposób par dziura-elektron (ładunek dodatni i ładunek ujemny). Gdyby ten kawałek krzemu był jednorodny, „naturalny” taka para ładunków zaraz by się z powrotem połączyła i cześć. Jedyne efekty, to podgrzanie krzemu. My mamy jednak dwie „warstwy”, jedna z „niedoborem” ładunków dodatnich, druga — ujemnych. W obrębie granicy tworzy się wbudowane pole elektryczne. Takie rozbite uderzającym fotonem pary $\oplus \ominus$ nie mają szansy się znowu połączyć, bo to pole „ciągnie” je w przeciwne strony. Elektrony w

¹Mimo to np. Nikony używają elektronicznej migawki również w lustrzankach

kierunku powierzchni, dziury w podłożu. Dziury nas nie interesują. Giną w czeluściach substratu, papa im mówimy i tyle. Zbieramy elektrony.

Jak już napisałem, cała struktura p – n przykryta jest izolatorem. W ten sposób uwięziliśmy elektrony — w głąb nie uciekną, bo je stamtąd pole elektryczne wygania, w górę nie prysną, bo izolator ich nie przepuści... zaraz, ale na boki mogą pełzać... No jak mogą, to i będą pełzać.

Coby pełzaniu zapobiegać, na wierzch izolatora naniesiemy elektrody. Podłużne, wąskie paski ciągnące się przez całą szerokość sensora. W równych odstępach. Naładujemy je dodatnio. Ładunki dodatnie i ujemne się przyciągają, więc teraz (ujemne) elektrony przyciągane dodatnim ładunkiem elektrod będą gromadzić się pod nimi — jak pod dachem. Wygenerowany fotonem elektron prysnie pod najbliższy „daszek”. Gdyby nie było tego izolatora, to elektrony dolazłyby do tych elektrod i uciekły. Ale mamy izolator.

Zaraz. Ale to nam załatwiło połowę problemu. Elektrony nie uciekną na powierzchnię, ani w głąb, ani w górę, ani w dół, ale mają jeszcze swobodę w lewo i w prawo. Pomysł, aby paski elektrod poszatkować w małe kwadraciki niestety nie zda egzaminu, bo jakoś trzeba nimi móc sterować, a doprowadzić prąd można tylko z brzegu sensora. Doprowadzenia będą tak samo przyciągać ładunki, więc sorry. Rozwiązanie problemu to zaszyte pod powierzchnia izolatora pionowe wąskie paski domieszek, dzielące „równinę” sensora na „rowy”. Taaa... widzicie już „pixele”? Wcale nie takie podzielone jak by się wydawało, nie? Podział raczej płynny i polegający na strefach oddziaływania...

OK, dość chrzanienia, zebraliśmy ładunki na kupki, teraz czas coś z nimi zrobić. Zebraliśmy, czyli naświetliliśmy zdjęcie — w miejscach, gdzie było jaśniej, więcej fotonów padło na nasz kawałek krzemu i więcej elektronów zostało naprodukowanych i teraz siedzą pod daszkiem. Tam, gdzie było bardzo ciemno siedzi jeden, może dwa samotne i trzęsą się z zimna.

Trzeba to jakoś wydostać. Z racji na budowę sensora ładunki nie mogą się poruszyć na boki, bo trafiają na te kanały, nie mogą też spłynąć w głąb, więc musimy je wyprowadzić z góry na dół wzdłuż kolumn. Jeśli rozładujemy te „daszki” przestaną one przyciągać elektrony i pozwolą im płynąć. Niestety w ten sposób rozplną się one „po kościach”. Aby je poprowadzić naniesiemy między każdymi dwoma podłużnymi elektrodami dwie ekstra. Normalnie nienaładowane, więc i nie wpływające na gromadzenie się ładunków. Teraz, przy odczycie, pomogą nam wyciągnąć ładunki na zewnątrz. Ruchem robaczkowym.

Ładujemy dodatnio sąsiednie, oczko niższe elektrody względem tych, co mieliśmy naładowane. Elektrony przyciągane są ociupinkę dalej. Rozładowujemy „starą” elektrodę — elektrony przyciągane są tylko przez te „nową” — przesunęły się znowu kawałek dalej itd.

Ponieważ zawsze pomiędzy dwoma „naładowanymi” miejscami jest kawałek przerwy, elektrony zebrane w różnych miejscach nie przemieszają się nam. Na samym dole CCD czeka drugi taki dynks, tym razem przesuwający ładunki z lewa na prawo. W ten sposób ostatecznie wypływają porcyjki elektronów pixel za pixelem. Teraz trzeba te elektrony policzyć i git.

Dla tych, którym ten opis zrobił się dziki, tutaj jest plik powerpointa całkiem ładnie i czysto tłumaczący sprawę (tyle, że po angielsku):

www.ing.iac.es/~smt/CCD_Primer/Activity_1.ppt

Co nam z tego wynika?

1) W najlepszym wypadku dostajemy 1 elektron na 1 padający foton. W praktyce

jest gorzej, bo część fotonów się od krzemu odbije, część zostanie pochłonięta bez generacji wolnych elektronów, część będzie miała za małą energię do wybitcia elektronu (światło głębsze niż czerwone zasadniczo przelatuje przez krzem bez przystanków po drodze)... Elektrony później można tylko tracić. Nie ma żadnego manewru, który raz utracone elektrony nam „urodzi”. Można „namnożyć” te, które zostały, ale nie przywróci to informacji.

- 2) Ilość fotonów padających na cm^2 powierzchni określa, ile maksymalnie możemy dostać elektronów. Jest to niezależne od budowy i technologii CCD. Przy danej ilości światła padającego na kawałek krzemu (przysłona obiektywu, ilość światła w scenie) dostaniemy *maksymalnie* tyle a tyle elektronów. Finito.
- 3) Optymalizacje technologii mogą nam dać „tylko” mniejsze straty.

Jedziemy dalej. Teraz będzie mniej opisów.

Podstawowy sensor jak obsmarowany wyżej nie pozwala na pracę bez migawki. Trzeba go naświetlić, światło zamknąć i odczytywać. Inaczej do przesuwanych ładunków będą cały czas dołączać nowe, generowane padającym światłem. To się nadaje do lustrzanki, ale nie do kompakta. Trzeba sprawę ulepszyć.

Ulepszono to tak, że każdą kolumnę podzielono znowu na dwie części, jedna jest światłoczuła, a druga przykryta paskiem metalu (nieprzezroczystym). Po naświetleniu matrycy przesuwa się zebrane ładunki najpierw na tę ciemną stronę (tak samo, jak je przesuwaliliśmy w dół), a dopiero potem robaczkowo ciągnie w dół. W tym czasie światło może sobie dalej padać, bo nowe ładunki nie dołączają do tych transportowanych. Niestety, płacimy za to tym, że część sensora jest nieczuła na światło. Rada na to (i nie tylko na to) są tzw. mikrosoczewki, które łapią światło z całego „pixela” i skupiają je na tej mniejszej światłoczułej powierzchni. Czuła powierzchnia jest mniejsza, ale dostaje silniejsze światło, więc strata jest w dużym stopniu skompensowana.

Dobra. A co to ma do nas?

- 1) mamy więcej etapów transportu. Więcej możliwości przecieku elektronów.
- 2) Rozmiar pixela... Właśnie... Co określa jak duży jest ten pixel!? Przecież względnie sztywne granice mamy tylko po bokach... .

Ano w dużej mierze rozmiar pixela wynika z siły pola i struktury domieszkowania krzemu, to w efekcie daje jakby „dołek” energetyczny, gdzie zbierają się elektrony. „dołki” powinny być jednakowe, bo pixele są jednakowe w założeniu. Niestety jak rozmiar dołka zaczynają określać relacje sił pola elektrycznego, to nawet małe zmiany w rozmiarach i położeniu elektrod mogą nam te granice poprzesuwać. Stąd przy zadanej dokładności procesu produkcji CCD dostaniemy jakiś, zadany błąd rozmiarów pixela.

A jak to się ma do fotografii?

Załóżmy, że fotografujemy równomiernie białą plamę. Każdy pixel powinien dostać taką samą ilość elektronów. Ponieważ niektóre pixele są większe, zbiorą ich więcej (mają więcej powierzchni na łapanie). Po odczytaniu i zmierzeniu zostaną zinterpretowane jako JAŚNIEJSZE. Dostaniemy na obrazie tzw. fixed pattern noise, czyli szum, który się nie zmienia w czasie. To jest ta część szumu, którą można programowo skompensować prawie zawsze, wystarczy zrobić jedną pomiarową ekspozycję idealnie równego naświetlenia i na tej podstawie obliczyć potrzebne współczynniki. Jest to robione niejako przy okazji podczas *dark frame subtraction*. Tolerancje produkcji

są dla jednej generacji matryc podobne, więc im mniejszy pixel tym większy rozrzut rozmiarów. Czyli 8MPiX będzie gorsze od 4, czy 5MPiX.

Następna sprawa to tzw. prąd ciemny, czyli te elektrony, które pojawiają się „znikąd” i nie mają nic wspólnego z tymi „zrobionymi” przez fotony. nie da się odróżnić jednych od drugich, więc policzone będą wszystkie. Prąd ciemny dla danej technologii można przyjąć za „stochastycznie stały”, więc ilość dorzucanych elektronów ni z gruszki ni z pietruszki jest (licząc na powierzchnię) stała. Samo w sobie nie stanowi to problemu, bo fotony też są nam dane na cm^2 powierzchni, więc bez różnicy, czy wytniemy małe, czy duże pixele, S/N powinien być podobny. Ale niestety prąd ciemny wpływa nam nie tylko z substratu, ale też przecieka przez „granice” pixela, więc im więcej tych granic nastawiamy tym będzie gorzej. W dodatku domieszkowanie substratu nie jest idealnie równomierne, drobne niejednorodności mają większą szansę się uśrednić w obrębie dużego pixela, mały zaś może sobie wyciąć akurat nieprzyjemny kawałek. Z tego wszystkiego wychodzi nierównomierność prądu ciemnego między pixelami... Tym razem zjawisko daje co prawda stały rozkład szumu, ale silnie zależny od czasu naświetlania i od temperatury. Można to zredukować przez odejmowanie ciemnej klatki (tzn. po normalnym zdjęciu robimy drugie, zbierając tylko te przeciekające elektrony i korygując poprzedni pomiar). Zasadniczo im więcej MPiX tym gorzej, bo więcej przypadkowych ładunków trafia do pixela.

Tyle o akwizycji obrazu. Teraz kwestia wydobycia elektronów już zebranych. Każde przesunięcie ładunków „o oczko” niesie ze sobą ryzyko strat. Jest to wyliczalne i stanowi parametr dla danej technologii. Im więcej transferów trzeba zrobić, tym większy błąd (większy margines elektronów, które mogły wsiąknąć). Średnio na odczyt matrycy $N \times M$ pixeli trzeba $N + M/2$ transferów. Dla 5MPiX potrzeba około 3 tysięcy przesunięć, dla 8MPiX potrzeba ok. 4 tysięcy. Niby tylko 30% różnicy, ale sprawność przeniesienia trzeba podnieść DO TAKIEJ POTĘGI aby dostać wynikowa sprawność transportu!!!

Ostatecznie docieramy do wzmacniacza/konwertera ładunek/napięcie, czyli naszego licznika elektronów. Tu nie ma przepros. Tu mamy z jednej strony wymóg szybkości (nie możemy czekać godziny na odczyt), a z drugiej — dokładności. Szum na poziomie 5 elektronów to praktycznie marzenia. Więc jeśli cela jest mniejsza, zbiera mniej elektronów, to tu jest kasa, gdzie się za to płaci.

Słowem: im większa rozdzielczość, tym mniejsze efektywne fotocele, tym większy wpływ prądu ciemnego, tym mniejsza odporność na ciepło, tym większe grzanie własne, tym większe straty transportu, tym mniejszy użyteczny sygnał, słowem, tym gorzej dla zdjęć.

Co robią producenci?

Mają jeszcze kilka pól do manewru. Goły CCD odbija 1/3 światła padającego prostopadle i więcej, gdy pod kątem. Mikrosoczewki niwelują drugi człon problemu, a pokrycia antyodblaskowe z dwutlenku hafnu dają redukcję pierwszego członu, ale są upierdliwe w CCD oświetlanych od frontu. Można zwiększać precyzję wykonania i jakość domieszkowania, ale to wszystko to MINIMALIZACJA STRAT. Z mniejszymi fotocelami zawsze dostaniemy mniej możliwych elektronów na pixel.

Wydaje się, że ze względu na dotychczasowa nieskalowalność wzmacniaczy odczytu, problemy z prądami upływu itd. optimum leży około 5MPiX na 2/3", powyżej szumy narastają raptownie.

To, czy szumy uwidocznią się na zdjęciu to nie tylko sprawa matrycy. Producenci zdają sobie sprawę z gorszego S/N dla matryc 8MPiX i wszyscy (poza Sony) zaprzęgli wydajne algorytmy redukcji szumu, więc zdjęcia bywa, że nie wyglądają źle. Ale matryca nie ma „zapasu” na cienie, na wyższe czułości, więc się można ugryźć.

No, to teraz mi dowalą, bo na pewno na grupie jest ktoś, kto się na tym dobrze zna i mi zaraz wszystkie błędy powytyka. . .

Rozdział 4

O kolorów widzeniu

O czym dzisiaj? a niech będzie, że pociągniemy dalej temat matryc. Ale nie przejdę od razu do CMOS, tylko będzie skok w bok, achronologicznie, alogicznie itp. Będzie o kolorze, dynamice i postrzeganiu barw. Myślę, że tutaj Jacek Zagaja miałby wiele do powiedzenia, na pewno mnie zgani za pobieżność, ale niech będzie, że to dla tych mniej kumatych :)

Żeby zrozumieć fotografię, trzeba zrozumieć własne oczy. Czyli zgłębić nieco zasadę kolorowego widzenia. No dobra, widzenia w ogóle. Zacznijmy od tego, że nasze oczy nie są prawie wcale czułe na kolor. Tak, dobrze słyszeliście, jasne, to jest przesadzone. Jednak naprawdę widzimy dużo wyraźniej jasność, niż barwy. Prędzej możemy rozróżnić dwie kropki obok siebie, niż to, że jedna jest czerwona a druga zielona. To sobie przyjmijmy za fakt i nie wnikajmy na razie dalej, na to przyjdzie jeszcze czas.

Wspomniałem coś o kolorach...

Mamy 3 rodzaje sensorów koloru w oku. Czerwony, zielony i niebieski... prrr! stop. Tak nas nauczono mówić i to wpada już w regułę. To nie są sensory reagujące na kolor!

Co to jest kolor? Światło to mieszanka różnej długości fal elektromagnetycznych. Trochę podobnie do dźwięku, który jest falą mechaniczną (uproszczenia warning). Różne barwy głosu składają się z różnych tonów. Dudnienie basu to głównie, ale nie wyłącznie, niskie tony. Wycie podstarzałej i przygłuchej śpiewaczki operowej to raczej tony wysokie. Bardzo rzadko spotyka się czyste, płaskie dźwięki w naturze — to raczej wytwór cywilizacji. Podnieś słuchawkę — ten ton to 440Hz, jednolity, monotony. Podobnie jest ze światłem: niemalże nie ma w naturze światła o jednej jedynej, czystej długości fali. Blisko tego są lasery, ale trudno zaliczyć je do natury :) Barwa światła to to, jakie długości fal są w nim obecne. Jest nieskończenie wiele kombinacji.

Nasze „sensory” światła nie są bardzo selektywne (tak się mówi o sensorze, który reaguje tylko na jeden rodzaj „sygnału” - tu na jedną długość fali). To, o czym mówimy, że reaguje na zielone, „piszczy” najsilniej oświetlone światłem w okolicach 560nm, a dużo słabiej „po bokach” — w kierunku 400 czy 700nm. Dużo słabiej, to nie znaczy, że wcale! Jeśli oświetlimy nasz „zielony” czujnik światłem czerwonym (okolicie 660 — 750nm) lub niebieskim (450nm) *też* zareaguje. Tylko *słabiej*.

Dzięki temu możemy w ogóle widzieć tęczę.

Weźmy teraz dla przykładu światło *żółte*. 575-600nm. Pobudzi zarówno nasz „zielony” jak i nasz „czerwony” fotodetektor. Mózg zakłada, że jest to światło żółte. Jeśli weźmiemy dwie lampki, czerwoną i zieloną i umieścimy blisko siebie, zobaczymy

je z daleka jako *żółtą*. Jeśli zaczniemy je oddalać od siebie, to patrząc na nie kątem oka (a nie centralnie) najpierw rozdzielią się nam na dwie *żółte* lampki, a dopiero potem staną zieloną i czerwoną. Mieszanka czerwonego i zielonego drażni w równym stopniu receptory „czerwony” i „zielony”. Tak samo, jak *żółte* światło. Mimo iż „kolor” („skład” światła) się zmienił, jego percepcja — nie.

No dobra. Mam nadzieję, że przynajmniej z gruntu się zrozumieliśmy. Czas pójść dalej. Na razie porozmawialiśmy sobie o kolorze *światła*. Ale co nas najczęściej interesuje na zdjęciu to kolory przedmiotów!

Co to znaczy, że powierzchnia ma jakiś kolor?

W zależności od swojej struktury materiały *odbijają* różne długości fali różnie. Czerwony kapturek odbija bardzo dobrze światło z okolic „czerwieni” (680nm) i dużo gorzej światło „niebieskie” (okolice 450nm). W świetle dziennym zobaczymy go jako czerwonego. Zauważcie, że napisałem „w świetle dziennym”. To, jak postrzegamy kolory sceny zależy od światła, które ją oświetla! Jeśli weźmiemy silnie monochromatyczną lampę świecącą na niebiesko, to... kapturek „zmieni kolor”. Po prostu ten czerwony materiał źle odbija światło niebieskie, ale jednak odbija, a z kolei światła czerwonego, które odbija bardzo dobrze, nasza lampa nie wysyła „w ogóle”, więc do oka dochodzi tylko odbite, słabe, niebieskie światło i drażni je tak, że widzimy... ciemny, *niebieski* kapturek.

W pewnych granicach nasz mózg kompensuje ten wpływ. Jeśli światło nie jest tak silnie „zabarwione”, a w scenie znajdują się przedmioty o znanych barwach, mózg automatycznie rozpozna kolor światła i „odejmie” go od tego, co melduje oko. Dzięki temu biała kartka wydaje się biała i rano i w południe i wieczorem. To się fachowo nazywa balans bieli. Ten biologiczny...

Jeśli użyjemy perfekcyjnego urządzenia, które „zamrozi” wpadające do oka światło, tak jak ono jest, idealnie, i przeniesie jakoś na papier, to takie „aptekarskie” zdjęcie będzie wyglądało *źle*.

Dlaczego?

Póki jesteśmy „w scenie”, działa wbudowana w nasz mózg kompensacja koloru światła. Jeśli oglądamy to samo na papierze, przeważnie oświetlenie jest już inne. Mózg kompensuje to inne oświetlenie, z tym nie ma problemu, więc widzimy dobrze kolory, które *są* na tym papierze, niestety w naszym przypadku nie są to prawdziwe kolory *sceny*, tylko *kombinacja* wynikająca z barwy światła oświetlającego scenę i tego, jak przedmioty w scenie odbijały światło. Nasz błąd polega na tym, że nie uwzględniliśmy profilu światła, którym scena była oświetlona. To się nazywa balans bieli. Ten fotograficzny... brzmi znajomo, co? Jednak coś trzeba zrobić na piechotę...

Jeśli uda nam się ustalić jaki jest „skład” światła padającego na obiekt, możemy obliczyć, jaki jest na prawdę „kolor” tej powierzchni. Jeśli wiemy, jak ta powierzchnia odbija światło, możemy tak zabarwić papier fotograficzny, żeby odbijał światło tak samo. Wtedy niezależnie od oświetlenia, przy którym fotografię oglądamy, kolory będą wyglądać prawdziwie — mózg skompensuje to oświetlenie, zobaczymy kolory tak, jakbyśmy je widzieli w rzeczywistości.

Proste? Jak świński ogon przedłużony drutem kolczastym.

Załóżmy, że naszym celem jest *wierna* oryginalnemu obrazowi fotografia. Czyli niekoniecznie artystyczna.

Dobry papier fotograficzny to biały papier. Czyli neutralny. Jeśli go naświetlimy do oporu, ma być czarny i nie odbijać nic, jak zostawimy kawałek nienaświetlony, to powinien odbijać równie dobrze światło o dowolnej długości fali. *Załóżmy*, że mamy ten ideał, analogowa część nas nie interesuje chwilowo.

Zgromadziliśmy już całkiem sporą kupkę oderwanych informacji, które z fotografią wydają się mieć luźny związek, trzeba by coś konkretnego zacząć pisać, nie? No to wio. Wiemy, że światło białe ma widmo ciągłe, wiemy, że nasze sensory nie działają nader selektywnie i samplują dość szeroko w widmie. Wiemy, że wrażenie koloru powstaje poprzez różne stopnie pobudzenia trzech rodzajów sensorów o maksimum czułości w okolicach 420nm (niebieski), 530nm (zielony) i czerwony (maksimum na 560nm, właściwie to to jest żółtawy, a wrażenie czystego czerwonego jest gdy różnica między tym, co czuje zielony i czerwony wzrasta, choć nie jest to wtedy maksimum czułości).

Do kupy rzecz biorąc zasadniczo możemy okantować oko mieszając mu trzy kolory i ono „zobaczy” dowolny kolor tęczy.

W poprzednim odcinku *Wykładów Gościennych* nabazgrałem o sensorach CCD. Pisałem o czułości i łapaniu fotonów i robieniu elektronów. Nie napisałem nic o rozróżnianiu barw, bo... sensor sam z siebie ich nie rozróżnia. Każdy pixel potrafi tylko z grubsza określić ile fotonów dotarło do niego. Nie wie nic o ich energii, a zatem o długości fali. Możemy jednak wykorzystać oszczędność Mamuśki Natury... Jako, że nasze oko nie rozróżnia dowolnych barw, a tylko intensywność trzech składowych, możemy zrobić tak, aby sensor oglądał świat tak samo, jak nasze oczy — to znaczy rejestrował, jak silnie w danym miejscu obrazu pobudzany *byłby* biologiczny czujnik „czerwonego”, jak „niebieskiego” i jak „zielonego”. Wystarczy nałożyć na każdego pixela kolorowy filtr o charakterystyce zbliżonej do odpowiedniego „czujnika” oka. Problem polega jednak na tym, że krzem jest mało czuły na światło w głębokiej czerwieni i bliskiej podczerwieni, a z kolei struktury naniesione na powierzchnię krzemu ograniczają docieranie światła do krótkich falach, czyli fiolet i bliskie UV. Stąd też wiele aparatów źle oddaje głębokie fiolety i „ciekawe” czerwienie. Poza tym plan się prawie udało. W zależności od jakości filtrów jest lepiej lub gorzej, ale jest.

Co nas to kosztuje?

No primo, filtr kradnie „trochę” światła dla siebie. Secundo jeden pixel widzi na raz tylko jedną składową. Co do pierwszego — no nie ma rady, jak nie interesują nas wszystkie fotony, to część musimy wyrzucić, albo rybki albo pipki, jedyne rozwiązanie, które tego nie robi, to ten Sigmowski wynalazek p/t Foveon, ale on za uszami swoje też ma. Drugie to... nie problem. Nasze oko też w każdym punkcie widzi tylko jedną składową, jeśli w ogóle jakąś widzi, bo bardzo dużo sensorów w ogóle koloru nie wyczuwa. Na tym zasadza się wynalazek zwany matrycą Bayerowską. Sensory czułe na zielony, czerwony i niebieski pakujemy na przemian blisko siebie, dla wynikowego obrazu *jasność* punktu bierzemy z jasności zmierzonej przez pixel (nie ważne, że wiemy tylko o jasności np. czerwieni, zakładamy, że jest reprezentatywna) a *kolor* liczymy z kombinacji danych z tego sensora i okolicznych. Taki manewr pozwala *rozróżnić* dwa punkty odległe od siebie o 2 pixele, ale *kolor* dostrzec dopiero gdy są większe i dalej rozsadzone. Taaa... A nasze oko to co? Ano to samo. Czyli jeśli nie przeginamy pały i pixel z aparatu przeniesiony na papier, przy oglądaniu będzie na siatkówce podobnych rozmiarów jak pojedyncza światłoczuła komórka oka (w skrócie: jak fotka będzie miała około 250-300DPI :D), to nie da się zauważyć, że kolor jest mniej dokładnie mierzony.

Dobra. Doszliśmy nieco po łebkach to wspomnianego na początku aptekarskiego zdjęcia. Mamy narzędzie, które pozwala stwierdzić, ile i jakie światło ze sceny przychodzi. Jeśli zrobimy pstryk i przeniesiemy dane na papier, kolory będą nienaturalne. I tu pojawia się coś, co różni dość mocno aparaty producentów typu Pentagram od aparatów producentów, którzy w temacie doświadczenie mają: rzeczony balans bieli. Gdy używamy własnych oczu mózg korzysta z pamięci, aby zgadnąć, jaki kolor ma

światło w danej scenie. Jeśli widzimy wszystkich ludzi z zielonymi twarzami to (o ile nie jesteśmy na łajbie, którą nieco buja) najpewniej światło jest zielone. Jeśli światło bardzo różni się od słonecznego, nasz własny „procesor” nie zrobi nam neutralnych kolorów, ale w dużym stopniu efekt oświetlenia usunie. Można się o tym łatwo przekonać — zrobić zdjęcie aparatem z WB na sztywno na światło żarowe, wziąć burdelowoczeroną żarówkę, pstryk: było czerwono, ale na zdjęciu wygląda bużo bardziej czerwono, nie?

Aparat na AWB musi zrobić to samo, co nasz mózg załatwia w tle — zgadnąć, jakie światło panuje w scenie. Niestety nie jest dość inteligentny, żeby umieć odróżnić, że to jest kumpel, powinien być różowojasny, to ściana, ten zielonkawy kolor to prawdziwy, a to nasz kolega z Konga i nie ma co kombinować, on taki czarny z natury. Najprostszy algorytm zakłada, że scena jest „średnio szara”, tj. suma wszystkich barw z wszystkich pixeli daje w sumie biel. Na tej podstawie oblicza się, jakiego koloru światła było w scenie więcej, jakiego mniej i próbuje dopasować kilka typowych źródeł oświetlenia — żarowe, jarzeniowe, słoneczne, skylight (rozproszone światło „z nieba”). To zdaje egzamin na imieninach u Cioci, ale rezultaty i tak bywają różne. Aparaty, które mają możliwość ustawienia ręcznego balansu bieli bazują na fotografii szarej/białej kartki — zakłada się, że całe spektrum odbijane jest od niej tak samo, więc to, co matryca dostaje to kolor samego źródła światła — można go wtedy określić bardzo dokładnie.

Niestety wszystko to i tak diabli biorą, jak źródła światła w scenie jest kilka i to różnych (np. rodzinka w domu przy żarówkach, na tarasie światło pochodni, a ogród oświetlony zachodzącym słońcem). Na to nie ma mocnych, aparat tego dobrze sam nie robi, nasz łepetyna też sobie źle radzi — patrz oświetlone czerwono mięso w hipermarketach + halogeny nad jarzynkami... a hala oświetlona zimnym, świetłówkowym światłem... :P

No i super. Zrobiliśmy co się dało, ale... przydałoby się pokręcić, zobaczyć te zdjęcia, w końcu mamy komputer, możemy zobaczyć coś na ekranie... nie?

No niby...

Ale jest taki problem: Ekran monitora nie odbija światła. On świeci własnym światłem. A nasza maszynka do eliminowania wpływu oświetlenia działa nadal (!!!!) Ewolucja zmajstrowała nam tę maszynkę zanim wymyśliliśmy monitory. Zakłada, że jak coś świeci, to odbija światło otoczenia. Czyli aby dobrze widzieć kolory na ekranie, „białe” powinno wyglądać tak, jakby od białej kartki odbijało się światło w pokoju. Stąd zalecenie, aby monitor ustawić na punkt bieli 6500K. Światło słońca w pogodny dzień ma właśnie temperaturę barwową około 6500K, więc w pokoju oświetlonym dziennym światłem białe pole na monitorze będzie postrzegane jako prawidłowo białe, jeśli będzie świecić też 6500k. Oczywiście, jeśli pracujemy przy zwykłych żarówkach (światło poniżej 3000K), postrzeganie barw będzie nieco zakłócone — biel będzie wyglądać zimniej niż powinna...

A teraz drogie Dzieci, misiu z okienka idzie spać. A jak się Wam nudzić będzie i przekopiecie się przez tę chaotyczną klepaninę, to możecie pytać śmiało, a ja pewnie i tak nie będę wiedział :O)

Rozdział 5

jaką wielkość ma pixel?

- > No właśnie :-)
- > Milimetr mogę sobie zobaczyć, gram wziąć w rękę itd,
- > a jaką wielkość ma piksel?
- > Wiem, że 1 piksel, ale może ktoś poda w
- > jakichś sensowniejszych jednostkach :-)

Już chyba każdy napisał co o tym sądzi, więc ja — nie wnikając co gdzie i kiedy — spróbuję to trochę usystematyzować.

Pixel jest bezpośrednim zlepkim od Picture Element, czyli fragment obrazu. Jest w technice cyfrowej tym samym dla obrazu, czym próbka (sample) dla dźwięku. Przyrównać to można w pewnym sensie do pojedynczego ziarna emulsji — mniejszego detalu nie zarejestrujesz.

Geometrycznego sensu pixel nie ma. Jego najbliższym odpowiednikiem jest — często mylnie nazywane pixelem — ‘photosite’ matrycy, czyli pojedynczy czujnik światła.

Rozważmy przez chwilę drogę sygnału od momentu, gdy jest światłem odbijającym się po scenie, do momentu, gdy zostanie przedstawiony na odbitce „cyfrowej”. Dla uproszczenia zanalizujemy tylko jedną „linię” obrazu, żeby uniknąć złożoności związanej z odwzorowaniem $\mathbb{R}^2[x, y] \rightarrow \mathbb{R}^3[Y, U, V]$.

Przyjmijmy też do wiadomości, że mimo, iż oko ludzkie wyposażone jest w sensory składowych R, G i B, to układ oko+mózg postrzega obraz w kategoriach luminancji (jasność) i chrominancji (barwa). Ujmując to nieco analogowo nasze oczy widzą jak „kanapka” z drobnoziarnistego i wysokoczułego materiału cz/b z podłożonym chamskim, ziarnistym negatywem ORWO przeterminowanym o trzydzieści lat.

Co jest zadaniem techniki w fotografii? Wziąć rozkład jasności i barwy w scenie tak, jak „widzi” to optyka kamery i „zamrozić” a następnie odtworzyć dla widza. Bio-rac pojedynczy „plasterek” sceny dostajemy linię o wahającej się luminancji i chrominancji. Te zmiany należy zarejestrować. W analogu ta linia pada na warstwę(-y) emulsji światłoczułej i prowadzi do odpowiedniego zaczernienia/zabarwienia/zasyfienia/whatever przezroczystego negatywu. W technice cyfrowej rozkład musi zostać zdyskretyzowany przestrzennie i amplitudowo, tzn. należy zmierzyć wartość (natężenie) padającego światła w (najlepiej) równych odstępach, a zmierzone wartości zamienić na liczby całkowite. Każda taka kompletna próbka to pojedynczy *pixel*.

W przypadku normalnych matryc krzemowych kwantyzacja przestrzenna załatwiona jest przez podział powierzchni światłoczułej na poletka o określonej powierzchni

i lokalizacji. Kwantyzacja wartości jest załatwiana za nas, bo światło ma naturę dyskretną i pół fotonu paść nie może, ergo, liczba elektronów musi być całkowita. Ponieważ liczenie elektronów odbywa się w sposób niedokładny, to efektywna rozdzielczość kwantyzacji amplitudy spada o następne n rzędów wielkości, $n > 0$.

Ponieważ pixele są monochromatyczne, to na każdy photosite dostajemy przybliżoną informację o luminancji, ale dla info o chromie potrzeba kwadratu 4 pixeli, ergo, zapisanie 4MPix na podstawie info z 4MPHOTOSITES jest lekkim naciąganiem, ale zostało uwzględnione np. w zapisie JPEG, który domyślnie na 4 pixele zapisuje lumę o 4, a chromę o 2, lub wręcz tylko o 1 (zapis 4:2:2 i 4:1:1, znane również jako color channel subsample).

Teraz należy sobie przypomnieć twierdzenia Nyquista i tak dalej, to znaczy, jeśli bierzemy n próbek na jednostkę długości, to najmniejszy dostrzegalny detal nie powinien być mniejszy niż $2 \times [\text{jednostka}]/n$, ergo, primo, sygnał należy przed samploowaniem filtrować (rozmazując lekko detale, czyli zacierając szczegóły zbyt małe do poprawnego zanalizowania), secundo, filtrowanie należy zaprowadzić również przy *odtwarzaniu*. Mianowicie postrzeganie pixela jako kwadracika jednej barwy jest bzdurą: sugeruje, że mogliśmy zaobserwować i zapisać tak drobny detal, jak raptowną zmianę koloru przy przejściu od 1 do 2 photosite.

Przy naświetlaniu papieru jest to oczywiste: nie ma doskonałych obiektywów, więc jeśli wyświetlimy nasze zdjęcie „kwadracikami” na papier, to na papier już nie dojdą kwadraciki, tylko nieco rozmyte plamki i przy odpowiednim rozmyciu zdjęcie będzie wyglądało ostro. Na monitorze CRT sprawa jest jeszcze prostsza: sygnał cyfrowy — wartości kolejnych pixeli — zamieniany jest na analogowy (wartość napięcia sterującego działem elektronowym), filtrowany i pchany w rurę, ergo nie ma szans na schodki. To jest też przyczyna, dla której fotografie na monitorze LCD podpiętym po DVI wyglądają koszmarnie — brakuje filtrowania kantów na wyjściu, sygnał jest odtwarzany bez ograniczenia pasma i widać w nim szum kwantyzacji — ostre krawędzie pixeli.

jaśniej?

;P

Rozdział 6

matryce CMOS

Długo obiecywana kontynuacja kwestii matryc, rozpoczęta {dwa rozdziały temu}
Dzisiaj:

6.1 o co chodzi z CMOS?

Sensory CMOS pojawiły się jeszcze wcześniej niż CCD, już w późnych latach 60-tych. Wynalazek CCD datowany jest na ca. 1970. CCD na początku zdominowało rynek ze względu na lepszą jakość dostarczanego obrazu: chip mimo dość drogiej produkcji (nietypowy proces, inny niż standardowych scalaków) jest strukturalnie w miarę prosty. Wada CCD jest w niego niejako z definicji wbudowana: żeby zgromadzony ładunek zmierzyć, trzeba go wyprowadzić poza obręb matrycy. Ze względu na proces produkcji nie można zintegrować elektroniki sterującej matrycą na tym samym klocku krzemu, więc primo układ się komplikuje (zewnątrzne scalaki są niezbędne), a secundo szumy wywołane utratą ładunku w transporcie są nie do wyeliminowania.

6.2 O co poszło najpierw?

O pieniądze oczywiście.

Pierwszy renesans CMOSów nastąpił w momencie integracji kamer we wszystko co się rusza. Jeśli coś ma być tanie nie może zawierać 4 scalaków i kilkudziesięciu pierdół i na czubek żreć wata mocy. Tak, CCD żrą prądu ile wlezie. CMOS, mimo podówczas znacząco gorszej jakości obrazu, miały tę zaletę, że na jednym kawałku krzemu dało się upchnąć wszystko - sensor, elektronikę nim sterującą, wzmacniacze, ADC, a na koniec to wszystko wymagało tylko jednego zasilania 3.3V i paru mA prądu.

Przeskakując kawałek historii zajmijmy się tym, co się dzieje obecnie: Mamy rozwiniętą technologię CCD, która nadal dostarcza bardzo dobrego obrazu. Wszystkie kompakty mają chipy CCD. Dlaczego ktoś się w ogóle pcha z lustrzankami w CMOS, zamiast udoskonalić CCD?

6.3 O co idzie teraz?

O pieniądze oczywiście. . .

CMOSy można robić na jednym waflu z innymi scalakami. CCD nie. Póki mowa o formacie paznokcia, takich sensorów mieści się na wafle *dużo*. Odpad z okrągłego

plastra krzemu można odzalać. Ale jak mamy robić sensory o rozmiarze klatki, to jakby z tych okrągłych wafli mniej daje wykroić. W dodatku ciąg produkcji CMOS jest unormowany, znany i rozwijany przy okazji robienia coraz szybszych CPU. CMOS zrobić jest zwyczajnie taniej. Ale samo to nie byłoby wystarczającym powodem do pchnięcia nowej-starej technologii na stół defibrylacyjny.

CCD są dobre póki są małe. Przy małych pixelach CMOS daje dupy, bo wymaga bardziej skomplikowanej struktury która kradnie przestrzeń światłoczułą. Ale gdy rozmiar matrycy rośnie ta różnica zanika, za to CCD zaczynają chorować na pojemności elektrod sterujących — wymagają coraz wyższych napięć sterowania i coraz większych prądów aby utrzymać sensowną prędkość odczytu i nie tracić danych po drodze. Poza tym defekt (hotpixel to jeszcze nie defekt) pojedynczego pixela CCD najczesciej ubija całą linię, CMOS — niekoniecznie.

6.4 Więc co różni konstrukcyjnie CCD i CMOS?

w CMOS APS (APS = Active Pixel Structure, nie chodzi o rozmiar chipu) ładunek nie jest wyprowadzany ze studni potencjału pixela w momencie odczytu, tylko „ważony na miejscu” a „wynoszona” jest już informacja o jego wielkości. To pozwala na ten przykład czytać pixele w dowolnej kolejności. Pozwala też kilkukrotnie odczytać ten sam pixel bez zmieniania jego wartości.

subsectionJak? W sensorze CMOS-APS w odróżnieniu od CCD nie mamy jednej wielkiej powierzchni zbierania ładunku, bo nie ma potrzeby tego ładunku potem ruszać. Chip stawiany jest na substracie p, tak jak CCD, na środku każdego pixela wstawiany jest kawałek n tworząc diodę. To jest nasza fotodioda. Jest zauważalnie mniejsza od powierzchni pixela, o tym później. W kącie, możliwie małe, upchnięte są trzy tranzystory MOS:

schemat: <http://img146.exs.cx/img146/1255/photosite8kj.jpg>

- jeden (M1) na żądanie podłącza „rdzeń” (fotodiodę) do „+” zasilania. To jest reset pixela — wszystkie zgromadzone elektrony uciekają.
- drugi (M2) jest bardzo istotny: to jest nasza „waga” do zgromadzonego ładunku. W zależności od wielkości ładunku zgromadzonego w obrębie fotodiody przewodzi on lepiej lub gorzej, tym samym wzmacniając „złapany” sygnał.
- trzeci (M3) na żądanie podłącza wyjście z (M2) do wyjścia matrycy. Pozwala wybrać, który wiersz w danym momencie będzie czytany.
- Bramki tranzystorów (M3-select) każdego pixela połączone są wierszami.
- Uaktywnia się zawsze na raz cały wiersz.
- Tak samo bramki sterujące (M1-reset) — kasuje się też cały wiersz na raz, zazwyczaj zaraz po odczytaniu.
- „czytać” dany wiersz można dowolna ilość razy, czytanie nie zabiera nam stamtąd ładunku.
- Wyjścia pixeli (output) połączone są kolumnami. Czyta się na raz tylko jeden wiersz i cały jeden wiersz.

Wspomniałem wcześniej, że fotodiody jest mniejsza niż powierzchnia pixela. Czas powiedzieć, dlaczego: „czytający” tranzystor (M2) reaguje na napięcie na fotodiodzie. To napięcie zależy od zgromadzonego ładunku oraz od elektrycznej pojemności fotodiody. Gromadzi się ładunek łatwiej, gdy fotodiody jest większa, ale jednocześnie ma ona wtedy większą pojemność i zmiany napięcia są małe. Jednocześnie ładunki „złapane” niedaleko od fotodiody mają tendencję „dryfowania” w jej kierunku. W efekcie rozmiar „czujnika” wybiera się tak, żeby był możliwie mały, ale jeszcze zbierał „wałęjące się” ładunki z całej powierzchni pixela.

No dobra. Jak dotychczas wygląda przyjemnie, nie? Nie trzeba przepychać ładunków, po prostu wybiera się wiersz i dostaje napięcie proporcjonalne do ilości schwytych fotonów. Można przeczytać sobie dowolny jeden wiersz, można dowolny jeden skasować, potem następny, skasować, potem dowolny inny itd. To gdzie jest ten zdechły sznur?

Primo : tranzystory zajmują powierzchnię. Gęstość struktury rośnie z dnia na dzień i w tej chwili już te trzy tranzystory nie zajmują 1/3 powierzchni pixela, ale nie ma mowy o upchaniu 6MPix na matrycy 1/4". 6MPix sensor potrzebuje 18 milionów tranzystorów. To więcej niż Pentium II — ten opędał się ca. 8 milionami.

Secundo : większa ilość złącz p-n w okolicy pixela oznacza więcej dziur, którymi ładunek może nam uciec.

Tertio : w CCD ładunek każdego pixela „ważony” jest tą samą „wagą”. Jak ona oszukuje, to cały obraz jest jaśniejszy albo ciemniejszy, ale równomiernie. Tutaj każdy pixel ma własną wagę, więc jeśli nie uda się zrobić ich wszystkich identycznych, to mamy wbudowany na stałe „szum” wzmocnienia.

Trzeci problem, mimo, że wygląda na najgorszy, takim nie jest — nawet, jeśli nasze wagi się „rozjeżdżają” wystarczy, że sensor zostanie raz skalibrowany (oświetlony równomiernie i sczytany), żeby wiedzieć, jakie są mnożniki dla poszczególnych pixeli. Tablica korekcji to kilka MB, ale nie jest to coś, co by w dzisiejszych czasach sprawiało trudności.

Problem ciemnego prądu (ucieczki elektronów) jest w nowoczesnych sensorach CMOS opanowany nie gorzej, niż CCD. Sporo źródeł podaje go jako „znacznie większy”, niż w przypadku CCD, ale dotyczy to raczej sytuacji, gdy porówna się co *można* osiągnąć w danej technologii, a nie *co można dostać za te same pieniądze*. Jeśli mówimy o długoterminowych ekspozycjach w teleskopach astronomicznych, to CCD mogą w tej chwili więcej, ale primo, żeby to osiągnąć, siedzą na aktywnym chłodzeniu, secundo, kosztują odpowiednio, tertio nikt nie przejmuje się walniętymi kilkoma kolumnami pixeli no i quatro, nie są w stanie lecieć 5 klatek na sekundę full-res. Nie nasza liga.

Kwestia zabierania powierzchni przez dodatkowe struktury straciła nieco na znaczeniu w ciągu ostatnich lat, bo powiedzmy, że tranzystory umiemy już robić „dosyć małe”. Poza tym nie musimy, jak w CCD, nakrywać części chipa metalem, bo wałęsające się ładunki nie są groźne — nie mogą dołączyć do żadnej karnej kolonii z przeciwległego końca matrycy, a conajwyżej do najbliższego pixela, gdzie i tak należą ⇒ nawet obszar tranzystorów jest w pewnym, niewielkim stopniu światłoczuły.

Gdy zejdziemy z porównywaniem CCD vs. CMOS do rozmiaru i zastosowania klatki filmu (APS czy 35mm), CMOS wykazuje parę poważnych zalet:

- nawet poważnie uszkodzony pixel (dopóki nie zacznie przeciekać M3 można rozwalić w pixelu praktycznie wszystko) nie wpływa na odczyt kolumny, w której się znajduje. Matryca o dużej powierzchni *będzie* zawierać kilka defektów. Szanse, że te defekty ubijają CCD są większe niż to, że ubijają CMOS.
- CMOS można odczytać szybciej. Odczytanie całej linii wymaga tylko wysterowania linii [SELECT] i to niskim napięciem.
- blooming dotyczy CMOSów w duuuużo mniejszym zakresie — pixele nie są rozdzielone tylko polem elektrycznym elektrody na wierzchu (CCD), tylko stanowią odrębne struktury.
- przy zwiększaniu rozdzielczości nie rosną straty związane z przepompowywaniem ładunku w kółko
- cmosy chodzą już przy zasilaniu 3.3-5V, a nie +9/ - 15V czy t.p.
- wstępna obróbka sygnału może odbywać się już w obrębie samej matrycy.
- tak samo generacja sygnałów sterujących, timingów itd.

przerwa, czas na pytania. Dziękuję za uwagę...

⇒ Linki

o budowie photosite:

http://www.ee.bgu.ac.il/~Orly_lab/publications/Photoresponse%20analysis%20and%20pixel%20shape%20optimization.pdf

o CMOS 14MPix:

<http://www.fillfactory.com/htm/technology/pdf/2004x14.pdf>

o różnych podejściach do tematu sensorów:

<http://www.fillfactory.com/htm/technology/pdf/pw00concepts.pdf>

o ograniczeniach technologii:

<http://www.fillfactory.com/htm/technology/pdf/pw00limits.pdf>

Coś dla miłośników kopania się z analogiem po dupach — uwaga, dokument z 1999 roku, CMOS jest teraz sporo lepszy niż to, co tam piszą:

<http://www.fillfactory.com/htm/technology/pdf/oeepe99.pdf>

Rozdział 7

po łebkach o obrazie i obiektywie — optyki cz. I

Początkowo zamierzałem ten artykuł przerobić nieco i przede wszystkim napisać więcej niż sam wstęp, zanim opublikuję, ale jako, że na razie czas mam wolny w małych kawałkach, nie sprzyja to pracy, więc wysyłam jak jest. To jest wstęp dla raczej początkujących, więc proszę, uzupełniajcie go, a nie krytykujcie „nie wspomniałeś... nie pisziesz...” bo ja wiem, że nieskończenie wielu rzeczy tu nie ma nawet zaznaczonych. Albo je opiszecie, albo czekajcie na dalsze części, gdzie może wleżą głębiej w temat — to jest próba obrazowego przedstawienia, co ma robić obiektyw...

7.1 A po co komu obiektyw?

Zacznijmy od początku:

Fotografia narodziła się jako metoda „zapamiętania” obrazu, który widzą nasze oczy. Jasne, rozwija się już od swych początków jako dziedzina sztuki, ale ułatwmy sobie życie i zacznijmy od tych „prostych” zastosowań, gdzie nie trzeba dorabiać teorii do metafizyki na temat praktyki.

Na dobry start przyjmijmy raz a dobrze do wiadomości: fotografia nie ma nic wspólnego z obrazowaniem rzeczy takimi, jakie *są*. To jest w najlepszym wypadku obrazowanie ich tak, jak je *widzimy*. Spójrzmy przed siebie — zamknijmy jedno oko, żeby utracić widzenie trójwymiarowe. Jak powstaje obraz, który rejestrujemy?

Tak, wiem, to są podstawy ze szkoły jeszcze, ale czytajcie dalej, będzie więcej...

Uprośćmy najpierw kwestię do minimum: wyobraźmy sobie prostą linię, promień światła biegnący od każdego punktu widzianych obiektów w kierunku naszego oka. Wszystkie promienie, które dotrą do niego (nie zostaną zatrzymane po drodze przez inne, bliższe przedmioty) przecinają się w jednym punkcie — w „źrenicy” naszego oka i za nią zaczynają rozbiegać się na nowo — w końcu trafiają na siatkówkę. Odwzorowanie punkt-punkt. Punkt „świata” → punkt na siatkówce. Nie liczy się odległość, tylko kierunek, z którego promień nadchodzi. Promienie, światła, które będą w innych kierunkach niż dokładnie w naszą źrenicę, nie mają znaczenia, nie trafiają do niej, nie tworzą obrazu.

Nie wnikajmy jeszcze przez chwilę głębiej w budowę oka, tylko spróbujmy to zastosować w praktyce: Camera obscura, obiektyw otworkowy. Kawałek blachy w blasze dziurka. Nieskończenie mała dziurka, żeby się precyzyjnie „tylko jeden promyk światła” ;P Za blachą — błona filmowa. Przed blachą — nasza fotografowana

scena. Do danego punktu kliszy dociera tylko ten promyk światła, który pochodzi z miejsca na przedłużeniu prostej: punkt-otworek. Idealne, perfekcyjne, niestety bezużyteczne: po pierwsze nieskończenie mały otworek to nieskończenie mało przechodzącego światła, a secundo: na krawędziach otworu światło ugina się, przestaje na chwilę biec prostoliniowo, więc nie mamy „promyka” tylko „rozlane dziadostwo”.

Co robić? Najpierw zwiększymy otworek. Odrobinę. Tak, żeby ugięcie światła przestało nam przeszkadzać. Co to zmienia w naszej fotografii? Po pierwsze: do danego punktu na kliszy dociera światło już nie „jednego punktu świata”, bo ziarenko srebra na kliszy przez większą dziurkę widzi więcej na raz niż jeden punkt świata. Z drugiej strony patrząc: światło z jednego punktu świata dociera teraz nie tylko do jednego miejsca na kliszy, a do małego jej krążka. obraz zrobił się jaśniejszy, ale nieco rozmazany. To znaczy, gdyby nie było dyfrakcji (uginania i rozłazenia się światła na brzegach dziurek), to obraz byłby zauważalnie mniej ostry niż przy nieskończeniu małej dziurce, a tak będzie pewnie porównywalny, a może i paradoksalnie — lepszy.

Jaśniejszy napisałem? No ale dalej mamy dziurkę rzędu 0.2mm, czyli przysłony rzędu minimum f:22, a zapewne spooro więcej. Na statyw i tydzień naświetlać po przykuciu wcześniej łańcuchem do latarni — OK, ale do „dzisiejszej” fotografii to daleko z tym nie zajdziemy. Musimy dalej zwiększać dziurę. Ale jak zwiększymy otwór, to promienie pochodzące z jednego „punktu” świata będą się coraz bardziej „rozłazić” po kliszy. A, ha! Patent na skupianie światła znaleźli już starożytni, zwie się soczewką skupiającą. Tak na prawdę to tylko podpatrzyli, co na prawdę w oczach siedzi, ale sza.

To co? Robimy dużą dziurę, żeby łapała dużo światła, wsadzamy w to soczewkę skupiającą, żeby rozbieżne promienie z powrotem zbiegły się na kliszy i voila! Wywołujemy naświetloną kliszę i o kufa... coś nam poszło nie teges... yyy...

nieostro jakoś?

Taaak... Dla małej dziurki nie liczyło się, jak daleko jest obiekt wysyłający światło. Dla soczki już mamy zależność: jeśli odległość od soczewki do obiektu jest X, od soczewki do kliszy jest Y, to na kliszy obraz będzie ostry wtedy i tylko wtedy, gdy:

$$\frac{1}{x} + \frac{1}{y} = \frac{1}{f} = Z \quad ,$$

przy czym:

f ogniskowa soczewki,

Z zdolność skupiająca soczewki (w dioptriach gdy f jest w metrach).

W tempie ekspresowym dojechaliśmy do momentu, gdzie przeciętny obywatel skończył fizykę w szkole. Dla niecierpliwych zapewne teraz przyjdzie „gęste”, a „umiejący” i tak z wykładu pewnie nic nie wyniosą nowego, więc mogą przeskoczyć do podpisu ;P

W szkole zabawa zakończyła się na rysowaniu obrazu „strzałki” tudzież innego podobnie bzdurnego obiektu 2-wymiarowego. Pozostańmy jeszcze przez chwilę przy obiektach płaskich, ale rozstawmy ich w scenie więcej. Będę się teraz posługiwał „małym obrazkiem” (formatem kasety 135, 36mm filmem, znaczy co szary Kowalski ma w szafie wkręcone do Praktycy) jako odniesieniem, coby liczby miały więcej „znaczenia” dla „normalnych ludzi”.

Weźmy na próbę soczewkę o f=50 mm czyli o „sile”

$$\frac{1}{0.05} = 20 \text{ dioptrii.}$$

Załóżmy, że fotografujemy obiekt oddalony od naszego szkła o metr. Klisza musi znaleźć się w takim wypadku:

$$\frac{1}{20 D - \frac{1}{1 \text{ m}}} = \frac{1}{19} \approx 52.5 \text{ mm} \quad \text{za soczewką.}$$

Jeśli chcielibyśmy fotografować dalsze obiekty, należałoby zmniejszać odległość soczewka-film, aż do:

$$\frac{1}{20 D - \frac{1}{\infty \text{ m}}} = \frac{1}{20 D} = 50 \text{ mm}$$

(czyli dokładnie tyle, ile wynosi ogniskowa soczewki)

Jeśli chodzi o bliższe obiekty, musimy oddalać soczewkę od kliszy. Wraz ze zbliżaniem się ze szkłem do obiektu wymagane odsunięcie kliszy gwałtownie rośnie, gdy z *naszym* szkłem podejmiemy na 50mm (=f), wyjdzie nieskończenie wielkie. To przy czynia, dla której obiektyw mają nieraz dość wkurzająco dużą „minimalna odległość ostrzenia” — np. dla 50-tek typowo ok 30–40cm od „środku optyki”.

Przeliczmy: dla 30cm:

$$\frac{1}{20 D - \frac{1}{0.3 \text{ m}}} = 60 \text{ mm}$$

Czyli całość musi się ruszać w zakresie 50–60 mm, czyli 10 mm przesunięcia szkła da zakres ostrzenia od 30 cm do nieskończoności. Gdybyśmy chcieli zejść z 30 cm do 20 cm, należałoby wydłużyć zakres regulacji do 17 mm, czyli niemal podwoić... nie ma sensu dla „normalnych” szkieł.

Haha, mamy już jakąś zabawkę :)

7.2 Aleale, dygresja dygresją, a co z naszymi obiektami w scenie?

Ustaliliśmy, że naostrzyłem na coś odległego od obiektywu o metr. Ale to nie jest jedyny obiekt w kadrze. Przyjmijmy, że wezmę jeszcze coś i postawię to w odległości 2 metrów. Na początek niech to będzie tylko jeden jasny punkt — np. maciupcia żaróweczka latarki. Światło przez niego emitowane/odbijane rozchodzi się we wszystkich kierunkach. To, co nie trafia do soczewki nas nie obchodzi. Co wpada do soczewki zostaje załamane i skupione znowu. Gdzie?

$$\frac{1}{20 D - \frac{1}{2 \text{ m}}} = 51.3 \text{ mm} \quad \text{za soczewką.}$$

Czyli 1.2 mm *przed* kliszą. No ale promienie światła nie zatrzymają się w miejscu, tylko po przecięciu zaczynają się dalej prostoliniowo rozbiegać, aż w końcu trafią na kliszę — w postaci jasnego „placka”.

Jaki kształt będzie miał ten placek? Taki, jak nasza soczewka... .

Na razie rozważamy sobie idealną soczewkę, więc jest nieskończenie cienka — załamuje światło, ale nie przesuwają go. Czyli na każdy punkt soczewki pada światło, jest załamywane w kierunku ogniska i leci dalej tworząc niejako świetlny stożek z wierzchołkiem tam, gdzie wypada nasze ognisko (51.3 mm dalej). Od tamtego miejsca rozbiega się identyczny, symetryczny stożek światła uciekając do nieskończoności, czy do naszej kliszy.

A co gdyby ów punkt był bliżej niż metr?

Pół metra?

Przy półmetrze:

$$\frac{1}{20D - \frac{1}{0.5} \text{ m}} = 55.5 \text{ mm},$$

czyli promienie przetną się 3 mm za kliszą... ergo, naświetlą ją zanim zejdą się z powrotem w jeden punkt — tworząc tym samym placek o takim samym kształcie jak poprzednio, tylko odwrócony o 180° (przy okrągłym prześwicie soczewki to kółko i tak będzie kółko).

Wniosek: wszystko, co nie jest położone na powierzchni fokalnej (w naszym przypadku i przy naszym aktualnym ustawieniu ostrości jest ona w przybliżeniu 1 m od środka soczewki) jest odwzorowywane nieostro — z punktów robią się placki światła, cienkie, kontrastowe linie robią się grubymi, mało ‘intensywnymi’ maźgami, ostre krawędzie znikają.

Jak bardzo nieostro?

Ano to zależy. Po pierwsze zależy od tego, jak daleko od płaszczyzny fokalnej jest nasz obiekt — wiadomo, że jeśli zamiast 2 metry od szkła postawimy ten punkt 4 metry od szkła, to promienie przetną się jeszcze dalej od kliszy, będą miały dłuższą drogę na „rozbieganie się” i w efekcie zarejestrują się na większej powierzchni — będzie większy, ale ciemniejszy „placek”. Po drugie: przy tej samej odległości promienie szybciej rozbiegają się, gdy soczewka jest większa. Kąt rozwarcia naszego „świetlnego stożka” jest przecież zależny od średnicy szkła... .

Jak łatwo zauważyć, istotna jest nie tyle średnica szkła, co jej stosunek do długości ogniskowej — ten sam kąt przy wierzchołku będziemy mieli przy dziurze 5 cm i ogniskowej 50 mm co przy dziurze 20 cm i ogniskowej 200 mm (kto nie wierzy nich sobie narysuj i przypomni Talesa). Stąd też wzięło się pojęcie otworu względnego przysłony, znanego jako f-stop: jest to właśnie stosunek efektywnej średnicy (dalszego efektywnej to potem) szkła do jego ogniskowej. f:1.8 oznacza, że nasz obiekt w ma średnicę

$$\frac{f}{1.8} \quad \text{czyli} \quad \frac{50 \text{ mm}}{1.8} \approx 28 \text{ mm}$$

Dla wspomnianego punktu odległego o 2 metry, którego obraz powstaje 51.3 mm od szkła, przy f:1.8, snop światła „zbiega się” ze średnicy 28 mm do „zero” na odległości właśnie 51.3 mm, czyli na pozostałych mu 1.2 mm rozbiega się do:

$$\frac{1.2}{51.3} \times 28 \text{ mm} = 0.65 \text{ mm} \quad (\text{Tales!}).$$

Zapewne każdemu obito się o uszy pojęcie przysłony. Taki mechaniczny dynks, co służy zmniejszaniu „prześwitu” w obiektywie. Wiemy już, że nic poza płaszczyzną fokalną nie będzie idealnie ostre. Ale może można to uczynić *wystarczająco* ostrym? Pominę tu kawałek wyliczeń, weźcie na wiarę, że przyjmuje się, iż obraz jest ostry, gdy punkty na kliszy 35 mm są mniejsze niż ok. 0.02 mm. Nasz „punkt” jest za duży (0.65 mm), żeby zostać uznanym za taki. Ale odwróćmy poprzednią proporcję: Jeśli chcemy, by ten dalszy obiekt był ostry, to jego punkcik nie powinien być większy niż 0.2 mm, czyli nie możemy wziąć soczewki większej niż:

$$0.2 \text{ mm} \cdot \frac{51.3 \text{ mm}}{1.2 \text{ mm}} = 8.55 \text{ mm}$$

średnicy, albo, jak kto woli:

$$\frac{50 \text{ mm}}{8.55} = f : 5.85 \approx f : 5.6$$

Nie, nie trzeba obcinać soczewki dookoła, wystarczy zasłonić jej brzegi, a zostawić tylko okrągły prześwit w środku. Liczy się powierzchnia rzucająca światło w kierunku kliszy. Tracimy powierzchnię zdolną do zbierania światła, w zamian za to zyskujemy przestrzeń, w której obiekty są ostre.

Oops... ale was wmanewrowałem w pojęcie głębi ostrości ;P

Ale przynajmniej już wiadomo, skąd się bierze — im dalej od „celu” jest element kadru, tym dalej od kliszy powstaje jego obraz i tym „większe” robią się jego „punkty”, efekt można zmniejszyć poprzez zmniejszenie średnicy szkła (domknięcie przysłony). Ciąg dalszy o głębi ostrości, wzory na jej liczenie itd. wraz z przykładami znajdziecie w pierwszym lepszym podręczniku fotografii.

Ja tymczasem chcę oddryfować na moment w trochę inną stronę... ale to w następnym odcinku ;)

Rozdział 8

Wstęp do optyki część 2

--

Marek Lewandowski (at work)

[Linux - It is now safe to turn on your computer.]

see my photos at <http://www.stud.uni-karlsruhe.de/~uyh0>