

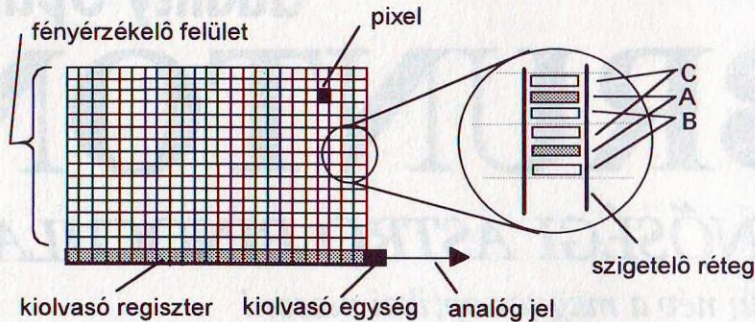


CCD technika

CCD alapismeretek II.

A CCD chip felépítése

Az előző részben megismert MOS tárolóegységekből és az azokhoz kapcsolódó töltésléptető elektródákból helyezünk most egymás mellé egy síkra több darabot. Ha így mozaikszerűen „kitöltünk” egy kis téglalap (négyzet) alakú szilíciumlapkát, és hozzákapcsolunk egy kiolvasó áramkört, máris készen van a CCD chipünk (1. ábra).



1. ábra. Egy CCD chip fényérzékelő felületének vázlata

A mozaik egy elemét, ami a végül számítógép segítségével megjelenített kép egy pontja lesz, nevezzük pixelnek (az angol picture element, kép elem szavak rövidítése). Egy oszlopon belül a pixelek nincsenek egymástól ténylegesen elszigetelve, mint ahogy az egyes oszlopok egymástól SiO_2 réteggel, hiszen ekkor lehetetlen lenne a töltésléptetés. Az egymás „alatti” pixeleket ezért elektromos tér segítségével választják el egymástól. Maradva a háromfázisú példánknál az 1. ábra kinagyított részletén látható az egy képelemhez tartozó három elektróda. Ezek közül az A jelű pozitívabb feszültség van, mint a B-n és a C-n. Így az elektronok A felé áramlanak az integráció (megvilágítás ideje) alatt, a másik két elektróda szigetelőként szolgál. A kép kiolvasásakor a cikk első részében szereplő 3. ábra szerint történik az összegyűlt töltések léptetése (Meteor 1996/11., 22. o.). (Az említett ábra egy oszlop hosszmetzeteként képzelhető el.) Egy léptetés során minden sor eggyel lejjebb kerül, a legalsó sor pedig a kiolvasó regiszterbe. Ez egy olyan speciális sor, melyben a már ismert módon, de oldalirányban lehet mozgatni a töltéseket a kiolvasó egységig. Miután a kiolvasó regiszter kiürült, jöhet a következő sorléptetés. A közben eltelt idő

alatt azonban a még ki nem olvasott sorok továbbra is fényt kapnak, de már nem azon a helyen, ahol az integráció alatt! Ennek elkerülésére sok chipet dupla mozaik-felülettel készítenek (vagy mechanikus zárszerkezetet építenek a kamerába). Ennél a megoldásnál az érzékelőfelület egyik részét egy alumínium-maszkkal takarják el, s az integráció végén erre a fénytől védett tárolóra léptetik a töltéseket (frame transfer). Mivel a sorokat egyszerre lehet léptetni, ez viszonylag rövid időt vesz igénybe, s ezáltal történhet a kiolvasás. (Egy n sorból és m oszlopból álló chipnél ha egy léptetés t ideig tart, a teljes kiolvasás $(n \cdot m) \cdot t$ időt vesz igénybe, míg ha van egy tároló, akkor $n \cdot t$ idő alatt fénymentes részre vihetők a töltések.)

Nagyobb chipeknél, melyek több millió(!) pixelt tartalmaznak, előfordul több kiolvasó regiszter és -elektróda alkalmazása a kiolvasási idő csökkentésére, ami különben akár egy perc is lehet.

A chip méretei

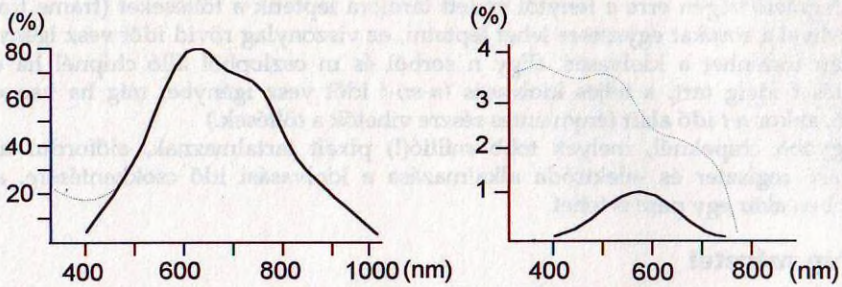
A pixelek alakja és mérete változó. A négyzetes pixelek előnyösebbek, azonban kicsit nehezebb ezek előállításuk. Általában a pixelméret $9 \times 9 \mu\text{m}$ és $30 \times 30 \mu\text{m}$ közötti. Az alsó határt a gyártási technológia szabja meg, illetve az, hogy egy adott méretű elem nem képes végtelen sok elektron tárolására. Ha túl kicsire választjuk a pixeleket, azok rövid megvilágítás után telítődnek, s az elektronok átáramlanak egyikből a másikba. Az értelmes felső határt általában az elérni kívánt felbontás adja, mint ezt majd később megvizsgáljuk.

A mozaik mérete, alakja a pixelek számától (és azok nagyságától) függ. Alkalmaznak — pl. szkennerekben — olyan chipeket, melyek csak néhány sorból, és több száz-néhány ezer oszlopból állnak (linear array CCD). Csillagászati alkalmazásban azonban olyan chipeket használnak, melyek kiterjedése mindkét irányban több tucat-néhány ezer pixel (area array CCD): a 32×32 -től az 5192×5192 -ig. (Az érzékelő felület nem mindig négyzetes, főleg a spektroszkópiában használt eszközöknél eltérő.)

A mozaik vastagsága függ attól, hogy milyen hullámhossz-tartományban szeretnénk használni az érzékelőt. A vörös fotonok ugyanis $500 \mu\text{m}$ -t is képesek megtenni a félvezető rétegben, azonban a kék fotonok pár μm után elnyelődnek. Az előlről, az elektródák felől megvilágított (frontside) CCD-k érzékenyebbek a kék tartományban, mivel a rövid hullámhosszú fotonok által keltett elektron-lyuk párok így közvetlenül az elektródák közelében keletkeznek. Itt még sokkal erősebb az elektromos tér szétválasztó hatása, mint $500 \mu\text{m}$ -nal távolabb, ahol a vörös fotonok lépnek kölcsönhatásba a szilíciummal. Előny enné a megoldásnál, hogy a Si alapréteg lehet vastag, ami nagyobb mechanikai szilárdságot biztosít és könnyebben előállítható. Hátrány viszont, hogy a fénynek át kell hatolnia az elektródákon és a szigetelő rétegen, így nagy a veszteség. A kvantumhatásfok, ami a detektált és beérkezett fotonok aránya, „csak” 50% körüli csúcserőérték ér el. (Az emberi szem érzékenysége így kifejezve 1%, a fotoanyagoké 3-4%!) A hátulról, vagyis a Si alapréteg felől megvilágított (backside) CCD-k viszont a fent említett okok miatt inkább vöröserzékenyek. Az alapréteg néhányszor $10 \mu\text{m}$ -esre vékonyításával bizonyos mértékig kiegyenlíthető a spektrálerzékenység (l. később), ami nehéz technikai feladat, de megoldható. Ezek az elvékonyított érzékelők (thinned CCD) viszont — mivel a beérkező fénynek semmi sem állja útját — a 80%-os kvantumhatásfokot is elérhetik a legkedvezőbb hullámhosszon!

A CCD jellemzői

Spektrálérzékenység. Ha már szó esett a különböző hullámhosszokról, nézzük meg a CCD-k spektrális érzékenységét!

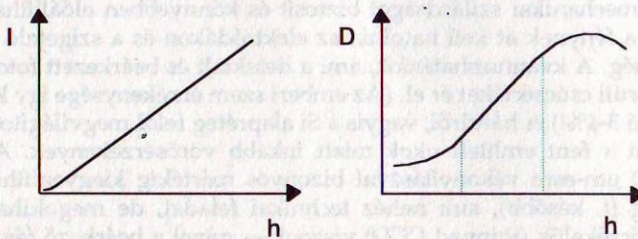


2. ábra. Egy CCD (balra), illetve az emberi szem és egy pankromatikus fotóemulzió (szaggatott vonal) spektrálérzékenysége (jobbra)

A 2. ábrán a függőleges tengelyeken a kvantumhatásfok, a vízszintes tengelyeken a hullámhossz van feltüntetve. Már említettük a kvantumhatásfokot, aminek kimagasló értéke az egyik legfontosabb tulajdonsága ezeknek az érzékelőknek, hiszen a fotoelektron-sokszorozó csövek 20–40%-os hatásfokát is túlszárnyalják.

Az ábrán jól látható, hogy a CCD sokkal érzékenyebb a vörös tartományban, mint az emberi szem. Egy pankromatikus fotoemulzióval szemben pedig még nagyobb eltérés tapasztalható. Megjegyzendő, hogy léteznek olyan eljárások, melyekkel a CCD chip érzékenysége kiterjeszthető a kék tartományban is. Ez úgy érhető el, hogy egy nagyon vékony rétegben olyan anyagot visznek fel az érzékelő felületére, mely a 300 nm-es tartomány környékén elnyel, s az elnyelt fotonokat valahol 500–600 nm környékén sugározza vissza. Az így megváltoztatott érzékenységet jelöli a bal oldali ábra szaggatott vonala.

Linearitás. Nagyon fontos szempont egy detektornál, hogy pl. kétszer akkora megvilágítás hatására kétszer akkora jelet adjon. Ez teljesül a CCD teljes működési tartományára, míg a fotoemulzióknál csak annak egy harmadára. Ez jól látható az alábbi két görbén, ahol a CCD-k és a fotoanyagok „jelleggörbéje” van ábrázolva. Előbbinél a kiolvasott, analóg jel nagysága (I), utóbbinál a feketedés, az ún. denzitás (D) látható a megvilágítás (h) függvényében.



3. ábra. A CCD (balra) és a fotoemulzió (jobbra) által detektált jel nagysága különböző megvilágításokra

Dinamikus tartomány. Az egyidejűleg intenzitáshelyesen megjelenített legfényesebb és leghalványabb képpontok fényességaránya a fotográfiában 100 körüli érték (ez kb. 5 magnitúdónak felel meg), ellenben a CCD-k esetében ugyanez mintegy 10 000 (ami 10^m)! Utóbbi esetben felső határt szab a pixelek telítődése, vagyis az, hogy csak véges számú elektront tartalmazhat egy képelem. Ha ezt a határt túllép-tük, a töltések „átfolynak” a szomszédos pixelekre (blooming). (Léteznek olyan tech-nikai megoldások, ahol ezt a jelenséget csökkenteni tudják a pixelek közötti „elvet-zető csatornákkal”, ez az ún. antiblooming gate technika.)

Felbontás, érzékelő felület. 15 μm -es, átlagos pixelmérettel számolva a felbontás 66 vonal/mm, ami elmarad néhány, akár 300–400 vonal/mm-es felbontást elérő fo-toemulzióktól. Ráadásul a valódi felbontás ennél rosszabb. A kép legkisebb rögzíteni kívánt részleteinek ugyanis legalább két-két pixelre kell esni (Shannon-féle mintavé-telezési elv), különben ezek egybeemosódhatnak.

Az érzékelő felületének nagyságát a pixelméret és a pixelszám határozza meg. Ez általában néhány tized és pár cm^2 között mozog, a legnagyobbaké is csak 36 cm^2 , ami szintén elmarad az óriási, több száz cm^2 -es fotolemezekétől. Szinte csak ezen a két területen van hátránya a CCD-knek a hagyományos technikával szemben.

Sötétáram, hibák. Semmi sem tökéletes, a CCD chip sem. Szó volt már róla, hogy az elektronok nem csak fotonok hatására, hanem a hőmozgás során is elszabadul-hatnak, s ez a filmeknél ismert „alapfátyolhoz” hasonlóan jelenik meg a képen. En-nek értéke, eloszlása azonban teljesen véletlenszerű, erősen függ a hőmérséklettől, s az integrációs idő alatt folyamatosan gyűlnek ezek a „zavaró” elektronok is. Az egyes pixelek érzékenysége is különböző, így a rögzített kép egyes pontjainak relatív fényessége is megváltozik. Ez a két hatás azonban, mint látni fogjuk, nagyon egysz-e-rű eljárásokkal csökkenthető, sőt, majdnem meg is szüntethető. Nem küszöbölhető ki azonban a gyártás során keletkezett pixelhibák. Gyakran előfordulnak érzéketlen, „halott” képelemek, s ezek legrosszabb esetben az egész chipet használhatatlanná tehetik. (A hibák száma alapján osztályozzák az elkészített chipeket — a legjobbak-ban általában 10-nél kevesebb hiba van —, s ettől függően szabják meg azok árát.)

Most már ismerjük a CCD chip felépítését, jellemzőit. A következő alkalommal megismerkedünk a chipet CCD kamerává kiegészítő egységekkel, ezek néhány tu-lajdonságával, illetve megvizsgáljuk a digitális képfeldolgozás lehetőségeit, amely az egyik legfontosabb előnye ennek a rendszernek.

FŰRÉSZ GÁBOR

Hale–Bopp pályázat!

Az ELTE Csillagászati Tanszék asztrófotó és rajzpályázatot hirdet az alábbi kategóriákban:

1. Felnőtteknek és gyerekeknek a Hale–Bopp-üstökösről készített felvételekkel.
 2. Általános és középiskolásoknak a Hale–Bopp-üstökösről készített rajzokkal.
- A legjobb felvételeket és rajzokat az ELTE Csillagászati Tanszék Digitális Képtárában helyezzük el. A nyertes pályázó (mindkét kategóriából 1–1 fő) lehetőséget kap, hogy részt vegyen egy éjszakai mérésen az MTA Csillagászati Kutatóintézet Piskésetetői Observatóriumában.

Beküldési határidő: 1997. április 15.

**Cím: „Hale–Bopp pályázat”,
ELTE Csillagászati Tanszék, 1083 Budapest, Ludovika tér 2.**