

KÉPÉRZÉKELŐK 1.

A CCD szenzor

Szabó Zsolt

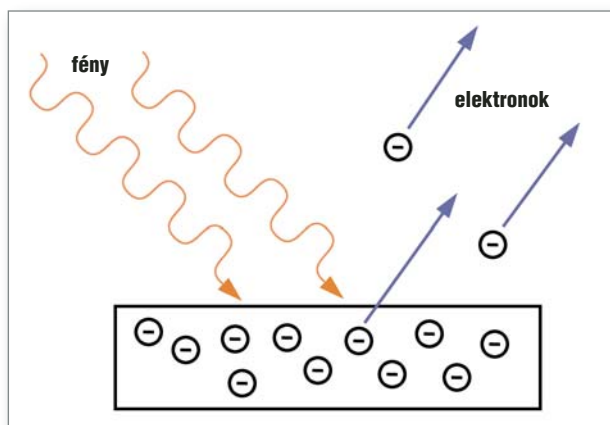


A képerzékelő a digitális fényképezőgépek központi eleme, de vele kapcsolatban még az igényesebb fotósok fejében is sok hiányos, sok esetben téves ismeret van. Sorozatunk ezen próbál segíteni. Az első részben röviden megismerkedünk a fotovoltaiikus jelenséggel és a CCD képerzékelők működésének alapjaival.

A digitális fényképezőgépek képerzékelői működésük, illetve felépítésük szerint két nagy csoportba sorolhatók, a CCD- és a CMOS-rendszerűbe. Bár ezeken kívül létezik még több, látszólag más, technikailag figyelemre méltó megoldás is, alapjaikban azok is a fenti két csoport egyikébe tartoznak. Ilyen például a Foveon X3, a Sigma cég sok szempontból úttörő fejlesztése, amely működését tekintve CMOS-rendszerű. A fotósok a képerzékelőkről, a két nagy rendszer közötti különbségekről többnyire keveset tudnak, az ismeretek kimerülnek abban, hogy hány megapixeles a kiszemelt gép, hogy a képerzékelő CCD- vagy CMOS-rendszerű, de azt már csak kevesen ismerik, hogy azok hogyan működnek, miért jó az egyik, miért jobb a másik stb. Négyrészes cikkünkben az ezekkel kapcsolatos kérdésekre próbálunk választ adni.

A képerzékelők az optoelektronikai ipar csúcstermékei, valóságos műszaki csodák. Mai technikai szintre jutásuk közel 50 esztendő kutatás-fejlesztés eredménye. Képerzékelőket alkalmazásuk szerint sok területre fejlesztettek (fényképészet, mérés-technika, orvosi diagnosztika, csillagászat, űrkutatás stb.). Működésük alapjai azonosak, paramétereikben azonban nagyon különbözhetnek egymástól. Cikk-sorozatunkban kiemelten a fototechnikai érzékelőkkel foglalkozunk, a más területeken használt típusokra legfeljebb csak néhány utalást teszünk. Működésük megértését egy kis fizikával kezdjük.

A fotoelektromos jelenséget Hertz fedezte fel, tudományos értelmezése Einstein és Planck nevéhez fűződik. Ha az anyagokat fénnel megvilágítjuk, a fotonok energiájukkal elvileg elektronokat tudnak kiszabadítani. Egyes félvezető anyagokban, például a szilíciumban, erre igen kedvező lehetőség van

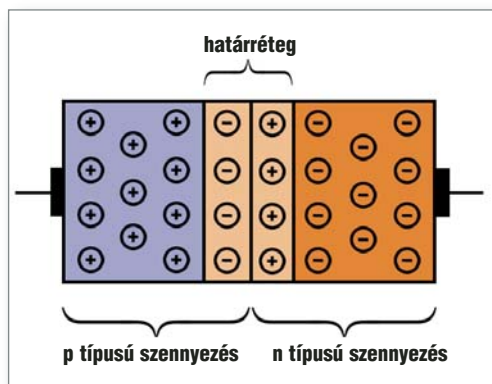


A fotovoltaiikus jelenség

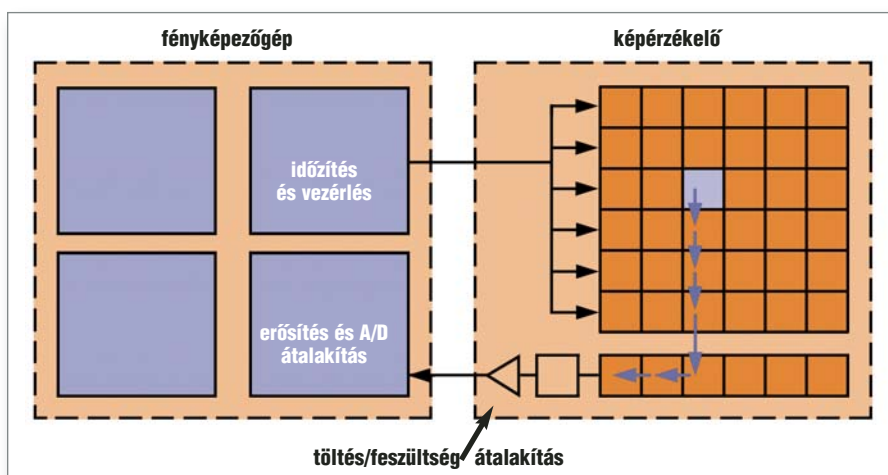
A fénysugárzás nem más, mint az energiakvantumokból álló elektromágneses hullámmezők terjedése. Az energiakvantumokat fotonoknak nevezzük. Az elektromos és a mágneses hullámok egymáshoz és a terjedési irányhoz képest merőlegesen amplitúdóval rezgő mozgást végeznek. A fény hullámhossza (λ) a fény sebességének és frekvenciájának hányadosa, a fény jellemző paramétere. A hullámhossz a látható tartományban (390–750 nm) a fény színét határozza meg. Az 555 nm-t például zöldnek látjuk. A komplex színek (fehér, rózsaszín stb.) többféle hullámhosszúságú fényből tevődnek össze. A fotonok energiája függ a hullámhossztól, értéke a látható tartományban általában 1–3 eV körül van.

Ha a fénnel az anyagok felületét megvilágítjuk, és az egyes fotonok energiája meghaladja az elektronok a vezetősávba való emeléséhez szükséges küszöbértékét (ami pl. a szilíciumnál 1,1 eV), akkor a fény elnyelése során beeső fotonok az atomok kovalens rácskötéseit felszakíthatják, a kiszabaduló elektronok pedig elvileg szabadon áramolhatnak. A fény által kiszabadított elektronok töl-

tései elektromos feszültséggé alakíthatók, amit fotovoltaiikus (photovoltaic effect, PV) jelenségnek hívunk. A négy szabad vegyértékű szilícium-(Si) egykristályokban erre igen kedvező lehetőség van, de a hibátlan rácsszerkezetű szilíciumnál az elektronok mozgása korlátozott, emiatt a szilícium rossz áramvezető tulajdonságú. Ha viszont a szilícium-egykristály szerkezetét például az öt vegyértékű foszfor- (n típusú), vagy a három vegyértékű bór- (p típusú) atomok bevitelével kismértékben szennyezzük (dopolás), akkor a közös elektronpályák kialakulásával olyan „hibás” rétegeket kapunk, melyekben a foszforatomok szabadon maradt negatív töltésű elektronjai és a bóratomok üresen maradt pozitív helyei (elektron-lyuk párok) révén az elektronok mozgása könnyebbé válik, a vezetőképeség jelentősen megjavul. Ha két ilyen réteget egymásra építünk, akkor a negatív töltésű szabad elektronok a p típusú réteg üresen maradt lyukai felé igyekeznek vándorolni, és betölteni azokat (rekombináció). Az első rekombinációk után azonban a p-n rétegátmenet (junction) felületén rövid időn belül negatív töltésmező (határréteg, barrier) épül ki, melynek feszültségtér megakadályozza az elektronok további áramlását a p oldal felé. Az elektronok a határrétegen át a p réteg felé elvileg tehát nem, csak vissza, az n réteg felé tudnak mozogni. Ez a vékonyréteg-szerkezet az egyenirányító tulajdonságú félvezető dióda. A speciálisan kialakított Si-diódát nemcsak egyenirányításra, hanem több más dologra is alkalmassá tehetjük fotovoltaiikus tulajdonsága miatt. Ha a dióda p és n oldalát kívülről elektromos vezetékkel összekötjük, majd a diódát fénnel megvilágítjuk, akkor az említett elektromos tér hatására a vezetéken át az n réteg felől megindul a szabaddá vált elektronok áramlása. Elektromos áramot kapunk, ami munkára fogható. Ez az eszköz a Si fényelem, amely 0,7 V kapocsfeszültséget képes szolgáltatni, ami azonos a dióda záró irányú feszültségével. Az áram erőssége egy adott, hullámhossztól is függő tartományon belül statisztikailag arányos a

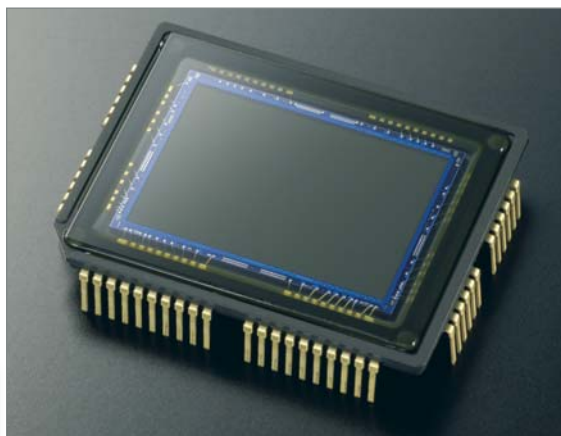


Egy p típusú és egy n típusú félvezető összekapcsolásával létrehozott dióda elvi rajza. Az n típusú részben szabadon maradó elektronok és a p típusú részben szabadon maradó lyukak a határrétegen rekombinálnak



beeső fotonok számával, azaz a jelenség fény mennyiség és -sűrűség (-erősség) mérésére alkalmas fotoszenzor létrehozását is lehetővé teszi. De megfelelő áramköri konstrukcióval készíthetünk olyan félvezető vékonyréteg-szerkezeteket is, melyeknél a fény hatására keletkezett elektronokat a beeső fotonok számával, vagyis a beeső fénnel arányos töltéscsomagokban gyűjthetjük össze a szilíciumlapka felszínén kialakított kapacitív töltéstároló helyeken. Ily módon félvezető alapú képzékelő eszközök hozhatók létre. A két legismertebb típus, a CCD- és a CMOS-rendszerű érzékelők fotovoltaiikus szintű elvi működése teljesen azonos. A közöttük levő jelentős technikai különbségek a létrehozott „töltéskép” expozíciójában, a képkivételési eljárásokban, a

A CCD-rendszerű képzékelők működésének elvi vázlata. Az ábrán egy kitüntetett pixel kiléptetési folyamata látható (a kiléptetés soronként történik). A szenzoron csak a töltés/feszültség átalakító foglal helyet, a további erősítés és az analóg/digitális átalakítás már külső elemekkel történik



A Nikon D60 fényképezőgép APS-C méretű (23,6 x 15,8 mm-es) 10,2 megapixeles CCD képzékelője

félvezető architektúrákban, a színszűrési módszerekben, az adatok feldolgozásában, az alkalmazott félvezető technológiákban, specifikációikban stb. vannak.

A CCD képzékelők

A fizikailag megvalósított CCD-elvű képzékelőre a találmány bejelentése (lásd keretes írásunkat a következő oldalon) után néhány évet még várni kellett. Az első kereskedelmi forgalomba hozott CCD-t a Fairchild Semiconductor mutatta be, 1974-ben. Az egykoron Bell Labs-kutató Gil Amelio fejlesztett ki a cégnél egy 500 pixeles vonali és egy 100x100 pixeles képmátrix szenzort.

Az igazi áttörést a témában a Sony cég érte el Kazuo Iwama vezetésével. Munkássága révén fejlesztették ki az első tömeggyártású CCD félvezető chipet videokamerájukhoz, 1982-ben.

Felépítését tekintve a CCD képérzékelő nem más, mint félvezető szilíciumlapka felületén MOS-technológiával (lásd a következő részben!) kialakított, kapacitív töltéstárolásra is alkalmas fotodiódák felületi mátrixba szervezett hálózata. Ebből a töltésekkel tárolt képi információ a töltéscsatolás elvén nyerhető ki. A mátrixpontok elemeit pixeleknek nevezzük. A pixelek középső, aktív része egy bórral szennyezett p+ epitaxiális réteg, melyre szigetelőoxid- és vezető poliszilícium-réteget növesztenek. Ez lesz a kapacitás dielektrikum és vezérelhető fegyverzete. A dióda n+ szennyezett részét a mag körül alakítják ki, valamint létrehozzák n+ szennyezéssel a pixelek közötti töltéscsatoláshoz szükséges vezető csatornákat. Speciális félvezető technológiával (LOCOS) készítik el a pixelek közötti szigeteléseket, hogy a töltések ne szivárognak el. A rétegrendszer tetejét szilícium-dioxid vékonyréteggel leszigetelik, ill. ennek felületén alakítják ki azt a vezetékhálózatot, amellyel majd a külső vezérlés hajtható végre. A fentebb leírt CCD képérzékelő a következőképpen működik: a felület expozíciója során az egyes képpontokat ért fény mennyiség függvényében a fotodiódák feltöltik a töltéstároló kapacitásokat. Az objektív által a mátrixra vetített kép mozaikszerűen felbontva, töltések formájában tárolódik. A töltéscsomagokat ezután a kapacitív tárolókból ki kell vezetni, majd a csomagokat egyenként jelfeszültséggé alakítani, a jeleket felerősíteni, feldolgozni, majd újra, az eredeti

pixelek sorrendjében összerakni. A töltéscsomag kivezetése szekvenciálisan történik, egy vagy több csatornán párhuzamosan. Egy egyszerű, lehetséges algoritmus a következő: a mátrix alsó vízszintes sorára léptetőfeszültséget kötnek, ami a töltéscsomagokat a töltés-feszültség átalakító áramkörre hajtja, és azokat sorosan, egyenként, a töltéssel arányos analóg jelfeszültséggé alakítja. A kapott kis szintű jelsorozat elemeit felerősítik, majd analóg-digitális (A/D) konverter áramkörrel digitális jelekké alakítják, végül egy memóriában tárolják őket. Az első sor töltéselemeinek kicsatolása után a mátrix vízszintes sorait egy sorral lejjebb léptetik, majd kiolvassák a következő sor töltésinformációit a fent ismertetett módon. Ezt a folyamatot addig folytatják, amíg a mátrix legfelső sorát is ki nem olvasták. A képérzékelőben töltések formájában tárolt kép digitális képé alakult, amit a fényképezőgép processzora feldolgoz, a képet a felhasználó számára kezelhető állománnyá alakítja, végül a memóriakártyán tárolja, illetve a gép kijelzőjén megjeleníti.

A CCD-k megvilágítása és kiolvasása

A működés teljesebb megértéséhez azzal is foglalkoznunk kell röviden, hogy hogyan történik az expozíció, a szenzor megvilágítása, majd a töltések kiolvasása. A CCD képérzékelőknél a zárfunkcióra és a kiléptetésre többféle rendszert dolgoztak ki. Három alapvető módszer terjedt el: full frame transfer, frame transfer és interline. A full frame transfer rendszernél az érzékelő előtti mechanikus zárral a teljes, előzőleg kiürített pixelmátrixot világítjuk meg, hasonlóan, mint a filmes gépeknél. A mechanikus zár azt is biztosítja, hogy

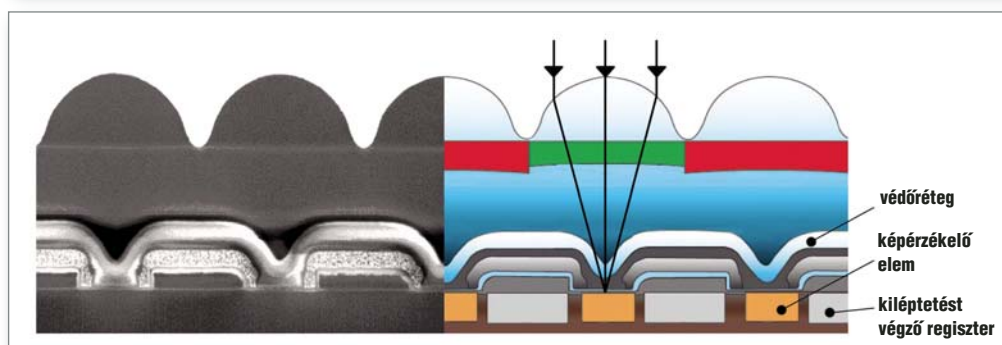
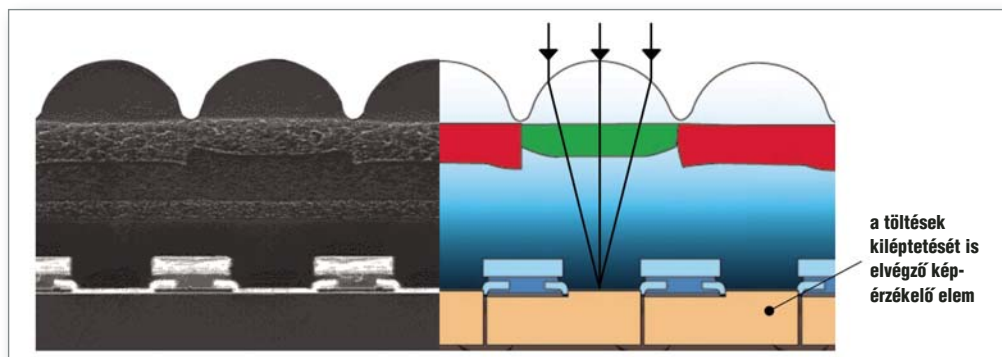


A CCD-k kifejlesztése

A fotovoltikus jelenségre épülő komolyabb optoelektronikai kutatások, műszaki fejlesztések az 1950-60-as években kezdődtek. Ebben az időben találták fel a szilícium-fotodiódás fénymérőt, a szilícium-napelemet, és ekkor szabadalmaztatták a CCD léptetőregisztert, amely az első fotodiódából álló mátrix képérzékelők megvalósítását tette lehetővé.

A CCD (Charge-Coupled Device) töltéscsatoló félvezető eszközt Willard Boyle és George E. Smith (képünkön) találta fel 1969-ben. Mindketten az AT&T Bell Labs kutatói voltak, akik akkoriban a buboréktárolók létrehozásán dolgoztak. Foglalkoztak félvezetőmemória-kutatásokkal is, ezen belül azzal, hogy hogyan lehet töltésekkel információt tárolni, és azt a tárolóeszközből kivezetni, kiolvasni. A CCD elnevezés eredetileg arra a vékonyréteg félvezető eszközre utalt, amely lehetővé tette a félvezető anyag felszíni rétegeiben tárolt elektromos töltések veszteség nélküli vezetését egyik pontból a másikba. A CCD működésének megértéséhez képzeljünk

el egy félvezető réteg felületén három egymás mellett levő vékonyréteg-kondenzátort, melyek egymással töltések vezetésére alkalmas csatornával vannak összekötve. Töltsük fel az első, és kössünk egyik fegyverzetre pozitív feszültséget. A jelen levő negatív töltések a pozitív tér vonzása miatt az első helyen tárolódnak. Ha a feszültséget átkapcsoljuk a következő kapacitásra, akkor a töltések a tér áthelyezésével a csatornán keresztül átszáto-lódnak a következő kapacitásra, majd így tovább. Ilyen módon, külső vezérléssel a töltéseket a félvezető szelet felületén mozgatni lehet az egyik pontból a másikba. A Bell Labs feltalálói hamar felismerték, hogy ez az eszköz, kombinálva az ismert fotovoltikus jelenséggel, több más alkalmazás mellett alkalmas lehet képérzékelők kialakítására is, így szabadalmukban külön igénypontban ezt is rögzítették. Igazuk lett, találmányuk rendkívüli jelentőségűvé vált, elindította a digitális képrögzítési technológiák fejlődését. A két feltalálót a tudomány később megjutalmazta: Boyle és Smith 2009-ben fizikai Nobel-díjat vehetett át Stockholmban, munkásságuk elismeréseképpen.



Full frame transfer (felül) és interline felépítésű (alul) CCD elektronmikroszkópos metszeti képe és elvi rajza. Jól látható, hogy az interline szenzornál a kiléptetést végző közbenső regiszterek milyen sok helyet foglalnak el a szenzor értékes területéből

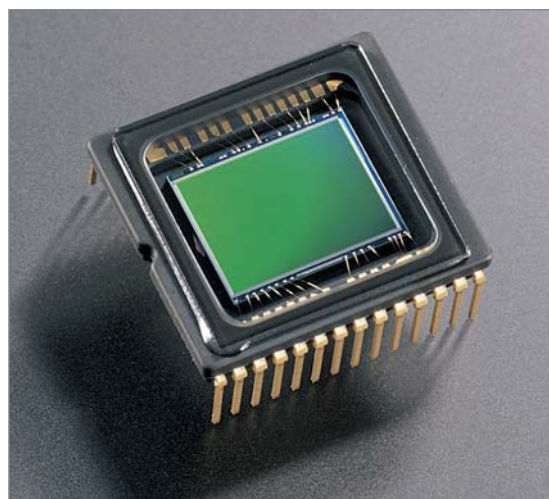
a pixelmátrix minden eleme közel azonos pillanatban exponálódik.

A kiléptetést a zár becsukódása után maguk az egyes pixelek végzik. Ennél a megoldásnál elkerülhetetlen a mechanikus zárszerkezet alkalmazása, mert a szenzor felülete a kiolvasás közben is fényérzékeny, így ez a folyamat csak teljes sötétben hajtható végre. Az igényesebb gépeknél többnyire ezt a megoldást alkalmazzák költségesebb volta ellenére. A frame transfer exponálási rendszernél a zár/megvilágítás funkció elektronikusan történik. Az expozíció indításakor a töltésmátrixot kiüritik, majd a megvilágítási idő végén a teljes töltésképét egy, az érzékelő másik felén levő, de fénytől fedett tárolómátrixba helyezik (tolják) át, viszonylag nagy sebességgel. A további feldolgozáshoz a pixelenkénti töltéskioltás és -feldolgozás innen történik, de már lassabban. Régebbi, olcsóbb kompaktoknál alkalmazták ezt a megoldást, amelynek hibája, hogy a következő felvételig ki kell várni a töltéskép áttolódásának idejét, amíg a CCD újra expozícióképes lesz. Ilyen szenzorokkal ma már nem találkozhatunk a fényképezőgépekben.

Interline-rendszerű szenzort alkalmaznak szinte az összes mai kompaktban. Ennél a mátrix sorai közé belső töltéstároló sorokat, léptetőregisztereket helyeznek el, melyekbe rendkívül gyorsan csatolják át soronként a fotoaktív elemek exponálás utáni töltéstartalmát. Ezzel a megoldással a két felvétel közti időt jelentősen le lehet csökkenteni. A teljes kép időigényesebb kiolvasása és feldolgozása már ezekből a közbenső regiszterekből történik. Az elektronikusan vezérelt zár-funkció nagy sebessége miatt a bemozdulási hibák jelentéktelenek. E megoldás nagy hátránya, hogy a köztes sorok helyigénye a szenzor felületi

kitöltési tényezőjét (fill factor) jelentősen lecsökkenti (kisebb lesz a hasznos, fényérzékelő terület), ami a zajra hat kedvezőtlenül. Előnye viszont, hogy nem igényli mechanikai zárszerkezet alkalmazását, ugyanis a kiléptetés a fénytől védett töltéstároló sorokban történik.

A CCD csak a fotodiódákat, a töltéstároló kapacitásokat és a töltés-feszültség konvertert tartalmazza, minden egyéb elektronika (jelerősítők, vezérlőelektronika, A/D konverterek stb.) a szenzoron kívül, egy külső áramkörtől kerül elhelyezésre. Erősítést végző tranzisztort mint aktív elemet a CCD lapka nem tartalmaz, kimenetén analóg jelek vannak. Mindez lényegi különbség a CMOS képérzékelő architektúrákhoz képest, azoknál ugyanis az analóg, illetve a digitális jelfeldolgozó áramkörök jó része a képérzékelő lapkán található. A CMOS érzékelők kimenetén ennek megfelelően digitális jeleket találunk.



Interline rendszerű, 7,1x5,3 mm-es CCD. Hasonló található szinte az összes mai kompakt fényképezőgépben

Kapcsolódó cikkek

2003. október, 58. oldal – Boncasztal: Tükörreflexes fényképezőgép
2003. decembertől – Képérzékelők felépítése, működése 1–3.
2005. november, 42. oldal – CMOS kontra CCD
2007. júli-aug, 62. oldal – Hogyan keletkezik a képzaj?
2009. jan.-febr., 119. oldal – Felbontás, szenzorméret, nagyíthatóság

A következő részekben

- A CMOS-ok működése
- MOS és CMOS
- Hogyan készülnek a szenzorok?
- CCD és CMOS érzékelők összehasonlítása