

Töltés-továbbítású eszközök — A félvezető technika új iránya

ETO 621.382.001.6

A szigetelt kapujú MOS eszközök tárháza 1970-től egy új, igen sokatigéző eszköztípussal, a töltés-továbbítású eszközökkel (CTD=Charge Transfer Device) gyarapodott. Az ilyen típusú eszközök ötlete eredetileg W. S. Boyle-től és G. E. Smith-től, a Bell Laboratorium (USA) kutatóitól származik [1], akik eszközüket „töltés-csatolású eszköz”-nek (CCD=Charge Coupled Device) nevezték el. Azóta a kutatók rendkívül intenzíven foglalkoznak az ilyen típusú eszközökkel, további új, hasonló működésű eszközöket is kidolgoztak. Ezenkívül ide sorolható még a Philips cég kutatói, F. L. J. Sangster és mások által kidolgozott, tervezérlésű MOS tranzisztorokon alapuló ún. „integrált vödör-lánc tároló” (BBD=Bucket-Brigade Device) is [2—4].

Nyugodtan állíthatjuk, hogy a félvezetők fejlesztése terén jelenleg ezen eszközök iránt mutatkozik a legnagyobb érdeklődés. Ennek az oka elsősorban gazdasági jellegű. Általános a vélemény, hogy a legmodernebb létező MOS-memóriákkal összehasonlítva az árak aránya kb. 5:1 a CTD-k javára. Ez főként az egyszerűbb előállítási technológiából következik. A fenti eszközök közös tulajdonsága ugyanis, hogy az információt elektromos töltésekből álló töltéscsomagok formájában tárolják, illetve továbbítják a sorban elhelyezett cellák között, ami a technológia lényeges leegyszerűsödéséhez vezet:

A legköltségesebb lépést jelentő fémes kivezetések száma általában kisebb (a CTD-nél általában csak 5 vagy 6 kivezetés szükséges: egy bemenet, egy kimenet, kettő vagy három a meghajtó impulzusok és egy a test számára), a belső összekötések sokkal egyszerűbbek.

Összehasonlíthatatlanul kevesebb diffúzió szükséges, ezek egy lépésben elvégezhetők, a velük szemben támasztott minőségi követelmények csökkenése mellett. A diffúzió szintén a legnehezebb lépések közé tartozik, ezek csökkentése volt a fő oka annak, hogy a MOS-memóriák nagyrészt kiszorították a bipoláris tranzisztorok elvén alapulókat és a félvezető memóriákat a mágnessel versenyképesé tették annak ellenére, hogy teljesítménydisszipációjuk általában nagyobb, kapcsolási sebességük pedig kisebb, mint a bipoláris memóriáké.

Egységnyi információ tárolásához geometriailag sokkal kisebb hely szükséges, mint MOS alapú tárolók esetében. Ezek alapján várható, hogy ezek az eszközök jobb kizozatalúak lesznek, s egy félvezető szeleten sokkal több információ lesz elhelyezhető — előreláthatólag egy 10 000 bites memória ára 10 \$ körül lesz. Ami a méreteket illeti, a jelenlegi kísérleti példányoknál általában sikerült elérni a 0,0014 mm²/bit helyszükségletet, ami majdnem egy nagyságrenddel

kisebb, mint a többi félvezetős memóriáknál. További modernebb eljárások alkalmazásával („self-aligned” technológia, elektronsugaras maszkkészítés) ez még tovább, kb. 0,001—0,0002 mm²/bit-re csökkenthető (kb. 1500 bit egy mm² felületen, azaz pl. 10 000 bit-nyi információ egyetlen kis félvezető kristálydarabkán!). A CTD-k felső frekvenciahatára jelenleg kb. 10—20 MHz, de megfelelő tervezéssel, illetve technológiával 50—100 MHz-re, sőt tovább is növelhető. Teljesítményigényük (a kapcsolási frekvenciától függően) 5—20 μ W/bit, memóriaként való felhasználás esetén pedig nyugvó („standby”) üzemmódban akár 20 nW/bit is lehet. Ezzel szemben a dinamikus MOS-memóriákra vonatkozó adatok max. 5 MHz, illetve ilyen frekvenciánál 100 μ W/bit [5—11].

A fentiekén kívül a töltés-továbbításos technológia másik nagy előnye a sokoldalúságban rejlik. A CTD-k alapján véve dinamikus léptető-tárolók és alkalmazhatók bárhol, ahol sorosan elérhető tárolókat használnak, mint például dob- vagy lemezmemóriák, késleltető vonalak, katódsugárcsöves frissítő és buffer memóriák, rövid elérési idejű törölhető, valamint sorozatosan elérhető memóriák stb.

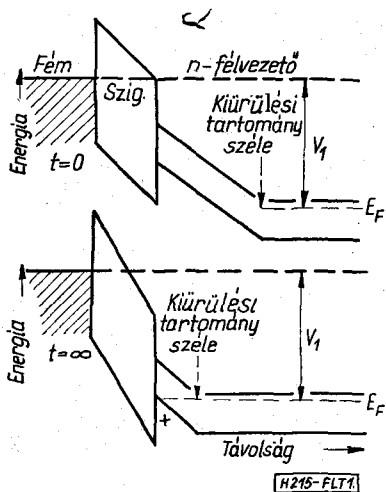
A szóban forgó eszközök hátránya, hogy a tárolt információ, illetve mint már említettük, az annak megfelelő töltéscsomag nem tárolható akármilyen hosszú ideig, s így bizonyos idő elteltével, illetve bizonyos számú cellán keresztül történő továbbítás után az információ felfrissítése szükséges, ezért a CTD-k csak dinamikus üzemmódban működtethetők. Ebből következik, hogy az eszközök alsó frekvenciahatára is limitált (néhányszor 100, esetleg 10 Hz), és ezért alkalmazásuk elsősorban a nagy sebességet és információsűrűséget igénylő területeken látszik rendkívül sokat ígérőnek.

A digitálison kívül a CTD-k alkalmasak analóg jelek tárolására, léptetésére, illetve késleltetésére is, ami további széles körű alkalmazási lehetőségeket rejt magában.

A fentiek alapján tehát a különböző tárolók területén a CTD-k a többi félvezető és egyéb memóriák erős versenytársaként jelentkeznek.

De ezzel még távolról sem merültek ki a CTD-k lehetséges felhasználási területei: ezek az eszközök ugyanis rendkívül egyszerűen felhasználhatók optikai jelek, jelsorozatok, képek elektromos jelekké való átalakítására. Egyaránt kialakíthatók lineáris vagy két dimenziós képjel átalakítók (vidikonok), amelyek az összes fentebb ismertetett előnyös tulajdonságokkal rendelkezvén szinte az egyetlen igazán versenyképes szilárdtest alapú (tehát többek között kisméretű, lapos és kifestésű) megoldást kínálják.

A töltés-továbbítású eszközök működésének alapjai a következőkben foglalhatók össze.



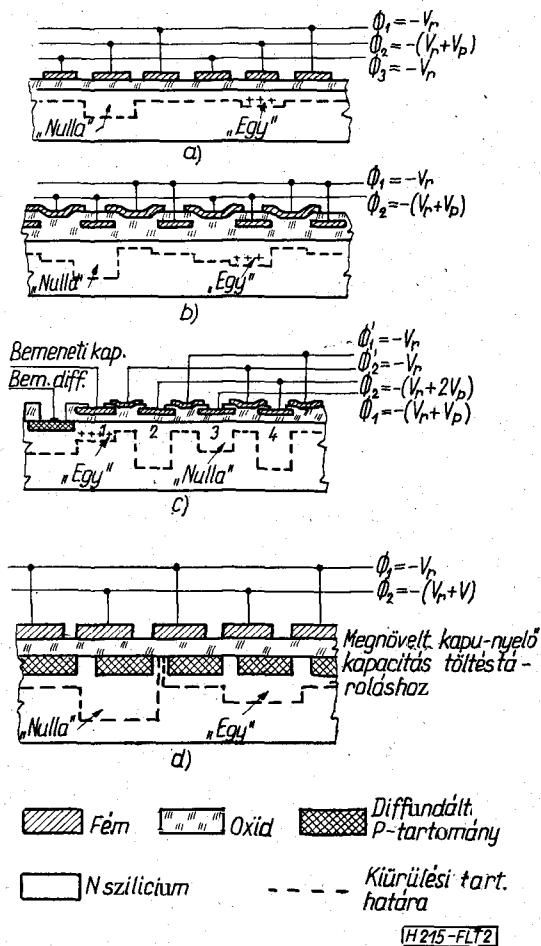
1. ábra. A fém-oxid-félvezető rendszer energiadiagramja; rögtön a fémelektroda V_1 feszültségre való kapcsolása után a felületen nincs töltéstárolás (a) és az egyensúly beállta, illetve a töltés bevitelét után (b)

Egy félvezető anyag (általában szilícium) felületén potenciálgödröket hozunk létre, amelyekben elektronokat (vagy lyukakat) raktározunk el, s ezeket a potenciálgödrök mozgatása révén töltéscsomagok formájában a felület mentén továbbítjuk [1]. A potenciálgödört egy a félvezetőt fedő szigetelő (oxid) réteg tetején kiképzett fémelektrodára adott megfelelő feszültség segítségével hozzuk létre. Ez a feszültség a felületen az első pillanatban egy mély, nem egyensúlyi kiürülési tartományt létesít (1a ábra). Bizonyos idő eltelte után ebben a térfogathoz képest kisebbségi hordozókat gyűlnek össze (az ábrán lyukak), amelyek a potenciálgödört feltöltik, s a felület inverzióba megy át, beáll a termikus egyensúly (1b ábra). A hordozókat elsősorban a termikus generáció szolgáltatja, ami elég lassú folyamat, néhány másodpercet is igénybe vehet. Ha ezen idő törtrésze alatt a potenciálgödörbe kívülről töltéshordozókat juttatunk, akkor az egyébként még üres gödörben levő töltések száma az információ mértékéül szolgálhat. Pl. EGY-nek feltöltött, NULLA-nak pedig üres gödör feleltethető meg. Ez a külső generálás, illetve jelbetáplálás történhet pl. egy p-n átmenet, vagy fém segítségével, ez utóbbi esetben a töltéshordozók száma a fény erősségével lesz arányos. Nyilvánvaló, hogy mindez csak a termikus generáció által meghatározott időnél jóval rövidebb intervallumokban használható információtárolásra, s elsősorban ez határozza meg az eszköz alsó határfrekvenciáját.

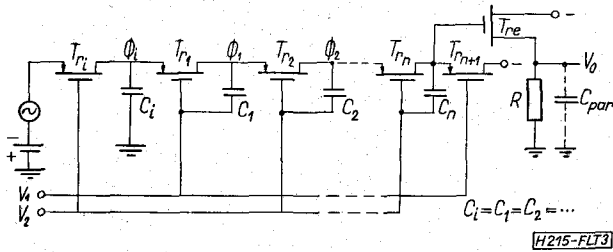
Ily módon tehát a felület közelében töltéscsomagot tudunk tárolni. A továbbiakban gondoskodni kell ennek továbbításáról a felület mentén, miáltal egy léptető-tárolóhoz jutunk. Ennek megoldására több megoldás létezik, ezeket a 2. ábrán vázoltuk fel. A 2a ábrán látható töltéscsatolású (CCD) eszköz esetében a felületen egymáshoz igen közel (kb. $3 \mu\text{m}$) távolságra elhelyezett elektródasor van kialakítva, amelyet háromfázisú rendszerbe kapcsolunk össze úgy, hogy a szomszédos elektródák alatti potenciálgödrök egymáshoz kapcsolódnak és a pozitív töltés a felület mentén a feszültségimpulzusok sorrendje által meghatározott irányban tovahalad. A 2b ábra esetében

ben kétfázisú elektródkapcsolást használunk és az egyirányú haladás biztosítása érdekében minden potenciálgödör két különböző mélységű tartományból áll, amit a minden második elektróda alatt kiképzett vastagabb szigetelő réteg tesz lehetővé. A 2c ábrán a General Electric (USA) cég kutatói W. E. Engeler, J. J. Tieman és R. D. Baertsch által feltalált felületi-töltés transzisztor (SCT=Surface Charge Transistor) látható [7, 12, 13].

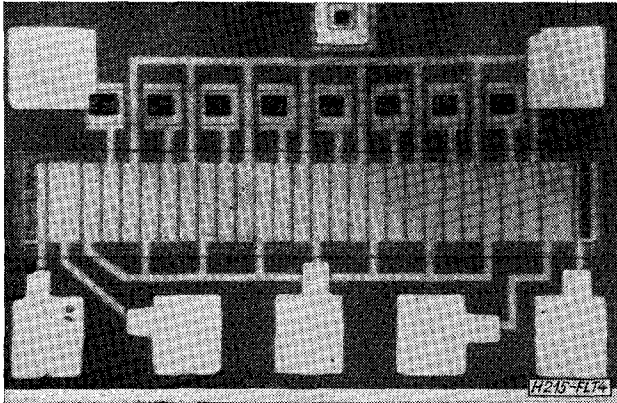
Ez az eszköz konvencionális MOS-transzisztorokhoz hasonló működésű, de a forrás és nyelő tartományokat nem diffúzióval hozzuk létre, hanem azáltal, hogy a Φ_1 és Φ_2 elektródák alatt negatív feszültségimpulzusok segítségével inverziós tartományokat hozunk létre. A Φ_1 és Φ_2 elektródákra adott kapcsoló impulzusok pedig ezeket a tartományokat összekötik, illetve szétválasztják, lehetővé téve ezáltal a megfelelő töltésáramlást. Nyilvánvaló, hogy az impulzusok felcserélésével a töltéscsomagok haladási iránya egyszerűen megfordítható. A fenti esetben a tárolt töltés mindvégig a félvezető felületén kialakított inverziós tartományban marad. Az integrált MOS vödör-lánc (BBD) eszköz esetében (2d ábra) azonban már más a helyzet. Itt a fémelektrodák szintén kétfázisú sorba vannak kötve, de az elektródák alatt p-típusú diffúziós szigeteket hoznak létre. Így a jelet



2. ábra. A töltés-továbbítású eszközök alaptípusai: a) háromfázisú töltés-csatolású (CCD) eszköz, b) kétfázisú CCD, c) felületi-töltés transzisztor (SCT) (ezen az ábrán a töltésbecsátoló fokozat is látható), d) integrált MOS vödör-lánc tároló (BBD)



3. ábra. A BBD helyettesítő kapcsolása



4. ábra. Egy, az MTA Műszaki Fizikai Kutató Intézet Rétegszerkezetek Osztályán készült háromfázisú rendszerrel dolgozó 8 bites töltés-csatolású léptető tároló képe 160-szoros nagyításban

képviselő töltés az alaphoz képest záróirányú előfeszítést nyert p-típusú tartományokban, további többségi hordozók formájában tárolódik, azaz tulajdonképpen a fémelektrodák és az általuk átlapoltt p-tartományok közötti kapacitás feltöltése révén. Ennek szemléletesebb bemutatása végett a 3. ábrán a BBD helyettesítő kapcsolását is felvázoltuk. A töltés továbbítása az előző eszközhöz hasonló módon, a fémelektrodákra adott negatív impulzussorozat révén megy végbe. A tárolósor végére érkező töltéscsomag (információ) kicsatolása történhet záróirányban előfeszített p-n átmenet vagy egyszerűen nagy negatív (pozitív) feszültségre feltöltött, majd „lebegőre” kötött érzékelő fémelektroda segítségével.

A 4. ábrán egy az MTA—MFI-ben készült 8-bités háromfázisú CCD léptető tároló képét mutatjuk be.

Nem érdektelen megjegyezni, hogy míg a BBD diszkrét elemekből is felépíthető, mint az a helyettesítő kapcsolásból is látható, a többi CTD tulajdonképpen az első igazi integrált félvezető eszköz, amely az anyag egészére jellemző tulajdonságokat használ ki, s részeire egyáltalán nem bontható.

Az említett termikus generáción kívül több más jelenség is befolyásolja a töltéscsomag továbbítását, illetve annak eltorzulásához vezet. Ilyen pl. a felületi állapotokon történő töltésbefogás és az a jelenség, hogy az elektrodák közti véges távolság miatt a potenciálgödrök nem érnek össze teljes magasságukban, hanem közöttük egy potenciálgát alakul ki, ami a szabad töltéscsomagot befolyásolja. Az elektrodák közelítésének a maszkkészítés felbontóképessége szab határt, ami szokásos fotomaszk esetében 2,5–3 μm. Ennek áthidalására pl. kétszeres oxidációval kialakít-

ható, „betemetett” elektrodákkal rendelkező, átlapoló elektrodasor használható, ilyenek a 2b és 2c ábrán látható kapcsolások. De a maszkkészítés felbontóképessége is növelhető pl. elektronsugaras technikával. További lehetőség az átviteli hatásfok növelésére pl. az ion-implantációs technológia alkalmazása. Ennek segítségével az utóbbi időben a felület mentén igen vékony (1 μm) „betemetett” csatornát alakítanak ki, ekkor a töltések ebben áramlanak, ami olyan nagymértékű hatásfok-növekedéshez vezet, hogy többszáz cella köthető sorba frissítés nélkül. A szokásos átviteli hatásfok jellemzésére megjegyezzük, hogy pl. egy 86 cellás háromfázisú rendszerrel 1 MHz meghajtó frekvencia mellett kb. 95%-os teljes töltésátvitelt figyeltek meg, ami 99,98%-os elemek közötti hatásfoknak felel meg [14].

A fentiek alapján világos, hogy miért van szükség a töltéscsomag időnkénti frissítésére. Ennek megoldására a kutatók több egyszerű megoldást szerkesztettek. Ezeknél a frissítést egy külön frissítő cella végzi, amelyet a többi töltéstovábbító cella közé sorosan építenek be. A cella mérete nem nagyobb mint 1–2 bit tárolásához szükséges hely, így a méretek csak alig növekednek. A frissítő fokozatot ugyanazok az impulzusok működtetik, mint a többi fokozatot és a szükséges kivezetések számát az egész rendszeren csak eggyel vagy kettővel növeli meg, mivel az összes ilyen cella egyszerre működtethető. De létezik olyan megoldás is, ahol a frissítő cella egyáltalán nem igényel külön kivezetést. A frissítéshez külön diffúziós szigeteket kell létrehozni, de ez nem lényeges hátrány, mivel az a be- és kimeneti diffúzióval egy lépésben készíthető. Ezzel szemben a frissítő fokozatok segítségével különböző logikai kapcsolások is elvégezhetők, úgy mint NAND és NOR kapuk, számláló impulzusórák, soros vezérlés stb. [9, 15]. Hosszabb tárolók esetén általában 30–60 cella után szükséges egy frissítő fokozat beépítése, de közteltek már olyan adatot is, amely szerint 256 bit köthető sorba frissítés nélkül [11]. Nagyobb tárolók esetén a bit-sorok egymás alá több sorban is elhelyezhetők, ilyenkor két sor közé építenek be frissítő cellát és az egyik sorban beérkező legyengült jel a másik sorban felfrissítve ellenkező irányban kerül továbbításra.

A fentiekben már említettük, hogy a töltéscsomagot alkotó hordozók fényel is gerjeszthetők, aminek alapján nyilvánvaló, hogy a CTD rendkívül egyszerűen használható kép-elektromos jel átalakítására is. Ilyenkor minden cellából egy tagra a tároláshoz szükséges feszültséget adnak, majd ezen fegyverzetek alatt a fény által generált hordozókat a szükség szerint pl. 0,25–65 msec ideig összegyűjtik. Ezután a töltéscsomagokat nagy sebességgel, pl. 1 MHz kapcsolási frekvenciával a kicsatoló diódához továbbítják, s így egy rendkívül egyszerű önletapogató rendszerhez jutnak. A rendszer lehet lineáris vagy két-dimenziós kialakítású is. A rendszerek előnye, hogy minden képpont ugyanazon a diódán keresztül, tehát azonos zaj és sötétárammal kerül kicsatolásra. Hátrány viszont, hogy a távolabbi képpontokból érkező jelek jobban deformáltak lesznek. Ennek leküzdésére is intenzív kutatások folynak. Először a Bell Laboratorium-ban sikerült 96 cellás lineáris CCD-vel igen jó minőségű képeket továbbítani [14, 18].

Utóbbi időben a Fairchild cégnél készítettek igen kiváló tulajdonságokkal rendelkező 500 képpontos lineáris CCD, az RCA-nál pedig 32×44 elemes két-dimenziójú BBD képfelvetőt. Az alábbiánál 2,5 MHz kapcsolási frekvencia mellett 99,99999%-os átviteli hatásfokot sikerült elérni. Jelenleg egy nagyobb két-dimenziós rendszer kialakítása van folyamatban. A Bell Laboratorium-ból az első valódi CCD vidikonról érkezett hír: 128×106 elemes elrendezést készítettek, amely képtelefonban működik. A kutatások továbbra is intenzíven folytatódnak, mind a lineáris, mind a kétdimenziós kamerák terén.

Hasonló a helyzet a General Electrics-nél is, ahol x—y címzésű képfelvetőt dolgoztak ki.

A memóriák terén újabban az IBM-nél készítettek egy 5760 bites CCD buffer memóriát, amely két 2880 bites chip-et tartalmaz. Egy chipen 6 db 480 bites sorbakapcsolt CCD shift regiszter van, 48 bitenként ismétlődő frissítéssel. Cellaméret: $1340 \mu\text{m}^2/\text{bit}$, de a teljes tároláshoz használt aktív terület csupán $770 \times 2300 \mu\text{m}^2 = 1,8 \text{ mm}^2$. Az egész memóriát egy $8,9 \times 11,4 \text{ cm}$ -es lapra szerelték fel a kisegítő áramkörökkel együtt, ami a többi IBM memóriakártyával csereszabatos. Kapcsolófrekvencia 0,5 MHz.

A General Electrics-nél SCT-k felhasználásával elkészítették az első x—y címzésű ilyen típusú „Random Access Memory”-t.

A Bell Laboratorium-ban külön „Random Access” CCD memóriacsoportot hoztak létre és már sikerült is a kapcsolási frekvenciát néhányszor 100 MHz-re növelni, sőt remélik, hogy a jövőben a gigaherzes határt is sikerül átlépniük. Ugyanitt 500 elemes CCD analóg késleltető vonalat is építettek, 1—10 MHz sávészellel.

A Texas Instruments cég 10 kHz-es 13 bites MOS BBD „transzverze” szűrővel jelent meg [11, 16].

Az első kereskedelemben kapható BBD eszköz az Amperx Electrics Co (Nort-American Philips) M 31 jelű 32 lépcsős analóg léptető tárolója, ára 10 \$.

A vidikonként való felhasználás kapcsán megjegyezzük, hogy a CTD-k a jövőben számítógépekben valószínűleg nemcsak mint önálló memóriák nyerhetnek majd alkalmazást, hanem a szintén rohamléptekkel fejlődő holográfia-memóriák részeként is.

A képátalakítás folyamata a CTD-ben elvileg meg is fordítható és így módon számkijelző berendezések épülhetnek. Ehhez azonban a szilícium helyett más félvezető anyagra lenne szükség és ilyen irányú kutatások egyelőre még nem ismeretesek.

Befejezésül egy lehetséges CTD memória szervezést ismertetünk [9]. Az ilyen memóriáknál 1 bit képzéséhez kevesebb, mint 10^{-12} joule energia szükséges, ami félvezetőknél eddig általában az alsó határnak számított. Ez az energia még tovább csökkenthető és elvileg elérheti a néhányszor 10^{-14} joulet is, tehát ebből a szempontból a CTD még a mágneses buborék memóriáknak is versenytársa. Ha egy félvezető lapocskán 10^4 bitet képezünk ki, ez 10^7 bit/sec sebességnél $20 \mu\text{W}/\text{bit}$, illetve 0,2 W az egész egységnél. Több ilyen „chip” nagy rendszerre szervezhető közös kapcsoló impulzusokkal. A rendszerből adott pillanatban mondjuk 10 „chip” dolgozik egyszerre, ez kb. 2 W teljesítményt igényel. Ugyanakkor az egységek

nagyobb része tároló üzemmódban hagyható és a frissítések elvégzése érdekében elegendő a töltést alacsonyabb frekvenciával, pl. 10^4 Hz -el „körülhajtani”. Ehhez viszont 10^8 bitnél szintén csak 2 W teljesítményfelvétel szükséges.

Összefoglalva megállapíthatjuk, hogy a töltéstovábbító eszközök a félvezető technika rohamosan fejlődő új, rendkívül sokatígérő területe. Ez a felismerés az oka annak, hogy a legfrissebb értesülések szerint a hadiipar is igen nagy érdeklődést mutat ezen eszközök iránt. Az Egyesült Államok hadseregének mindhárom fegyverneménél folynak már az ilyen irányú munkálatok, a programban résztvevő vállalatokkal több jelentős szerződést kötöttek és a Hadi-tengerészeti Elektronikai Intézete keretében (Navelex) közös koordináló szervezet is létrehoztak [16, 19].

I R O D A L O M

- [1] W. S. Boyle; G. E. Smith: Charge Coupled Semiconductor Devices; Bell Syst. Techn. J. 49 (1970) 587—593.
- [2] F. L. J. Sangster: Integrated MOS and bipolar analog lines using bucket-brigade capacitor storage; IEEE Int. Solid-State Circuits Conf. (1970) 74—75.
- [3] F. L. J. Sangster; K. Teer: Bucket-brigade electronics — new possibilities for delay, time-axis conversion and scanning; IEEE J. Solid-St. Circuits SC-4 (1969) 131—136.
- [4] F. L. J. Sangster: Der „Eimerkettenspeicher”, ein Schieberegister für analoge Signale; Philips Techn. Rdsch. 31 (1970—71) 91—111.
- [5] L. Altmann: The new concept for memory and imaging: Charge coupling; Electronics June 21 (1971) 50—59.
- [6] W. S. Boyle; G. E. Smith: Charge coupled devices — A new approach to MIS device structures; IEEE Spectrum July (1971) 18—27.
- [7] W. E. Engeler; J. J. Tiemann; R. D. Baertsch: The surface-charge transistor; IEEE Trans. Electron Dev. ED-18 (1970) 1125—1136.
- [8] W. E. Engeler; J. J. Tiemann; R. D. Baertsch: A memory system based on surface-charge transport; IEEE J. Solid-St. Circuits SC-6 (1971) 306—313.
- [9] W. F. Kosonocky; J. E. Carnes: Charge-coupled digital circuits; IEEE J. Solid-St. Circuits SC-6 (1971) 314—322.
- [10] J. E. Carnes; W. F. Kosonocky; E. G. Ramberg: Drift-aiding fringing fields in CCDs; IEEE J. Solid-St. Circuits SC-6 (1971) 332—326.
- [11] Electronics February 28, 1972.
- [12] W. E. Engeler; J. J. Tiemann; R. D. Baertsch: Surface charge transport in silicon; Appl. Phys. Letts. 17 (1970) 469—472.
- [13] R. D. Baertsch; W. E. Engeler; J. J. Tiemann: The pluses and minuses of charge transport device; Electronics de. 6. (1971) 86—91.
- [14] M. F. Tompsett; G. F. Amelio, et. al.: Charge-coupled imaging devices; Experimental results; IEEE Trans. Electron Dev. ED-18 (1971) 992—996.
- [15] M. P. Tompsett: A simple charge regenerator for use with charge-transfer devices and the desing of functional logic arrays; IEEE J. Solid-St. Circuits SC-7 (1972) 237—242.
- [16] Electronics May 22, (1972) 29.
- [17] F. L. J. Sangster: Integrierter Eimerkettenspeicher mit MOS-Tetroden; Philips Techn. Rdsch. 31 (1970—71) 270.
- [18] Bell Labs. Record, April (1971) 128.
- [19] Electronics October 9. (1972) 81.
- [20] W. S. Boyle: New approaches to Metal-Insulator-Semiconductor device structures; Proc. Int. Conf. on Phys. Chem. Cemic. Heterojunctions and Layer Structures (Ed.: G. Szigeti), Akadémiai Kiadó, Budapest (1971) vol. 5. 27—37 old.
- [21] G. F. Amelio; M. F. Tompsett; G. E. Smith: Experimental Verification of the charge coupled device concept; Bell Syst. Techn. J. 49 (1970) 593—600.
- [22] M. F. Tompsett; G. F. Amelio; G. E. Smith: Charge coupled 8-bit shift register; Appl. Phys. Letts. 17 (1970) 111—115.

- [23] Bell Labs. Record. June/July (1970) 188–189.
- [24] L. Altman: New MOS technique points way to junctionless devices; Electronics May 11 (1970) 112–118.
- [25] R. J. Strain; H. L. Schryer: A nonlinear diffusion analysis of charge-coupled device transfer; Bell Syst. Techn. J. 50 (1971) 1721–1740.
- [26] R. J. Strain: Power and surface states loss analysis of charge-coupled devices; IEEE El. Devices Meeting, Washington D. C. Oct. 1970.
- [27] T. S. Jayadevaiah; J. Laur: Simple model for charge-coupled devices; Electronics Letters 7 (1971) 751–753.
- [28] T. S. Jayadevaiah; J. Laur: A theory of charge-coupled devices (megjelenés alatt).
- [29] C. K. Kim; M. Lenziinger: Charge transfer in charge-coupled devices; J. Appl. Phys. 42 (1971) 3586–3594.
- [30] E. A. Fetiszov; V. N. Hitrov: Perenosz zarjada dvizuscseszsja potencialnoj jamoj; IV. Vseszojuznoe szovescsanie po elektronnum javljenijam na poverhnoszti poluprovodnikov.
- [31] W. B. Joyce; W. J. Bertram: Linearized dispersion relation and Green's function for discrete-charge-transfer devices with incomplete transfer; Bell Syst. Techn. J. 50 (1971) 1741–1759.
- [32] C. N. Berglund; H. J. Boll: Performance limits of bucket brigade shift registers; IEEE El. Dev. Meeting, Washington D. C. Oct. 1970.
- [33] G. F. Amelio; W. J. Bertram; M. F. Tompsett: Charge-coupled imaging devices: Design considerations; IEEE Trans. Electron Dev. ED-18 (1971) 986–992.
- [34] P. K. Weimer; M. G. Kovac: Shift-scanned image sensors based of charge transfer by the bucket-brigade method; IEEE Trans. Electron Dev. ED-18 (1971) 996–1003.
- [35] K. K. Thornber: Incomplete charge transfer in IGFET bucketbrigade shift registers; IEEE Trans. Electron Dev. ED-18 (1971) 941–950.
- [36] M. F. Tompsett: The quantitative effects of interface states on the performance of charge-coupled devices; IEEE Trans. Electron Dev. (megjelenés alatt).
- [37] C. N. Berglund; R. J. Strain: Fabrication and performance of charge-transfer dynamic shift-registers; Bell System Techn. J. 51 (1972) 655–703.
- [38] G. F. Amelic: Computer modeling of charge-coupled device characteristics; Bell System Techn. J. 51 (1972) 705–730.
- [39] L. Altman: Bucket brigade devices pass from principle to prototype.
- L. Boonstra; F. L. J. Sangster: Analog functions fit neatly onto charge transport chips.
- M. C. Kooac, et. al.: Solid state imaging emerges from charge transport; „Special Report”, Electronics February 28 (1972) 62–77.
- [40] G. N. Berglund; H. J. Boll: Performance limitations of IGFET bucket brigade shift registers; IEEE Trans. Electron Dev. ED-19 (1972) 852–860.
- [41] J. E. Carnes; W. F. Kosonocky: Noise source in charge coupled devices; RCA Rev. 33 (1972) 327–343.
- [42] J. E. Carnes; W. F. Kosonocky; E. G. Ramberg: Free charge transfer in charge-coupled device; IEEE Trans. Electron Dev. ED-19 (1972) 798–808.
- [43] P. P. Gelberger; C. A. T. Salama: A uniphase charge-coupled device; Proc. IEEE 60 (1972) 721–722.
- [44] D. F. Barbie: Noise and distortion considerations in CCDs; Electronics Letts. 8 (1972) 207–208.
- [45] D. D. Buss; W. H. Bailey; D. R. Collins: Matched filtering using tapped bucket brigade lines; Electronics Letts. 8 (1972) 106–107.
- [46] W. J. Butler; M. B. Barron; C. M. Puckette: Bucket brigade bandwidth characteristics; Electronics Letts. 8 (1972) 449–450.
- [47] D. R. Collins; W. H. Bailey, stb.: Charge-coupled-device analogue matched filters; Electronics Letts. 8 (1972) 328–329.
- [48] C. A. T. Salama: Two-phase MNOS charge-coupled-device Electronics Letts. 8 (1972) 21–22.
- [49] C. N. Berglund, stb.: Two-phase stepped oxide CCD shift register using undercut isolation; Appl. Phys. Lett. 20 (1972) 413–414.
- [50] J. E. Carnes; W. F. Kosonocky: Fast-intergace-state Losses in charge-coupled-devices; Appl. Phys. Lett. 20 (1972) 261–263.
- [51] C. Kim; E. H. Snow: p-channel charge-coupled-devices with resistive gate structure; Appl. Phys. Lett. 20 (1972) 514–516.
- [52] R. H. Walden, stb.: The buried-channel CCD; Bell System Techn. J. 51 (1972) 1635–1640.
- [53] R. J. Strain: Properties of an idealized travelling wave CCD; IEEE Trans. Electron Dev. ED-19 (1972) 1119–1130.
- [54] J. McKenna; N. L. Schryer: On the accuracy of the depletion layer approximation for charge-coupled-devices; Bell System Techn. J. 51 (1972) 1471–1485.