

NMOS integrált áramkörök hírközlő berendezésekhez; az analóg blokkok technológiai problémái*

DR. VALKÓ ÁGNES
Híradástechnikai Ipari
Kutató Intézet

Az elmúlt két évtized mikroelektronikai forradalma egy páratlanul dinamikus iparágat eredményezett. Hatása a hírközléstechnikára is rendkívül nagy. A félvezető iparban a fejlesztéshez szükséges ráfordítások összege és a termelékenységi nagyságrendekkel nagyobb, mint bármely más iparágban. Tehát, hogy az ipar a fejlesztéshez szükséges ráfordításokat előteremtse, újabb és újabb termékekkel, újabb és újabb piacokon kell megjelenie, természetesen olyanokkal, amelyek igen nagy darabszámban eladhatók. A legfőbb termék, a fejlődés motorja, a félvezető memória. Hogy a memóriapiacot kellő mértékben kiszélesítse, a félvezető ipar szinte pillanatok alatt alakította át a számítógépipart, a mikroprocesszoros rendszerek elterjesztésével. Most, hogy a 16 bites mikroprocesszorok és 64 K-s óriásmemóriák korszakába léptünk, egyre égetőbbé válik az a kérdés, milyen újabb termékkel szélesíthető a piac.

Egy, a félvezető ipar szempontjából nagyon vonzó új terület a korszerű időosztásos távközléstechnikát alkalmazó hírközlő berendezések. A PCM rendszerek széleskörű elterjedését nagyon meg fogja gyorsítani az a lehetőség, ha a beszédet már a vevő készülékében egyetlen kis fogyasztású integrált áramkörrel digitális jellé lehet majd alakítani. A félvezetőipar számára pedig perspektivikusnak ígérkezik az a termék, amely egyrészt minden egyes telefonkészülékbe beépíthető, másrészt igen nagy mennyiségű további szabványos félvezetőipari terméket (mikroprocesszoros rendszert, memóriát) vonz magával az elektronikus központ oldalán.

A gazdasági célkitűzés tehát: olcsó, azaz minimális, újabb fejlesztést igénylő gyártási eljárással kialakítható megfelelő áramkörök előállítása. Ezek az áramkörök a feladatukat tekintve a következők:

- beszédet digitális jellé alakító kódoló-dekódoló és
- az ezzel szükségszerűen együttjáró frekvenciaszűrők.

* A TKI Ifjúsági Konferencián (1980. XI.) elhangzott előadás alapján.

Jelenleg a két feladatot két áramköri tokban realizálják, vagy az adó és vevő oldalt, vagy a szűrő és kódoló feladatokat választva szét. Bármelyik szétválasztást tekintjük is, mindkettő analóg és digitális jelkezelési technika realizálását jelenti egyetlen, nagy elemsűrűségű integrált áramkörben. Ez az analóg blokkok előállítását tekintve jelent új feladatot.

A nagy bonyolultságú integrált áramkörök előállítása szempontjából a legperspektivikusabb és legerjedtebb eljárás az NMOS technika.

A MOS tranzisztor első közelítésben ideális kapcsolónak tekinthető. Bekapcsolt állapotban kis ellenállással, kikapcsolt állapotban szakadással szimulálható. A bemenetén áramfelvétel nincs. Így a MOS integrált áramkör – szemben a bipoláris áramkörrel – lehetőséget ad arra, hogy egy csomóponton, akár több milliszekundumig is töltést tároljunk, és azt folyamatosan és törlés nélkül érzékelni tudjuk.

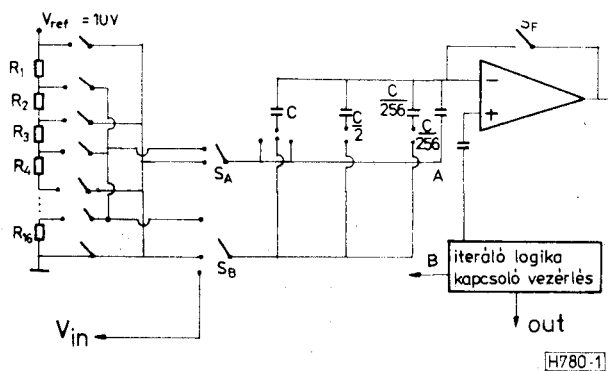
A töltés tárolására szolgáló kapacitást többféle módon is előállíthatjuk. Töltéstárolásra alkalmas a szilícium felületén kialakított tértöltésréteg is. Ezen az elven működnek a töltéscsatolt eszközök (CCD), amelyek igen fontos szerepet játszanak egyes frekvenciaszűrők megvalósításában.

A legközönségesebb töltéstároló eszköz a termikus szilíciumdioxidból kialakított kapacitás.

A kódoló-dekódoló

Ahhoz, hogy az analóg jelből digitális jel álljon elő, három folyamatnak kell lejátszódnia: a mintavételezésnek, az amplitúdókvantálásnak és a kódolásnak. A MOS áramkör töltéskezelő képességének kihasználásával realizálható kódoló az a súlyozó iteráló kódoló, amely a töltés újraelosztás elvén alapszik.

Általánosságban, egy visszacsatolt bináris kódolóban, a mintavételezett jel egy összehasonlító áramkör egyik bemenetére kerül. A másik bemenetre jut a súlyozott, kvantált referenciajel, digitenként



1. ábra. A töltés-úraelosztás elvén működő gyors analóg-digitál átalakító NMOS technológiával. A komparátor bemenetén a kapacitásokban tárolt töltés tartalmazza azt az információt, hogy az éppen sorra kerülő bit értéke milyen

csökkenő helyiérték szerint. A referenciajel aktuális értékét a bekapcsolt súlyok határozzák meg. A súlyokat a kódolás során logikai döntésekkel választják ki. A lineáris bináris kódoló esetén a súly 2 egész számú hatványa. A nemlineáris karakterisztikát digitális kódkonverzióval a lineárisan kódolt jelből állítják elő.

A töltés-úraelosztásos módszer alkalmazásának egy példáját az 1. ábra mutatja [1]. A 12 bit pontosságú monoton gyors A/D konverterben a referenciaszintet ellenállásháló osztja 16 egyenlő szegmensre. A logika először a szegmenseket választja ki az ellenállásháló segítségével, majd azt a kapacitásháló segítségével kvantálja, és a komparátor kódolja.

MOS technológiai szempontból újdonság a precíziós arányú kapacitás és ellenállásháló, melynek technológiai kérdéseire még kitérünk.

Komparátorként alkalmazható a differenciális bemenetű műveleti erősítő. A komparátorként működő műveleti erősítő erősítés-frekvencia függése nem kritikus, így nincs szükség belső kompenzációs bonyolult áramkör létrehozására.

Az átalakító felbontóképességét, vagyis a legkisebb helyiértékű bit értékét a komparátor bemeneti kiegyenlítő feszültsége korlátozza viszonylag durva értékre. Az 1. ábrán bemutatott példában a komparátor kiegyenlítő feszültsége [1] például 2,4 mV. Ezt a feltételt MOS differenciál erősítőkkel nem lehet közvetlenül kielégíteni, ezért a komparátorban a kiegyenlítő feszültséget kapcsolástechnikai módszerrel kompenzálni kell. Ez az offszet kompenzáció jelentős késleltetést okoz az áramkörben, a gyakorlatban a konverter működési sebességét ez korlátozza.

A referenciajelet előállító fokozattal szemben állított követelmények természetesen igen szigorúak. A környezeti hőmérséklet és a tápfeszültség változásaira érzéketlen, zajmentes referenciajel szükséges. A jelet negatívan visszacsatolt, differenciális bemenetű erősítővel állítják elő. A differenciális bemenetre feszültség-referencia kerül. Az NMOS technológiában egy gyártáskor nagyon pontosan beállítható, és jól reprodukálható feszültség-referencia kínálkozik: az ionimplantációval beállított növe-

ményes tranzisztor nyitófeszültsége és az ionimplantációval beállított kiürítési feszültség közötti különbség.

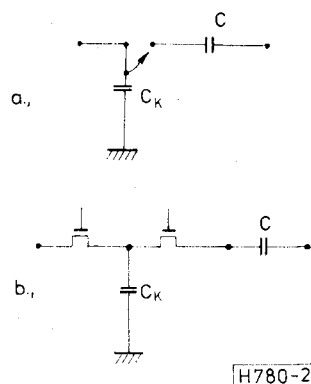
Szűrők kapcsolt kapacitással

Az analóg-digitális jelátalakítás szükségszerűen együttjár bizonyos frekvenciaszűrés feladatok elvégzésével. Speciálisan új feladat a diszkrét időtartományban értelmezett analóg jel, az úgynevezett mintavételezett jel frekvenciaszűrése. A mintavételes jelek szűrés problémáit sok oldalról lehet megközelíteni [2].

Technológiai szempontból nézve a kérdést, a kapcsolt kapacitás is a MOS technika töltésérzékelő és tároló hatását használja ki. Felfogható a kérdés úgy, hogy egy kellően nagy frekvenciájú órajellel kapcsolgatott kapacitás ellenállást szimulál. Egy kapcsolt C_K és egy normál C kapacitás által alkotott kör

$$\tau = \frac{1}{f \text{ óra } C_K} \times C = \frac{1}{f \text{ óra}} \times \frac{C}{C_K} \quad (i)$$

időállandót realizál. Pontos órajelfrekvencia esetében ez csak a két kapacitás arányától függ (2. ábra).

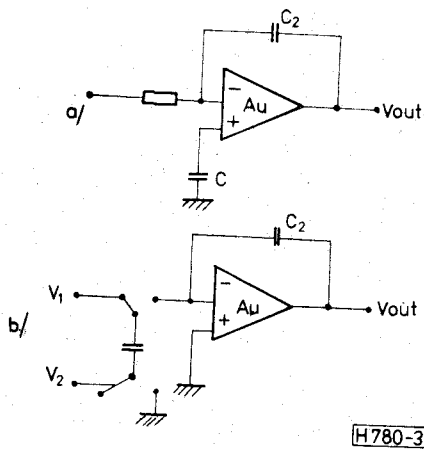


2. ábra. a) RC tagot szimuláló késleltető kapcsolt kapacitással, b) a kapcsolt kapacitás vezérlése MOS tranziszttal

A mintavételes szűrők tervezésének egyik precíz módszere a realizált másodfokú alaptagokból közvetlenül kialakított szűrők, melyek átviteli függvénye a z tartományban nagyon pontosan számítható.

A gyakorlati szempontból egyelőre sokkal jelentősebbek viszont az integráló alaptagokból felépített kapcsolt kapacitásos szűrők, amelyek közvetlenül visszavezethetők az eredetileg passzív LC hálózatok átviteli függvényéből származtatott aktív RC létra vagy „leapfrog” szűrők működésére. Mivel a passzív LC hálózat speciálisan érzéketlen az egyes alkatrészek paramétereire, ez a szűrőtervezési módszer biztosítja a legnagyobb paraméterérzéketlenséget a precíziós kapacitásarány értéktoleranciájával szemben.

A létraszűrők alapja a differenciális integrátor,



H780-3

3. ábra. A differenciális integrátor kialakítása a) aktív RC alakban, b) kapacitással

amely a 3. ábrán látható. A gyakorlati realizálás szempontjából [3] korlátozó tényezők a következők:

- A kapacitásarány pontatlansága veszteséget okoz az átviteli függvényben. Egy ötödfokú Chebisev szűrőben 1% pontatlanság $A = 0,022$ dB erősítés veszteséget okoz;
- A parazita kapacitás töltéstároló hatása az erősítő invertáló bemenetén lerontja az erősítő közös módú jelelyomását, és egy kissé a differenciális erősítést is.
- A kapacitáscapacitás értékét több nagyságrenddel nagyobbak kellene választani, mint a parazita kapacitását. A gyakorlatban ez az arány nemigen haladja meg a 10 értéket;
- A műveleti erősítő véges erősítése veszteséget okoz. Az ötödfokú Chebisev szűrő realizálásakor a műveleti erősítő $A_0 = 60$ dB alacsonyfrekvenciás erősítése 0,02 dB veszteséget jelent a szűrő átviteli karakterisztikájában;
- A szűrőben a műveleti erősítő és a kapacitáscapacitás egyaránt zajforrásként működik, a kettő közül a műveleti erősítő zaja a jelentősebb. Az ekvivalens zajfeszültség a működési frekvencián $30-50 \mu\text{V}$;
- A műveleti erősítő kiegyenlítő feszültsége a létrában szuperonálódik;
- A műveleti erősítő beállási ideje korlátozza a maximális órajel frekvenciát. A minimális mintavételi frekvenciát viszont a töltést elvezető szivárgó áramok korlátozzák.

Az NMOS műveleti erősítőkben a bemenő fokozat közös emitteres differenciálerősítő, a második erősítő egy nagy erősítésű invertáló fokozat. Kapacitáscapacitásos szűrőkben a nem invertáló bemenet általában földelve van és ilyenkor elegendő közös módusú jelelyomást biztosít az aszimmetrikus kimenetű differenciálfokozat. Ellenkező esetben bonyolult aszimmetrizáló és szinteltoló áramkör szükséges a két fokozat közé. Mivel létrákban az erősítő kimenetét csak kapacitás terheli, a kimenő fokozat is viszonylag egyszerűen kivitelezhető, egyes esetekben egyetlen emitterkövető fokozat is elegendő. A tervezés

legfőbb kritériuma viszont az, hogy a visszacsatolt erősítő stabil legyen, azaz belső frekvenciakompenzációval működjön. A belső kompenzációt lehetőleg kis felületigényű kapacitással kell elérni.

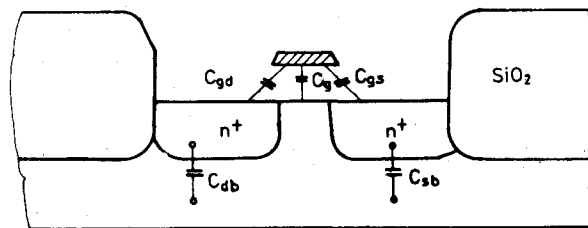
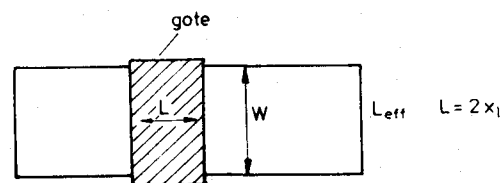
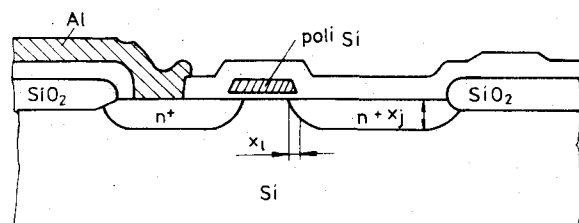
Az NMOS műveleti erősítők problémáinak részletezésére itt most nincs lehetőség kitérni. Belátható azonban, hogy az összes felsorolt kritérium mellett döntő fontosságú a realizált blokk teljesítményfelvétele és felületigénye.

Alkatrészek realizálása NMOS technológiával

A MOS kapcsoló

A kapcsoló működés szempontjából fontos paraméterek — a tranzisztor B_{on} differenciális bekapcsolási ellenállása —, a parazita kapacitások, valamint a szivárgások. A tranzisztor kialakítása NMOS technológiával a 4. ábrán látható.

A korszerű technológia, a vezérlőelektróda önillesztésével éri el a gate-drain, gate-source átlapolási kapacitások lecsökkentését. Az önillesztés tényét a gate kialakítást követő diffúzió jelenti, mértékét a diffúzió mélysége korlátozza. A diffúziós mélység csökkentése viszont károsan befolyásolja a p-n átmenet visszarámát. A technológia jellemzője az egyes rétegekben nyitott ablakok, csíkok mérete, amely a csatornahosszat (l) és -szélességet (w) határozza meg. A hagyományosnak nevezett NMOS technológia az $L_{min} = 6 \mu\text{m}$ minimális méretről kapta a 6 μm -es MOS technológia nevet.



H780-4

4. ábra. Az NMOS tranzisztor, a) metszeti kép, b) felülnézet, c) a parazita kapacitások

A parazita kapacitások csökkentésének csak egyik módja a felületesőkkentés. Igen hatékony a vastagság növelése, ami a $p-n$ átmenet kapacitások esetében C_{dB} , C_{sB} értelemszerűen a kiürített réteg vastagságának növelését, vagyis az alapanyag adalék-koncentrációjának csökkentését jelenti. Ezért — bár nemcsak ezért — a korszerű technológia viszonylag nagy ellenállású alapanyagból indul ki, amely sajnos nem alkalmas sem az aktív tranzisztorok nyitó-feszültségének beállítására, sem a szigetelő oxid alatti esetleges parazita vezető csatornák megszüntetésére. Ezen segít az ionimplantációs technika, amely lehetővé teszi definiált adalékmenyiség bejuttatását a már kialakult oxid-szilícium határfelületbe. Ezt az eljárást süllyesztett oxidációval azért előnyös párosítani, mert így nincs szükség külön maszkra a csatorna-stop implantációhoz.

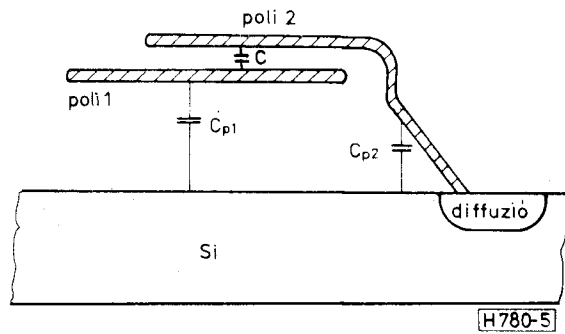
Ezek volnának a korszerű NMOS technológia fő ismérvei, amellyel egységnyi w/L arányú MOS kapcsoló tranzisztort véve figyelembe, elérhető $R_{O_1} = 5$ kohm bekapcsolási ellenállás $V_{gs} = 5$ V mellett; míg $C_{sb} = 0,020$ pF és $C_{gs} = 0,005$ pF értékű parazita kapacitások keletkeznek. A szivárgó áram 10^{-14} A érték alá csökkenthető, bár ennek állandó biztosítása a technológiai ellenőrzés legérzékenyebb pontja.

A MOS kapacitás

A kapacitások kialakítására több lehetőség van. A legkevesebb extra problémát jelentő megoldás a korszerű NMOS technológiában az, amikor a két polikristályos szilíciumréteg közötti termikus oxid réteg alkotja a kapacitást. A termikus oxidréteg kiváló minőségének biztosítása a technológiai ellenőrzés feladata. Az így kialakított kapacitás névleges értéke a felülettől, az oxid vastagságától és a dielektromos állandótól függ. Mivel a vastagság egész pontos reprodukálása lehetetlen, a kapacitás névleges értéke helyett, két vagy több kapacitás értékének arányát kell az áramkör működés alapjává tenni. A kapacitás arányok pontos reprodukálása is csak akkor várható el, ha az elektródák felület-arányának megfelelően alakul az elektródák kerületaránya. A maszktervezéskor törekedni kell arra, hogy a nagyobb kapacitások a kisebb értékű kapacitásokból legyenek összerakva.

A kerületmenti méretváltozás a marási műveletkor jelentkező alamarás bizonytalan értékéből ered. A korszerű technológiai sor rendelkezik olyan berendezésekkel, amellyel a leválasztott szilíciumréteg vastagságát igen nagy pontossággal lehet azonos értékben tartani (alacsony nyomású leválasztó reaktor) és olyanokkal, amelyekkel a kémiai marás bizonytalan és esetleg helyfüggő oldalirányú marási sebessége erősen lecsökkenthető (plazmás szilícium maró berendezés).

Mint az az 5. ábrán jól látható, a poli-poli kapacitásnak jelentős hátránya van: a kapacitás alatt sajnos mindig létrejön egy másik, melynek értéke körülbelül a kapacitás 10%-a. Sőt mi több, a gyakorlatban a felső elektróda és a szubsztrát közötti parazita kapacitás értéke is gyakran jelentős lehet, ez utóbbi értékét az összeköttetések kialakításával lehet befolyásolni.



5. ábra. A poli-poli kapacitás metszeti képe. C_{p1} és C_{p2} parazita kapacitások

Az ellenállás

A diffúziós terület értelemszerűen ellenállások kialakítására is alkalmas. Ezeknek az ellenállásoknak értéke csak egy viszonylag szűk értéktartományban változtatható, viszont a kapacitásarányokhoz hasonlóan ellenállásarányok is igen pontosan beállíthatók. Természetesen az ellenállás értékében a kontaktus-ellenállások értéke is szerepet játszik.

MOS tranzisztor

Kisjelű helyettesítő kép

Az analóg áramköri cellákban a MOS tranzisztor telítési tartományban működik. Az áram feszültségfüggését első fokú közelítésben a jól ismert négyzetes karakterisztika írja le.

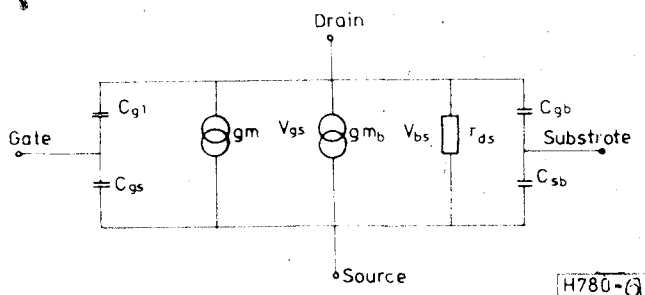
A telítésben működő MOS tranzisztor kisjelű helyettesítő képét a 6. ábrán láthatjuk. A g_m merevedséget a (2) összefüggésből kapjuk.

$$g_m = \frac{\delta I_D}{\delta V_{GS}} = 2 \sqrt{\beta I_D (1 + \lambda V_{DS})} \quad (2)$$

A source-szubsztrát merevedség a nyitófeszültség és a source-szubsztrát előfeszítés közötti kapcsolatból következik.

$$g_{m_b} = \frac{\delta I_D}{\delta V_{BS}} = \frac{V}{2 \sqrt{V_{SB} + 2 \Phi_B}} g_m \quad (3)$$

A (2) összefüggés jól reprezentálja a MOS analóg áramkörtervezés legfőbb problémáját, nevezetesen azt, hogy a MOS tranzisztorral elérhető g_m/I_D arány messze elmarad a bipoláris tranzisztorral elérhetőtől.



6. ábra. A MOS tranzisztor kis jelű helyettesítő képe

I_D minden határon túl való csökkentése, illetve a w/L arány növelése pedig nem lehetséges, mert a tranzisztor „a nyitófeszültség alatti áram” működési tartományba kerül.

A tranzisztor kimenő ellenállása, r_{DS} , igen nagy. λ csatornarövidülés hatására a kimenő ellenállás csökken.

$$r_{DS} = \frac{1 + \lambda I_D}{\lambda I_D}.$$

A MOS tranzisztor hőmérsékletfüggése

A bipoláris analóg áramkörök fontos problémája a hőmérsékletfüggés. A MOS tranzisztor ebből a szempontból előnyösebb eszköz. A MOS tranzisztor árama a hőmérséklet növekedésével közel változatlan. Ennek oka az, hogy két egymással ellentétes hőmérsékletfüggésű jelenség eredője érvényesül az áramegyenletben. A MOS tranzisztor nyitófeszültsége a hőmérséklet növekedésével csökken, de a csatornában az elektronok mozgékonyasága is lecsökken.

A két változás egy adott munkapontban csaknem kompenzálja egymást.

A MOS tranzisztor zajja

A 6. ábra kis jelű helyettesítő képét kiegészíthetjük a lehetséges zajforrásokkal. A termikus zajt és a Flicker zajt a drain-source körbe kapcsolt I_d^2 áramú áramgenerátorral szimulálhatjuk. A Flicker

zaj ($1/f$ zaj) az oxid-szilícium határfelületi állapotok és csapdák hatásának következménye.

Összefoglalás

Az analóg áramköri részletek előállításakor fokozottan kell figyelni a technológiai paraméterek változásainak hatására. Ezért olyan kapcsolásokat kell választani, amelyek optimálisan érzéketlenek a paraméter szórásokra. Emellett a technológia ellenőrzését rendkívül meg kell szigorítani.

A digitális szuperbonyolult integrált áramkörök előállításához kifejlesztett NMOS technológia alkalmas analóg áramköri elemek előállítására is. Ezzel lehetővé válik analóg-digitális átalakító és mintavételes szűrő funkció integrálása szilícium monolitikus áramkörbe. Az optimális technológia a „duplapólis”, kiürítéses terhelésű NMOS eljárás, nagy ellenállású alapanyag.

I R O D A L O M

- [1] B. Fofouchi, D. A. Hodges: ISSCC 1979 February Digest of Technical Papers p. 186
- [2] Dr. Simonyi Ernő: Kandidátusi értekezés. Budapest, 1978
- [3] P. R. Gray, D. Senderowicz, H. Ohara, B. M. Warren: IEEE J. of Solid-State Circuits, Vol. SC-14 No. 6 1979 p. 981